



Levels of Organisation in agent-based modelling for renewable resources management. Agricultural water management collective rules enforcement in the French Drôme River Valley Case Study.

Géraldine Abrami

► **To cite this version:**

Géraldine Abrami. Levels of Organisation in agent-based modelling for renewable resources management. Agricultural water management collective rules enforcement in the French Drôme River Valley Case Study.. domain_other. ENGREF (AgroParisTech), 2004. English. NNT: . pastel-00000904

HAL Id: pastel-00000904

<https://pastel.hal.science/pastel-00000904>

Submitted on 9 Mar 2005

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

présentée par

Géraldine Abrami

pour obtenir le grade de

Docteur de l'ENGREF

Spécialité : Sciences de l'Eau

Sujet :

**Niveaux d'organisation dans la modélisation
multi-agent pour la gestion de ressources renouvelables.**
Application à la mise en oeuvre de règles collectives de gestion
de l'eau agricole dans la basse-vallée de la Drôme

Soutenue publiquement le 29 novembre 2004

à l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts

Centre de Montpellier

devant le jury suivant :

Claude Millier	Engref, Montpellier	Président du jury
Marc Benoît	Inra, Mirecourt	Rapporteur
Jean-Pierre Müller	Cirad, Montpellier	Rapporteur
Sylvie Lardon	Engref Clermont-Ferrand	Directrice de thèse
Olivier Barreteau	Cemagref, Montpellier	Examineur
Flavie Cernesson	Engref, Montpellier	Examinatrice
Jean Polge de Combret	Diademe Ingenierie, St-Martin d'Hères	Examineur
Michel Desbordes	Université Montpellier II	Examineur

Résumé

Niveaux d'organisation dans la modélisation multi-agent pour la gestion de ressources renouvelables.

Application à la mise en œuvre de règles collectives de gestion de l'eau agricole dans la basse-vallée de la Drôme

Dans le contexte de la modélisation multi-agent pour la gestion concertée de ressources renouvelables, la thèse propose une réflexion sur la représentation de niveaux d'organisation multiples et enchevêtrés d'un système.

Le formalisme Agent-Groupe-Rôle (AGR), issu de la recherche informatique est spécifié en vue de l'identification et de la manipulation des niveaux d'organisation d'un système, et des comportements des entités du système au sein de ces niveaux d'organisation. Une méthodologie de conception d'un modèle AGR, ainsi qu'une implémentation du formalisme sur une plate-forme multi-agent sont proposées.

Le développement et les tests de modèles AGR de la gestion de l'eau agricole dans la basse-vallée de la Drôme démontrent la capacité du formalisme AGR à (1) expliciter des hypothèses sur des modes d'actions, des échelles ou des points de vue, implicites dans des modèles multi-agents plus classiques (2) produire aisément des scénarios incorporant des règles collectives variées, et des comportements de mise en œuvre de ces règles variés (3) générer des briques génériques de modèles de bassin versants irrigués.

Mots-clés: Modélisation multi-agent, Niveau d'Organisation, Méta-Modèle, Agent-Groupe-Rôle, Bassin Versant Irrigué, Gestion Collective, Étiages, Drôme

Abstract

Levels of Organisation in agent-based modelling for renewable resources management. Agricultural water management collective rules enforcement in the French Drôme River Valley Case Study.

In the context of Agent-Based Modelling for participative renewable resources management, this thesis is concerned with representing multiple tangled levels of organisation of a system. The Agent-Group-Role (AGR) formalism is borrowed from computer science research. It has been conceptually specified to handle levels of organisation, and behaviours within levels of organisation. A design methodology dedicated to AGR modelling has been developed, together with an implementation of the formalism over a multi-agent platform.

AGR models of agricultural water management in the French Drôme River Valley have been built and tested. This experiment demonstrates the AGR formalism ability to (1) clarify usually implicit hypothesis on action modes, scales or viewpoints (2) facilitate the definition of scenarios with various collective rules, and various rules enforcement behaviours (3) generate bricks for generic irrigated catchments models

Keywords: Agent-Based Modelling, Level of Organisation, Meta-Model, Agent-Group-Role, Irrigated Catchment, Collective Management, Low Water, Drôme

Remerciements

Mes premiers remerciements vont à Olivier Barreteau et Flavie Cernesson, qui m'ont encadrée directement durant ces 3 années. C'est grâce à Olivier que je me suis lancé dans l'aventure AGR, et que j'y ai progressé au gré de ses relectures impitoyables et de toutes les questions qu'il aura posé en réponse à mes questions. Quant à Flavie, je n'oublierai pas ses grilles à entrées multiples ni ses séances de relecture à voix haute, pas plus que son aide précieuse et son soutien à l'écriture depuis les balbutiements jusqu'à l'accouchement de ce manuscrit. Tous deux ont cru en moi et en cette thèse. Ils n'ont jamais manqué de me guider et de me soutenir dans les hauts et les bas de ce long chemin, et auront jusqu'au bout fait en sorte que les choses soient pour moi aussi simples que possible, et je leur en suis profondément reconnaissante.

Je remercie ensuite ma directrice de thèse, Sylvie Lardon. Tout au long de la maturation de ce travail, et malgré la disparition progressive de son contenu spatial, elle aura su se rendre disponible et y apporter un regard synthétique et critique particulièrement constructif.

J'adresse toute ma reconnaissance à Marc Benoit et Jean-Pierre Muller, qui ont accepté d'être les rapporteurs de cette thèse. Je remercie Marc Benoit pour sa lecture attentive et ses questions pertinentes. Quant à Jean-Pierre Muller, je le remercie également pour sa disponibilité et les échanges fructueux que nous avons eu à plusieurs reprises bien avant la soutenance. Michel Desbordes et Jean Polge de Combret m'ont fait l'honneur d'être membres du jury. Merci à eux deux d'avoir accepté de me lire. Finalement, je remercie vivement Claude Millier, qui en plus d'avoir présidé ce jury aura cru en cette thèse atypique en sa qualité de directeur scientifique de l'ENGREF.

Il me faut également remercier le Ministère de l'Environnement qui a participé au financement de ma thèse à travers le programme Concertation, Décision, Environnement. Durant les 3 derniers mois de mon contrat, j'ai été prise en charge par l'UMR3S. Que Sylvain Labbé en soit remercié.

J'en viens maintenant aux diverses personnes avec qui j'ai pu discuter de mon travail et enrichir ma réflexion à différentes étapes de ma thèse. Je remercie tout d'abord les membres de mon comité de thèse : Didier Graillot, Hervé Gumuchian, Christophe Le Page et Catherine Roudier. Je suis très reconnaissante à Thérèse Libourel de son appui à la formalisation UML de mes diagrammes. Je remercie chaleureusement l'ensemble de l'équipe Green du Cirad pour les discussions autour de mon modèle. Enfin je remercie Jacques Ferber de son regard bienveillant sur ma libre interprétation d'AGR. Que ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à la maturation de mon travail et que j'ai pu oublier veuillent bien me pardonner.

Ma thèse ne s'est pas déroulée uniquement dans un bureau. Lors de mon séjour dans la Drôme, j'ai été accueillie dans les locaux du CCVD. J'en remercie Magali Vieux-Melchior, ainsi que Didier Jouve. Je pense aussi à Michel Serre, Jean-Paul Crouzet et Roger Bon, les présidents des 3 réseaux d'irrigation du Val de Drôme, ainsi qu'à l'ensemble des agriculteurs que j'ai rencontré et que je ne peux tous citer ici. Grâce à eux j'ai découvert le monde agricole, et je les remercie chaleureusement pour leur gentillesse et tout le temps qu'ils ont accepté de m'accorder au beau milieu de l'été.

J'ai effectué la totalité de ma thèse au sein de l'ex-équipe GetIrri du Cemagref de Montpellier. Je remercie Patrice Garin de m'y avoir accueillie. Merci à lui pour ses qualités humaines et ses remarques toujours extrêmement pertinentes dans les diverses occasions où je lui ai présenté mon travail. Merci à lui également de m'avoir accompagnée lors de mon premier entretien dans

la Drôme, et surtout de ne pas avoir eu peur dans la voiture ! Que les autres membres de l'équipe soient également remerciés pour leur entourage humain et scientifique. Je pense en particulier à Nils Ferrand qui m'aura entre autres soufflé le titre de ce manuscrit. Enfin je remercie Christine Moretti et Josiane Dartau, les assistantes de l'équipe, pour leur gentillesse et leur disponibilité.

Et puis, last but not least, je n'oublie pas la Cemagref Power team sans qui mes journées auraient été bien mornes. Commençons par le canal historique : William's Daré grand maître du bureau 42, puis ses drôles de dames, Annabelle Boutet, Audrey Richard, et bien sûr Iana Guenova ma compagne de galère. Venons-en ensuite aux « branches rapportées » : Marjorie Le Bars, puis Frédéric Grelot, compagnon de galère des derniers jours. Que Marjorie et Audrey soient particulièrement remerciées pour leurs relectures stakhanovistes durant la phase terminale. Enfin, je remercie tous les membres du Cemagref, ainsi que les thésards et stagiaires dont j'ai partagé le quotidien pour les discussions de café, de repas ou de soirée. Je pense à particulier à David, Nicolas, Thomas, Florence, Sara, Laure, Julien...

Je finirai cette longue liste en évoquant ceux qui sans jamais rien comprendre à ces histoires de groupes et de rôles ont supporté mes humeurs et mes coups de blues.

Je remercie tout particulièrement Fred pour tout son soutien, tant moral que culinaire !

Merci aussi aux deux grâces, aux Kalfoun et à tous les autres pour une infinité de petites choses insaisissables.

Merci enfin à ma famille et surtout à ma maman pour avoir fait de moi ce que je suis.

- J'ai fixé cette immense surface blanche et je me suis dit.. ça y est. Je peux faire ce que je veux.
Les possibilités sont infinies. Je suis le commencement et la fin.
Et je me suis demandé quelle serait la première ligne, quel mouvement elle ferait, quelle couleur elle
aurait, quelle forme...
Et je me suis senti absolument terrifié.
Dave McKean, Cages

A mon père

Table des matières

Table des figures	xiii
Liste des tableaux	xix
Glossaire	1
Introduction générale	3

Partie I Pour une représentation des niveaux d'organisation : les enjeux de la thèse

Chapitre 1 Contexte : niveaux d'organisation et gestion de l'eau	13
1 Contexte méthodologique et applicatif	14
1.1 La modélisation comme support pour la gestion des ressources renouvelables	14
1.2 La modélisation multi-agent	20
2 Construction d'une réflexion autour de la gestion quantitative de l'eau dans des bassins irrigués	27
2.1 La gestion quantitative de l'eau dans des bassins irrigués	27
2.2 Quel niveau de complexité représenter ?	31
2.3 Comment représenter les modes de gestion ?	33
3 Un questionnement méthodologique autour du concept de niveau d'organisation	37
3.1 Le concept de niveau d'organisation	37
3.2 Mise en place d'une réflexion méthodologique	39

Chapitre 2 Le choix du formalisme AGR	43
1 SMA et organisation	44
1.1 Définitions sur les SMA	44
1.2 Organisation et concepts organisationnels	46
2 Choix d'un formalisme organisationnel	49
2.1 Caractéristiques d'un formalisme organisationnel	49
2.2 Approches organisationnelles en informatique et en modélisation	51
2.3 Conclusion	54
3 Le formalisme AGR	57
3.1 Définitions et propriétés	57
3.2 Travaux liés à AGR	63
Chapitre 3 Cadre d'application : le SAGE Drôme	71
1 Acteurs et niveaux d'organisation de la gestion collective de l'eau dans la Drôme	72
1.1 Situation générale	72
1.2 Acteurs et usages	73
1.3 Niveaux d'organisation	78
1.4 Informations factuelles	83
2 L'intervention du Cemagref	92
2.1 Contexte de l'intervention	92
2.2 Simulation de scénarios pour la signature de l'accord local	97
2.3 Retour vers la recherche : SMA et jeu de rôles	98
2.4 La thèse : une étude hors des enjeux du terrain	100

Partie II Modèles et méta-modèles : développements conceptuels, opérationnels et méthodologiques

Chapitre 4 De AGR à ORIGAMI	107
1 Aspects conceptuels	108
1.1 Le concept de rôle en informatique	109
1.2 Le rôle : un élément de comportement contextuel	110

1.3	L'agent	110
2	Aspects opérationnels	111
2.1	Plate-forme utilisée	111
2.2	Méta-modèle opérationnel	112
2.3	Gestion du temps dans CormasAGR	118
3	Aspects méthodologique : ORIGAMI	124
3.1	Recommandations méthodologiques autour d'AGR	124
3.2	Les exemples	125
3.3	Les diagrammes de conception	125
3.4	Les diagrammes de mise en œuvre	141
Chapitre 5 Un modèle-jouet pour expliciter concepts et méthodologie		147
1	De GibiDrome à la situation jouet	148
1.1	Le modèle-jouet : une version simplifiée de GibiDrome	151
1.2	La situation-jouet	153
2	Conception du modèle-jouet	157
2.1	Quelles structures de groupe : structures et fonctions	157
2.2	Quels agents : lister les entités individuelles du système	158
2.3	Quels rôles : fonction des agents dans les groupes	159
2.4	Aspects dynamiques	166
3	Quelques points de mise en œuvre du modèle	172
3.1	Règles collectives et règles individuelles	172
3.2	Gestion des rôles : cas où un agent prend part à plusieurs instances d'un même groupe	175
3.3	Gestion du temps : événements et influences	176
4	Initialisation et paramétrage	178
4.1	Initialisation	178
4.2	Paramétrage	180
Chapitre 6 Extension à des modèles plus complexes		183
1	Du modèle-jouet à GibiAGR	184
1.1	De 1 à 3 réseaux, apparition des irrigants individuels : exploration de nouvelles connections	185
1.2	Ajout des ressources complémentaires	186
1.3	Nouveaux modes de lancement de l'irrigation : définition de nouvelles structures de groupe et de nouveaux rôles	190
1.4	Comparaison entre GibiDrome et GibiAGR	192

2	Modèle hétérogène : de GibiAGR à GibiH	193
2.1	Un nouveau mode d'allocation des débits	193
2.2	Une nouvelle règle de gestion dans les réseaux	195
2.3	Décomposition de la prise de décision sur la gestion des irrigations	197
2.4	Diversification des stratégies des irrigants	201
3	Présentation synthétique des 3 modèles	208
3.1	Présentation comparée des 3 modèles	208
3.2	Paramètres des modèles	211

Partie III Simulations et discussions

Chapitre 7 Tests de vérification et analyse de sensibilité	221
1 Définitions et prérequis	222
1.1 Vérification, validation, analyse de sensibilité	222
1.2 Variables, paramètres, scénarios, simulations	223
1.3 Prérequis valables pour tous les tests	224
2 Tests de vérification	226
2.1 Familles de test	226
2.2 Définition des tests pratiqués	229
2.3 Résultats des tests	232
3 Analyse de sensibilité	253
3.1 Définition des tests pratiqués	253
3.2 Résultats des tests	258
Chapitre 8 Bilan et discussions	279
1 Retour critique sur la méthodologie ORIGAMI	280
1.1 Gestion de la complexité par ORIGAMI	281
1.2 Raffinage	283
1.3 Ouverture	284
1.4 Expressivité	284
2 Bilan des développements conceptuels	285
2.1 Groupes et niveaux d'organisation	285

2.2	Rôles et éléments de comportement	289
2.3	Prise en charge de rôles multiples	293
3	Aspects opérationnels	298
3.1	Niveau méta : retour sur CormasAGR	298
3.2	Impact de la gestion du temps par événements	298
3.3	Le cas particulier de la distribution de l'eau	300
3.4	Construction de scénarios et mise en œuvre de simulations	301
Conclusion générale		305
Bibliographie		313

Annexes

Annexe A Fiches d'analyse de 9 modèles multi-agents de systèmes de gestion d'eau agricole		325
Annexe B Questionnaire utilisé lors des enquêtes dans la Drôme		345
B.1	Choix des agriculteurs rencontrés	345
B.2	Guide d'entretien utilisé lors du séjour de terrain	346
Annexe C Données sur la Drôme - Campagne de terrain juillet 2002		355
C.1	Acteurs	355
C.2	Pratiques individuelles	357
C.3	Pratiques et motivations	362
C.4	Rôles multiples	368
Annexe D Le modèle GibiDrome		371
D.1	Espace et données physiques	371
D.2	Processus physiques	372
D.2.1	Circulation de l'eau	372
D.2.2	Bilan hydrique	372
D.3	Règles de comportement des acteurs	373
D.4	Dynamique	376

Annexe E Détails du modèle-jouet	377
E.1 Role Models	377
E.2 Dynamique : vues globales	384
E.2.1 Les différentes phases de la simulation	384
E.2.2 Déroulement d’une journée normale durant la phase d’irrigation	385
E.3 Dynamique : processus physiques	386
E.3.1 Propagation du débit	386
E.3.2 Demande et débit	387
E.3.3 Bilan hydrique	388
E.4 Dynamique : processus sociaux	390
E.4.1 Initialisation de la phase d’irrigation	390
E.4.2 Passages en période de crise	393
E.4.3 Réalisation dans le modèle-jouet	396
Annexe F Listing des classes des modèles	397
Annexe G Paramètres des modèles	403
Annexe H Définitions générales sur les protocoles de tests de vérification et de sensibilité	405
H.1 Étapes de mise en œuvre d’un test (d’après [Saltelli, 2000])	405
H.2 Techniques de criblage	406

Table des figures

1	Organisation du document	6
2	Des briques des systèmes de gestion de l'eau : acteurs, niveaux physiques, modes de gestion	34
3	Concept de rôle : insertion de l'action individuelle dans un collectif	48
4	L'organisation comme vue conceptuelle sur un SMA	50
5	Le formalisme AGR : illustration	59
6	Illustration de la structuration apportée par AGR	59
7	Interactions intra et inter niveaux d'organisation avec AGR	60
8	AGR et modularité	61
9	Vallée de la Drôme	73
10	Basse-vallée de le Drôme	74
11	Exemples de liens entre les types de niveaux d'organisation identifiés autour de la gestion de l'eau dans la Drôme	82
12	Schéma fonctionnel des prélèvements dans la basse-vallée de la Drôme (source : Olivier Barreteau, <i>Modalités de partage de la ressource en eau à l'aval de Crest</i> , Rapport d'exécution pour le Cemagref, 2003)	83
13	Diagramme UML des classes principales de l'architecture AGR	113
14	Diagramme des classes des entités dans Cormas et dans CormasAGR	115
15	Éléments d'interface modifiés dans Cormas	115
16	Diagramme des classes UML des classes et attributs relatifs à la gestion du temps dans CormasAGR.	120
17	Éléments d'interface modifiés dans Cormas pour la gestion du temps par événements	124
18	ORIGAMI, vue globale (1) : établissement de la structure AGR du modèle	126
19	ORIGAMI, vue globale (2) : Raffinement de la description des éléments du modèle	127
20	Diagramme fonctionnel global de l'épizootie	129
21	Diagramme fonctionnel global du reviewing	129
22	Diagramme de classes des entités de l'épizootie	130
23	Diagramme swimlane de l'épizootie	132
24	Diagramme swimlane du processus de reviewing	132
25	Diagramme structurel du processus de reviewing	133
26	Diagramme dynamique global de l'épizootie	133
27	Diagramme dynamique global de l'épizootie	134
28	Diagramme dynamique global du reviewing	134
29	Diagramme dynamique local « A » du processus de vèlage dans l'épizootie	136

30	Diagrammes dynamiques locaux « A » et « B » du processus de reviewing : soumission des papiers et formation des comités de lecture	137
31	Diagrammes dynamiques locaux « C » et « D » du processus de reviewing : négociation des évaluations dans les comités de lecture, et dans le ProgramComitee	137
32	Role model du groupe Production (exemple de l'épizootie)	138
33	Role model du groupe ProgramComitee (exemple du reviewing)	139
34	Diagramme de composition des rôles de Agent (exemple du reviewing)	140
35	Exemple de diagramme de séquences organisationnel pour le reviewing (d'après [Ferber <i>et al.</i> , 2003])	142
36	Représentation des événements et des influences dans les diagrammes d'activité organisationnels	143
37	Exemple de diagramme d'activité organisationnel pour l'épizootie	144
38	Exemple de diagramme d'état pour l'épizootie	144
39	Éléments développés dans le chapitre : instanciation et spécification du formalisme AGR	146
40	Simplifications du système étudié : du cas réel à GibiDrome, puis de GibiDrome à la situation jouet (d'après SICB)	149
41	Diagramme d'état UML du comportement des irrigants dans GibiDrome	150
42	Représentation schématique de la situation jouet	154
43	Chronogrammes illustrant la simulation du temps dans GibiDrome et dans le modèle jouet	155
44	Chronogrammes illustrant la gestion des stocks d'eau à la parcelle dans GibiDrome et dans le modèle jouet	156
45	Diagramme fonctionnel global du modèle jouet	158
46	Diagramme des classes des entités individuelles du système	159
47	Diagramme swimlane des processus physique du modèle jouet	160
48	Diagramme swimlane de l'allocation de l'eau dans les exploitations	162
49	Diagramme des classes du rôle Manager	162
50	Diagramme swimlane des processus sociaux du modèle jouet.	164
51	Diagramme swimlane du modèle jouet	165
52	Diagramme dynamique global des différents flux du modèle	166
53	Diagramme dynamique local : rafraîchissement du débit entrant dans le bassin. .	167
54	Diagramme dynamique local : rafraîchissement de la pluie et de l'évapotranspiration.	168
55	Diagramme dynamique local : actionnement d'une pompe.	168
56	Role model du groupe IrrigationNetwork	169
57	Diagramme dynamique local : observation de la rivière changement de niveau de crise	171
58	Classes utilisées pour la mise en œuvre des règles collectives d'irrigation	174
59	Diagramme de séquence des dynamiques organisationnelles lors des actions d'ir- rigation. Les références se rapportent aux diagramme dynamique local 55.	176
60	Diagramme d'activité organisationnel du bilan hydrique dans le modèle jouet . .	177
61	Diagramme d'activité organisationnel illustrant l'utilisation d'une influence ano- nyme	178
62	Diagramme structurel du modèle-jouet	179
63	Diagramme fonctionnel global de GibiAGR	185

64	GibiAGR : diagrammes swimlane et diagramme dynamique local de l'irrigation individuelle	186
65	GibiAGR : diagramme dynamique local de la connexion physique avec le SISEV	187
66	GibiAGR : diagramme swimlane social de la connexion avec le SISEV	187
67	Diagramme d'activité organisationnel simplifié de la propagation et du traitement des demandes dans le modèle-jouet	189
68	Diagramme d'activité organisationnel simplifié de la propagation et du traitement des demandes dans GibiAGR	189
69	Diversification des stratégies de lancement de l'irrigation	190
70	Diagramme swimlane des structures de groupe MailingList et DashBoard	191
71	Diagramme dynamique local du déclenchement de l'irrigation par information centralisée	192
72	Diagramme de composition des rôles des transitions entre lancement de l'irrigation et irrigation	192
73	Implémentation du nouveau mode de calcul de la circulation de l'eau dans une nouvelle classe surclassant WaterBranch	194
74	Effet du paramètre c sur la répartition amont-aval du débit des pompes	195
75	Schéma dynamique local de la mise en œuvre d'une règle d'attribution des débits en fonction des types de sol	196
76	Diagramme de composition des rôles des transitions autour du rôle ManagerFlow-ForSoil de IrrigationAssociation	197
77	Diagramme des classes des hiérarchies de rôles induites par la diversification des décisions sur l'irrigation	199
78	Diagramme swimlane des différentes rôles portés par un Farmer autour de l'irrigation	200
79	Diagramme de composition des rôles liés aux décisions autour de l'irrigation	200
80	Diagramme des classes des rôles de semis et des types de plantes	202
81	Diagramme des classes des rôles de lancement de l'irrigation et de gestion de l'irrigation	203
82	Structure du réseau de voisinage dans le système complet	204
83	Présentation comparée des 3 modèles du point de vue des pratiques individuelles	209
84	Présentation comparée des 3 modèles du point de vue des niveaux d'organisation	210
85	Présentation comparée des 3 modèles du point de vue des règles collectives	210
86	Extensions de GibiAGR et GibiH. Se reporter à l'annexe F pour les abréviations.	230
87	Test V1, synchronisation des événements : les 4 cas testés	234
88	Résultats du test V1 dans les cas 1 et 2	235
89	Test V1, synchronisation des événements sur 3 des 4 cas : explications	235
90	Test V2, synchronisation des événements : les 3 cas testés	238
91	Résultats du test V2 dans les 3 cas	239
92	Test V2, synchronisation des événements sur les 3 cas : explications	239
93	Test V3 : dates des actions des exploitants pour chaque type de culture	241
94	Test de la droite de Henry pour les dates de semis	242
95	Test V3 : Doses apportées par les irrigants de type tP	243
96	Test V4 : résultats du test de propagation du lancement de l'irrigation pour les différents types d'assolement	246
97	Calcul de la dose $d_{i,j}$ appliquée par l'irrigant i le jour de la semaine j selon le niveau de crise, la règle collective et le rôle de gestion du calendriers	249

98	Test V5 : Erreurs lors des changements de crise	250
99	Test V6 : sensibilité de GibiDrome à l'index du dimanche	252
100	Espace des valeurs dans le cas de paramètres fixés par des probabilités de réalisation	256
101	Résultats du test S1 pour les distributions extrêmes	259
102	Résultats du test S1 sur les débits pompés dans la rivière pour les scénarios locaux	262
103	Résultats du test S2 pour les niveaux de crise et les débits instantanés sur les distributions extrêmes	264
104	Débits pompés sur une journée type	265
105	Résultats du test S2 pour les débits journaliers sur les distributions extrêmes . .	266
106	Profils des demandes collectives sur une semaine	267
107	Profils de la demande totale des irrigants de type TimeManagerWide	268
108	Résultats du test S2 pour les stress hydriques sur les distributions extrêmes . . .	268
109	Résultats du test S2 pour les stress hydriques sur les scénarios locaux	270
110	Résultats du test S2 pour les débits instantanés sur les scénarios locaux autour de la configuration <i>Mix</i>	271
111	Résultats du test S3 pour les niveaux de crise et les débits instantanés	273
112	Effets des paramètres du test S3 sur le stress hydrique	274
113	Effets des paramètres du test S3 sur le débit journalier pompé	275
114	Démarche générale : instanciation et spécification du formalisme AGR	280
115	Diagramme de classe : hiérarchie des structures de groupe du modèle jouet . . .	287
116	Diagramme de classe : hiérarchie des rôles d'observation et de contrôle du modèle jouet	291
117	Diagramme de classe : hiérarchie des rôles sociaux du modèle jouet	292
118	Diagramme swimlane d'un groupe de type ManagementInstitution (Farm , IrrigationAssociation et Basin)	295
119	Cycle de décision d'un agent induit par l'utilisation d'AGR	296
120	Chronogrammes illustrant la simulation du temps dans GibiDrome et dans le modèle jouet, ainsi que les améliorations envisagées	300
1	Diagramme d'état UML du comportement de la CLE dans GibiDrome	373
2	Diagramme d'état UML du comportement des associations d'irrigants dans Gibi- Drome	375
3	Diagramme d'état UML du comportement des irrigants dans GibiDrome	375
4	Diagramme de séquence UML du déroulement d'un cycle de simulation de Gibi- Drome (d'après [Barreteau <i>et al.</i> , 2003])	376
1	Role Model du groupe Basin	378
2	Role Model du groupe IrrigationNetwork	379
3	Role Model du groupe Crop	380
4	Role Model du groupe BasinManagement	381
5	Role Model du groupe IrrigationAssociation	382
6	Role Model du groupe Farm	383
7	Diagramme de séquence de la succession de rôles Manager	384
8	Diagramme de séquences organisationnel d'une journée sans crise en phase d'ir- rigation	386
9	Diagramme d'activité organisationnel : propagation des débits dans le modèle jouet	387

10	Diagramme d'activité organisationnel : propagation des demandes dans le modèle jouet	388
11	Diagramme d'activité organisationnel du bilan hydrique dans le modèle jouet . .	389
12	Diagramme d'activité organisationnel des processus physiques du modèle jouet .	389
13	Diagramme de séquence de la propagation des contraintes dans le système à l'ini- tialisation	390
14	Diagramme de séquence de l'utilisation des contraintes à l'initialisation de la phase d'irrigation	391
15	Classes utilisées pour la mise en œuvre des règles collectives d'irrigation	392
16	Diagramme de séquence des actions d'irrigation	393
17	Diagramme d'activité des mécanismes du passage en crise	394
18	Diagramme de séquence de l'utilisation des contraintes et les changements de rôle lors d'un passage en crise	395
19	Diagramme d'état du rôle ManagerIrri	395

Liste des tableaux

1	Outils de gestion relevés dans les études de cas Irri-Mieux	32
2	Organisations rencontrées dans les études de cas Irri-Mieux	32
3	Modèles multi-agents de gestion de l'eau	35
4	Différentes acceptions du terme « organisation »	47
5	Propriétés et caractéristiques des formalismes organisationnels cités	55
6	Approche AGR : bilan	63
7	Niveaux introduits par [Durand, 1996]	64
8	Formalisme de [Durand, 1996] : Bilan	65
9	MOCA : Bilan	67
10	Travaux de Odell et Parunak : Bilan	68
11	Travaux autour d'AGR : Bilan des éléments retenus	68
12	Niveaux d'organisation sociaux identifiés autour de la gestion de l'eau agricole dans la basse-vallée de la Drôme	81
13	Tours d'eau sur Crest-Nord	86
14	Réactions à la pluie selon le niveau de précipitation observées	90
15	Niveaux d'organisation de l'épizootie	128
16	Niveaux d'organisation du reviewing	129
17	Les stimuli des processus de l'épizootie	135
18	Les stimuli des processus du reviewing	135
19	Prise en charge et abandon des rôles de reviewing	136
20	Principales règles de comportement des agents de GibiDrome. Seules celles en gras sont véritablement implémentées sous forme de règles. Les autres sont impli- citemment incluses dans les comportements des agents	152
21	Niveaux d'organisation de la situation-jouet	157
22	Déclenchement des processus physiques du modèle jouet.	167
23	Prise en charge et abandon des rôles sociaux du modèle jouet	170
24	Les stimulations des processus sociaux hors phase d'irrigation du modèle jouet.	170
25	Les stimulations des processus de la phase d'irrigation	171
26	Contraintes du modèle jouet	172
27	Interprétation des contraintes du modèle jouet	175
28	Paramétrage des contraintes du modèle jouet	181
29	Niveaux d'organisation supplémentaires apparaissant dans GibiAGR	185
30	Description de la contrainte openPriority	188

31	Interprétation de la contrainte openPriority	188
32	Paramétrisation de la contrainte openPriority	188
33	Stimulations introduites par les nouveaux modes de lancement de l'irrigation . .	191
34	Description de la contrainte askWater	196
35	Interprétation de la contrainte askWater	196
36	Paramétrisation des contraintes askWater et flowLimitFixed	196
37	Prise en charge et abandon des rôles sociaux de GibiH	202
38	Pratiques culturelles implémentées dans les différents rôles	207
39	Paramètres indépendants des modèles : modes et niveaux d'application	211
40	Valeurs des paramètres pour chacun des modèles	213
41	Variables aléatoires des modèles. Voir l'annexe G pour la description des paramètres cités.	214
42	Valeurs des paramètres du scénario de référence	225
43	Description des tests de vérification	231
44	Espace des valeurs des paramètres des modèles	254
45	Description synthétique des tests de sensibilité	257
1	Calcul des restrictions pour l'irrigation collective dans GibiDrome	374
1	Contraintes du modèle jouet	396
1	Paramètres des modèles : espace de valeurs et description	404

Glossaire

- ADARII : Association Départementale des Agriculteurs en Réseau d'Irrigation Individuelle. Association regroupant les irrigants individuels dans la basse-vallée de la Drôme.
- AS : Association Syndicale Autorisée. Organisation de droit privé regroupant des propriétaires. Les réseaux d'irrigation sont souvent gérés par des ASA. L'abonnement au service d'irrigation géré par une ASA est attaché à la parcelle : quiconque achète une parcelle desservie par une borne d'irrigation de l'ASA est tenu de payer son abonnement et devient automatiquement membre de l'association. [Bouleau, 2001]
- CLE : Commission Locale de l'Eau. Assemblée constituée de représentants des collectivités locales, des usagers et de l'État et chargée de l'élaboration et du suivi d'un SAGE.
- CTE : Contrat Territorial d'Exploitation. Dispositif contractuel agro-environnemental créé en 1999 engageant sur 5 ans contre compensations financières un agriculteur à réformer son exploitation pour une meilleure maîtrise, économique et environnementale de sa production. Le dispositif CTE a été arrêté en 2002 (mais les contrats déjà signés sont maintenus).
- CUMA : Coopérative d'Utilisation de Matériel Agricole. Coopératives de service qui mettent à disposition de leurs sociétaires les moyens nécessaires à leurs exploitations. Le nombre maximum de sociétaires est limité par la capacité de travail des machines ou du personnel disponible. (source : <http://www.cuma.fr/>)
- CCVD : Communauté de Communes du Val de Drôme. Structure intercommunale porteuse du SAGE Drôme et des concertations avec les agriculteurs.
- DDAF : Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt. Service déconcentré du ministère de l'agriculture au niveau départemental. Chargée notamment de la police des eaux, de la programmation de crédits d'état
- DOE : Débit Objectif d'Étiage. Valeur de débit moyen mensuel fixée par le SDAGE, au dessus duquel il est considéré que l'ensemble des usages d'une rivière est possible. Le DOE doit être respecté à l'étiage.
- ETM : Évapotranspiration Maximale. L'ETM est la valeur maximale de l'évapotranspiration d'une culture donnée, à un stade végétatif dans des conditions climatiques données prise en compte par l'ETP
- ETP : Évapotranspiration Potentielle. L'ETP est définie comme « le taux d'évaporation d'une surface étendue de gazon, en croissance active, ayant une hauteur uniforme de 8 à 15 cm, couvrant complètement le sol, et ne souffrant pas de stress hydrique » .
- ETR : Évapotranspiration Réelle. C'est la quantité d'eau réellement perdue sous forme de vapeur d'eau par le couvert végétal. L'ETR traduit l'ensemble des interactions sol, plante, climat.
- FRAPNA : Fédération Rhône-Alpes de Protection de la Nature. Acteur principal de défense de l'Environnement dans la basse-Vallée de la Drôme.
- grn : Gestion des ressources naturelles.

n.o. : niveau d'organisation.

RFU : Réserve Facilement Utilisable. La notion de réserve facilement utilisable (RFU) correspond à la quantité d'eau du sol qu'une plante peut absorber sans difficulté. Quand la RFU est nulle, une plante flétrit. En moyenne, la RFU maximale d'un sol est égale à environ $\frac{2}{3}$ de sa RU maximale.

RSU : Réserve de Survie. La RSU est l'eau la plus difficilement accessible pour la plante. Une plante s'alimentant sur la RSU du sol subit un stress hydrique.

RU : Réserve Utile. La réserve Utile est la quantité d'eau stockée par le sol et absorbable par les plantes.

SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux. Dispositif réglementaire de concertation visant à fixer les objectifs et encadrer la mise en œuvre d'une gestion équilibrée de la ressource en eau à l'échelle d'un bassin versant.

SIG : Système d'Information Géographique. Outil informatique destiné à organiser, gérer, analyser, combiner, présenter des informations spatialement localisées.

SMA : Système Multi-Agent. Programme informatique fonctionnant comme une société d'entités informatiques autonomes (les agents) en interaction.

UML : Unified Modelling Language. Langage formel standard permettant de décrire des modèles orientés objet. UML est doté d'un support de notation graphique constitué de diagrammes permettant d'exprimer différentes vues sur un modèle.

Introduction générale

Le 13 mai 2003, les représentants de l'irrigation et les élus de la basse-vallée de la Drôme signaient un accord local négocié sur le partage de la ressource en eau. Cet accord marque l'aboutissement d'un travail de coordination autour de la construction de règles collectives de gestion visant à respecter le débit d'étiage imposé par le SAGE Drôme.

Des questions méthodologiques issues du terrain Le Cemagref a apporté un appui technique lors de la construction de cet accord sous la forme d'un outil de simulation appelé SimSage qui évalue l'impact sur le débit de la rivière et l'occurrence des restrictions des différents scénarios de règles proposés par les acteurs. SimSage modélise la demande en eau de manière agrégée : l'eau consommée est égale au besoin global estimé des cultures d'été irriguées dans la zone, et les restrictions issues des règles sont appliquées directement à cette consommation globale. L'outil répond bien à la commande de la structure animatrice du SAGE, mais il ne peut rendre compte ni des pratiques individuelles, ni d'une éventuelle hétérogénéité de l'impact des mesures de gestion. Les pratiques individuelles (choix de l'assolement, organisation de l'irrigation), qui sont considérées par les acteurs de l'agriculture comme faisant partie du domaine privé, restent alors absentes des discussions, et les zones d'ombre qui en découlent sont utilisées comme des marges de manœuvre qui nuisent à la transparence de la négociation.

Dans l'objectif d'ouvrir la discussion sur ces pratiques individuelles, un modèle exploratoire explicitant des hypothèses sur les comportements individuels a été développé. Ce modèle, appelé GibiDrome, se base sur une campagne d'enquêtes pour représenter la demande en eau non plus sur la base d'un besoin global des cultures, mais sur la base de pratiques identifiées par la campagne d'enquêtes. GibiDrome a été présenté aux acteurs en marge de la concertation. Durant cette présentation, les acteurs ont été amenés à expliciter certaines de leurs pratiques en réaction à l'exposé des hypothèses du modèle qu'ils jugeaient fausses ou imprécises. Même si dans le cas de la Drôme, les acteurs ne sont pas prêts à une remise en cause de leurs pratiques, cette expérience tend à confirmer l'intérêt d'amener dans une concertation des modèles où les niveaux individuels et collectifs sont mis en interaction. En effet, si les participants ont une bonne connaissance de leurs pratiques d'une part, et de processus globaux du système d'autre part, la mise en relation de ces différents niveaux apporte des éclairages originaux suscitant des questions susceptibles de dépasser des positions et des blocages établis.

Toutefois, entre le niveau global où sont définies les règles collectives du SAGE et les indicateurs de l'état de la rivière, et le niveau individuel où s'effectue la mise en œuvre de stratégies d'irrigation, **de nombreux autres niveaux impliquant des modes de gestion ou de coordination collectifs peuvent être identifiés** : les règles définies au niveau du bassin imposent des contraintes au niveau des réseaux d'irrigation collectifs ; pour respecter ces contraintes, les réseaux doivent eux-mêmes définir des règles collectives qui imposent des contraintes à respecter à leurs adhérents ; nombre de ces adhérents possèdent plusieurs types d'accès à l'eau dans leurs exploitations et doivent adapter leur irrigation en fonction des contraintes issues des différents

niveaux de gestion dont ils dépendent ; enfin, les périmètres d'isolation des cultures de semence, ou des ententes de voisinages par exemple induisent des niveaux de coordination de nature plus informelle.

La mise en perspective dans des modèles de ces différents niveaux qui se recouvrent parfois partiellement, et de leurs interactions pourrait amener à mettre en évidence l'existence de niveaux de coordination sous-jacents. Elle permettrait de plus d'amener les acteurs à dévoiler leurs comportements dans les différentes arènes que constituent ces niveaux. Elle pourrait enfin aider des acteurs porteurs d'enjeux et de points de vues de nature différente à s'entendre sur des représentations communes de leur système. Une question d'ordre méthodologique s'ouvre alors et constitue la source de la problématique de cette thèse : **comment prendre en compte et représenter les différents niveaux d'organisation impliqués dans la gestion d'une ressource et leurs interactions ?**

Un enjeu sociétal fort L'émergence et la légitimation institutionnelle d'approches concertées et territorialisées de la gestion de ressources naturelles renvoie de plus en plus fréquemment les gestionnaires et les usagers face à des objets complexes dans des dispositifs complexes : des acteurs porteurs d'enjeux de nature différente situés parfois à des échelles différentes doivent construire un processus leur permettant de s'entendre sur des objectifs communs et des modalités collectives de gestion permettant d'atteindre ces objectifs. L'enjeu sociétal d'une recherche permettant d'améliorer ou tout du moins d'accompagner la décision collective dans les dispositifs de concertation est donc fort.

Ainsi, le programme « Concertation, Décision, Environnement » (CDE) du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable finance depuis 1999 des projets de recherche et des colloques consacrés à « *encourager, mieux structurer et coordonner des recherches (...) portant sur les nouveaux dispositifs et nouvelles pratiques de concertation, de consultation, de participation et de décision en matière d'environnement* ». Au-delà de la ressource eau, les projets du programme CDE touchent à des domaines aussi divers que la gestion des déchets, la préservation de la biodiversité, la gestion des parcs nationaux, la pollution atmosphérique ou la concertation autour d'aménagements publics. Le plus souvent, l'objet de ces projets est le dispositif de concertation lui-même, et ce sont donc les sciences humaines qui sont tout particulièrement mobilisées : analyses du rôle des parties prenantes dans les concertations dans différents dispositifs ; analyses sociologiques, psychosociologiques (modalités de la justification et de la constitution de consensus), ou linguistiques ; analyses comparées de concertations, analyses centrées sur une catégorie de parties prenantes, analyses de dispositifs dans une dimension historique, analyses de la mise en œuvre concrète des mesures issues des dispositifs...

Dans une perspective complémentaire, d'autres projets s'intéressent à l'introduction d'objets scientifiques ou technologiques dans la concertation. On parle alors d'objets intermédiaires, permettant de favoriser la communication des parties prenantes, et d'augmenter la connaissance collective en recueillant, apportant ou mettant en perspective des connaissances, formalisant des échanges ou créant des supports concrets pour mettre à plat les représentations : bases de données, systèmes experts, sites Internet ou systèmes d'information géographique...

C'est dans cette perspective que le Cemagref a conduit un projet CDE intitulé « *Modèles et jeux de rôles pour l'aide à la négociation dans les processus de gestion de ressources renouvelables* ». Les interventions sur la Drôme décrites plus haut ainsi que cette thèse s'insèrent dans ce projet. Celui-ci s'appuie sur le cas de la Drôme dans l'objectif de définir des conditions et des contraintes d'une intervention de la recherche par la modélisation dans un processus de concertation, et de constituer une méthode générique pour créer des outils ad hoc - modèles et jeux - spécifiques

à chaque application de gestion locale concertée. Le développement d'une réflexion méthodologique sur la prise en compte de niveaux d'organisation dans des modèles poursuit cet objectif de généralité dans une perspective de favoriser la souplesse et l'adaptabilité des outils.

Outils et méthodes : les Systèmes Multi-Agents Dans le contexte d'un projet plus général étudiant le développement et l'insertion de modèles d'appui à la décision collective dans un processus de concertation, la thèse s'intéresse plus particulièrement aux méthodes et supports de modélisation dans un objectif de favoriser la mise en perspective de la complexité des systèmes et l'adaptabilité des modèles. Les Systèmes Multi-Agents (SMA) constituent le support de modélisation utilisé pour l'ensemble des modèles du projet.

Les SMA sont des ensembles d'entités informatiques autonomes en interaction entre elles et avec leur environnement, ayant des représentations du monde qui les entoure, et des objectifs qui leur sont propres. Ces entités informatiques sont appelées « agents ». Le recours aux SMA pour construire un modèle du système à considérer dans une concertation permet d'effectuer des analogies immédiates : les acteurs (individuels ou collectifs) du système peuvent être représentés par des agents, la ressource et les objets manipulés par ces acteurs peuvent être représentés dans un environnement spatial. Les stratégies des acteurs et les dynamiques naturelles sont codées dans les agents et objets du modèle et simulées dans le temps. Les simulations permettent alors d'observer l'évolution du système résultant des interactions entre ses composantes. Il devient également facile de faire évoluer des hypothèses de modélisation à la demande des acteurs en allant modifier les comportements des agents ou objets concernés. Leur capacité à représenter des comportements hétérogènes et des interactions et leur adaptabilité fait des SMA des supports de modélisation adaptés à des objectifs de facilitation de la décision collective : il est possible d'y intégrer les différents points de vue des acteurs et de les faire évoluer au fur et à mesure de l'évolution des enjeux de la concertation.

Objectifs de la thèse Il est maintenant possible de décliner dans le contexte des SMA la question d'ordre général posée plus haut : comment prendre en compte et représenter les différents niveaux d'organisation impliqués dans la gestion d'une ressource et leurs interactions ?

Les SMA sont suffisamment souples pour intégrer différents niveaux d'organisation dans un modèle. C'est d'ailleurs le cas dans GibiDrome, où les agriculteurs sont représentés par un type d'agent, les associations d'irrigation par un second type d'agent, et l'autorité de bassin par un dernier type d'agent. Cependant l'unité de description et la brique de modélisation restent l'agent. Or, les niveaux d'organisation, qui représentent des points de vue cohérents sur des ensembles d'interactions entre agents constituent bien des unités de description orthogonales aux agents.

En adoptant une approche où l'on peut s'abstraire des individus pour décrire spécifiquement l'organisation du système, il devient possible de faire de ces niveaux d'organisation des briques de modélisation complémentaires aux agents. En disposant de ce nouveau type de brique, on accroît l'expressivité et la modularité des modèles.

La prise en compte des différents niveaux d'organisation d'un système dans des modèles destinés à accompagner la prise de décision collective pose des questions qui dépassent le simple cadre du processus de modélisation : quels sont les niveaux d'organisation et les processus qui sont pertinents pour la concertation ou comment utiliser le modèle et rendre compte de son fonctionnement ? Ce type de question se pose en général pour tout acte d'intervention par la modélisation et fait l'objet de travaux spécifiques.

La thèse choisit de se focaliser sur une amélioration des qualités d'explicitation et d'adaptabilité de l'outil de simulation en se concentrant sur le développement d'un support de modélisation mieux adapté à la prise en compte de la structuration en niveaux d'organisation. L'objectif est donc de développer une approche favorisant l'étude conjointe des questions relatives à l'articulation entre différentes échelles pour les processus hydrauliques (de la parcelle au bassin versant) et entre niveaux d'organisation (individuel et collectifs).

Finalement, la thèse se propose

- de construire un support de modélisation où les entités du système, mais aussi leurs structures d'interaction et les niveaux d'organisation dans lesquelles elles sont impliquées puissent devenir des unités de description du modèle et donc des briques manipulables et réutilisables.
- à travers le développement de modèles basés sur le cas de la Drôme de proposer une méthodologie de modélisation basée sur l'analyse des niveaux d'organisation et donc d'utilisation d'un tel support

Organisation du document Le schéma 1 propose une lecture synthétique de l'organisation du document. Il souligne comment les enjeux, les développements et les résultats de la thèse se déclinent à travers des questions thématiques d'ordre général, des questions techniques d'ordre informatique, et sur l'application au cas de la gestion des étiages dans la Drôme.

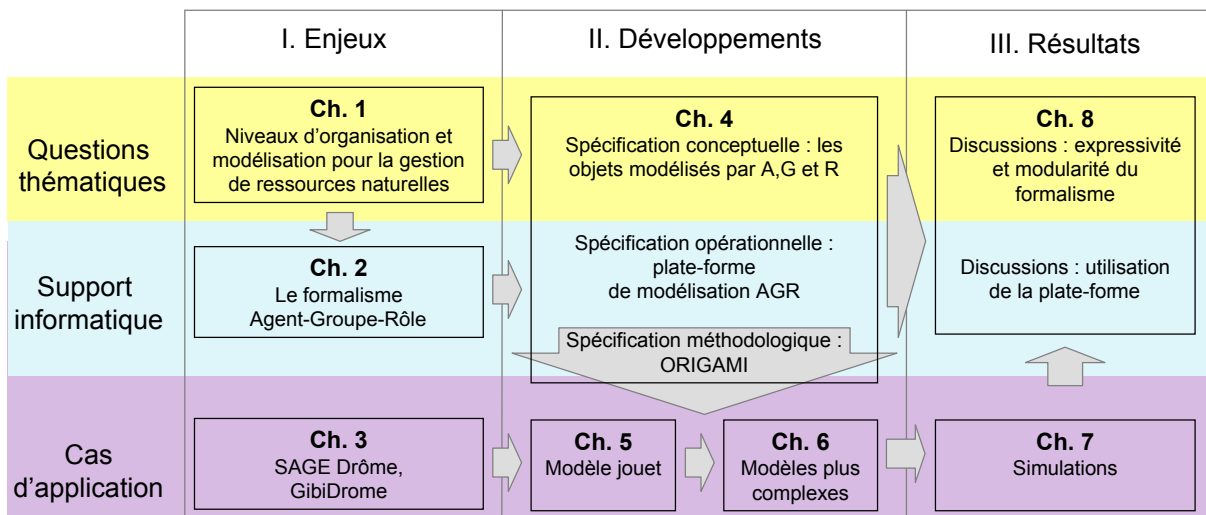


FIG. 1 – Organisation du document

La première partie du document traite donc de la construction des enjeux de la thèse dans les champs thématiques, informatiques et applicatifs.

Le chapitre 1 est consacré aux questions thématiques. Il soulève les questions concernant la prise en compte de niveaux d'organisation multiples à la fois du point de vue de l'objet, la gestion quantitative de l'eau agricole, et de l'outil, la modélisation multi-agent pour la gestion de ressources. Ce premier chapitre aboutit à la définition de la question de thèse et d'un cahier des charges d'une approche de modélisation susceptible d'apporter des réponses à la question de la thèse.

Le chapitre 2 aborde les questions informatiques de la thèse. Il répond au chapitre 1 par le choix d'un formalisme multi-agent satisfaisant les contraintes du cahier des charges. Ce formalisme

multi-agent basé sur des concepts de groupes et de rôles et nommé Agent-Groupe-Rôle (AGR) a été choisi comme base du support de modélisation. Le chapitre débouche sur une déclinaison de la question de thèse autour de l'adaptation de ce choix informatique à la modélisation pour la gestion de ressources naturelles, et de l'eau en particulier.

Le chapitre 3 s'intéresse au cadre d'application de la thèse : la mise en œuvre de règles collectives de gestion de l'eau visant à satisfaire les objectifs du SAGE Drôme. Les différents acteurs et niveaux d'organisation du système, ainsi que les limites des outils qui ont été utilisés dans le cadre des concertations autour de la gestion quantitative de l'eau dans le SAGE Drôme sont présentés. Le chapitre débouche sur la définition de la démarche de la thèse.

La seconde partie du document est consacrée aux développements effectués durant la thèse : spécification conceptuelle, opérationnelle et méthodologique du formalisme AGR pour des applications de modélisation et construction de modèles pour tester cette approche.

Le chapitre 4 expose ces spécifications. Sur un plan conceptuel, il décrit comment les concepts d'Agent, de Groupe et de Rôle permettent d'appréhender les objets émergeant du questionnement thématique. Sur un plan opérationnel, il décrit comment le formalisme AGR est implémenté. Enfin, il définit une méthodologie nommée ORIGAMI qui permet de guider la construction d'un modèle AGR.

Le chapitre 5 présente de manière détaillée, à travers le déroulement de la méthode ORIGAMI, la construction d'un modèle-jouet inspiré du modèle GibiDrome. Ce premier travail de modélisation a pour objet d'éprouver les concepts, l'implémentation et la méthodologie développés autour d'AGR.

Enfin, le chapitre 6 décrit l'extension du modèle-jouet à des modèles plus complexes. Le premier modèle reproduit la situation de GibiDrome, et le second diversifie les comportements des entités. Ces modèles permettront de mettre à l'épreuve la plasticité et la modularité du formalisme, et de vérifier qu'il n'introduit pas de biais de simulation.

La troisième et dernière partie du document est consacrée à l'évaluation des développements effectués dans la thèse.

Le chapitre 7 a pour objet d'examiner les enseignements que l'on peut tirer des modèles construits en effectuant des tests de vérification et une analyse de sensibilité. La mise en œuvre de ces tests n'a pas tant pour objectif de valider les modèles que de (1) tester la faisabilité de l'approche AGR sur le cycle complet de modélisation (2) vérifier si l'utilisation du formalisme AGR introduit des biais ou a un impact sur la sensibilité des modèles.

Enfin, le chapitre 8 s'appuie sur le travail de construction des modèles de la Drôme, ainsi que sur la mise en œuvre de la campagne de simulation pour dresser un bilan des développements de la thèse. Il statue sur la faculté de la méthodologie ORIGAMI à faciliter la description d'un système en termes de niveaux d'organisation. Il revient sur la faculté du formalisme à expliciter les niveaux d'organisation d'un système, et surtout la participation d'une entité à ces différents niveaux d'organisation et les interactions qui en découlent. Il montre comment le recours à AGR améliore la souplesse des modèles en générant des briques de description d'un nouveau type. Enfin, le chapitre discute de la faisabilité opérationnelle de la modélisation AGR.

Première partie

Pour une représentation des niveaux d'organisation : les enjeux de la thèse

On peut regarder une pièce d'un puzzle pendant trois jours et croire tout savoir de sa configuration et de sa couleur sans avoir le moins du monde avancé : seule compte la possibilité de relier cette pièce à d'autres pièces

Georges Perec, La vie mode d'emploi

Chapitre 1

Contexte : niveaux d'organisation et gestion de l'eau

CONTENU DU CHAPITRE

La thèse propose une réflexion méthodologique sur une manière d'appréhender dans un système multi-agent les niveaux d'organisations multiples qui apparaissent autour de la gestion de ressources renouvelables.

Ce premier chapitre a pour objet de resituer cette réflexion à l'interface de la gestion de l'environnement et de l'informatique en présentant les contextes applicatifs et méthodologiques, puis en explicitant comment la représentation de niveaux d'organisation multiples est apparue comme une question émergeant à la fois de l'objet, la gestion quantitative de l'eau agricole, et de l'outil, la modélisation multi-agent.

Ainsi, la première partie expose, d'une part, comment la construction et l'usage de modèles peuvent venir en appui à la gestion de ressources renouvelables, d'autre part quels bénéfices il y a à utiliser des modèles multi-agents, et quelles sont les caractéristiques de ce type de modèles.

La seconde partie se recentre sur la gestion quantitative de l'eau dans des bassins irrigués et présente comment la diversité des situations rencontrées conduit à identifier des unités d'analyse d'ordre individuel (acteurs et objets) mais aussi d'ordre organisationnel (organisations, modes de gestion, processus physiques). Une revue de modèles multi-agents existants conduit à penser que les approches de modélisation multi-agent ne présentent pas de méthodes génériques pour intégrer et croiser abstractions individuelles et abstractions organisationnelles dans des modèles.

Dans une troisième partie, le terme de « niveau d'organisation » est introduit pour désigner une abstraction organisationnelle pouvant être décrite indépendamment des propriétés individuelles des composants du système. La thèse proposera d'adopter un formalisme multi-agent adapté à la représentation des niveaux d'organisation d'un système.

Sommaire

1	Contexte méthodologique et applicatif	14
1.1	La modélisation comme support pour la gestion des ressources renouvelables	14
1.1.1	Des procédures de gestion plus complexes	14
1.1.2	Des outils pour porter appui à la gestion concertée	17
1.1.3	Des modèles pour expliquer les processus et accompagner la concertation	19
1.2	La modélisation multi-agent	20
1.2.1	Modèles multi-agents pour la gestion de ressources	21
1.2.2	Propriétés des SMA en temps que support de modélisation	23
1.2.3	Questions soulevées par la modélisation multi-agent	26
2	Construction d'une réflexion autour de la gestion quantitative de l'eau dans des bassins irrigués	27
2.1	La gestion quantitative de l'eau dans des bassins irrigués	27
2.1.1	Irrigation et gestion concertée de l'eau en France	27
2.1.2	Caractéristiques des systèmes irrigués	29
2.1.3	Acteurs de la gestion de l'eau agricole	30
2.1.4	Instruments de gestion de l'eau agricole	30
2.2	Quel niveau de complexité représenter ?	31
2.3	Comment représenter les modes de gestion ?	33
3	Un questionnement méthodologique autour du concept de niveau d'organisation	37
3.1	Le concept de niveau d'organisation	37
3.1.1	Niveau d'organisation et concepts associés dans la littérature scientifique	37
3.1.2	Définition ad hoc du concept de niveau d'organisation	38
3.2	Mise en place d'une réflexion méthodologique	39

1 Contexte méthodologique et applicatif

1.1 La modélisation comme support pour la gestion des ressources renouvelables

On parle de ressource naturelle renouvelable pour désigner des ressources naturelles dont le stock disponible évolue en fonction des prélèvements dus à l'activité humaine mais aussi selon un processus de régénération naturelle (eau, végétation, espèces animales). D'une manière générale, une gestion « efficace » d'une ressource vise à la préservation durable, en qualité et quantité, de la ressource, ainsi que des usages qui en sont faits. Bien plus qu'un équilibre entre offre et demande, la problématique de gestion d'une ressource renouvelable implique d'appréhender un système dont les éléments, naturels et sociaux, sont liés par des interdépendances complexes.

1.1.1 Des procédures de gestion plus complexes

Les pouvoirs publics reconnaissent aujourd'hui de manière officielle que la gestion de l'environnement ne peut se limiter à la résolution des effets visibles des problèmes et relève aussi

des domaines économiques et sociaux. [Heathcote, 1998] souligne que la maîtrise collective de l'eau induit des formes de coordination, de régulation et de contrôle mises en œuvre à différentes échelles de temps, d'espace et d'organisation, alors que les gestionnaires sont amenés à recourir aux points de vue de disciplines et d'acteurs multiples. C'est ainsi que le champ des éléments à prendre en compte dans une action de gestion de ressources naturelles (grn) s'est considérablement élargi au cours des 30 dernières années :

- dans sa **dimension spatiale** : les zones à prendre en compte ne sont pas localisées sur le problème à traiter mais relèvent d'**unités de gestion « naturelles »** (bassins versants, territoires naturels).
La gestion d'une ressource se décline le plus souvent au sein de **plusieurs échelles spatiales imbriquées ou enchevêtrées** : périmètres irrigués, nappes souterraines, circonscriptions administratives, bassin par exemple pour la ressource eau ;
- dans sa **dimension disciplinaire** : les problèmes ne peuvent être circonscrits à et doivent être abordés avec une vision intégrée. On peut évoquer par exemple :
 - les **différents usages** d'une ressource (eau potable, irrigation, tourisme par exemple pour la ressource eau) ;
 - les **différents types de problèmes** posés par la ressource (étiages, inondation, qualité, érosion des berges par exemple pour la ressource eau) ;
 - les **différents types d'acteurs et d'organisations** impliqués : acteurs économiques, riverains, décideurs...
- dans sa **dimension politique** : la tendance des politiques nationales vis à vis des problèmes environnementaux est d'abandonner des modes de gestion centralisés pour aller vers des **modes de gestion participatifs**, qui impliquent une palette plus large d'acteurs et d'organisations, sur des phases plus élargies des processus de gestion.

Ainsi, la Directive Cadre Européenne sur l'Eau de 2000 impose aux États membres de mettre en place des plans de gestion intégrée sur l'ensemble de leurs bassins dans un horizon de 15 ans : « *Chaque État membre veille à ce que, pour chaque district hydrographique (...) : - une analyse de ses caractéristiques, - une étude des incidences de l'activité humaine sur l'état des eaux de surface et des eaux souterraines, et - une analyse économique de l'utilisation de l'eau soient entreprises* (article 5) ; *Les États membres encouragent la participation active de toutes les parties concernées à la mise en œuvre de la présente directive, notamment à la production, à la révision et à la mise à jour des plans de gestion de district hydrographique* » (article 14)

Définitions

La **participation** désigne toute forme d'implication dans le processus de gestion d'un système donné d'acteurs n'appartenant pas au dispositif formel de prise de décision. [Allain, 2001].

Les individus ou les organisations ayant un intérêt dans le processus de gestion ou pour qui celui-ci représente un enjeu sont souvent désignés sous le terme « parties prenantes » (stakeholders). Pour simplifier, on les désignera par le terme d'**acteurs**, alors que les membres de la société au sens large sont désignés par le terme de **public**.

En France, la **gestion concertée** est définie par [van den Hove, 2001] comme « *la mise en place d'un partenariat d'acteurs sur une zone spécifique pour élaborer et négocier des mesures de gestion* »

Les dispositifs de participation sont mis en place sous des formes très diverses. On peut les distinguer par exemple :

- selon le **degré d'implication** des acteurs : consultation (simple recueil de points de vue), négociation (participation au choix d'options de gestion), co-construction (participation à la définition des options de gestion) [Arnstein, 1969] ;
- selon les **étapes du processus de gestion** où se produit l'implication des acteurs : définition et mobilisation des parties prenantes, définition d'une situation initiale, définition d'objectifs à long, moyen et court termes, choix de modalités de gestion, suivi, évaluation.

La **médiation patrimoniale** (co-construction d'options de gestion sur la base d'une définition concertée de la situation initiale du système ainsi que d'objectifs de très long terme)[Babin and Bertrand, 1998] constitue un exemple de dispositif de gestion participative formalisé et documenté.

La mise en place d'un dispositif de participation, qui implique des procédures longues et complexes, est motivée par les bénéfices qu'on peut en attendre [van den Hove, 2001] :

- d'un point de vue substantif : meilleurs résultats en termes d'efficacité de la gestion ;
- d'un point de vue procédural : amélioration du processus lui-même : augmentation du niveau d'information, meilleur traitement de l'information, légitimation accrue ;
- d'un point de vue contextuel : éducation, changement des perceptions, modification des rapports de force.

Un besoin en outils d'appui La mise en œuvre d'une procédure de gestion participative passe par le déploiement d'une combinaison de mesures s'appliquant à des échelles d'intervention variées, dans le temps et dans l'espace. Dans l'optique d'une meilleure efficacité et d'une meilleure acceptation de ces mesures, il existe un besoin vis à vis d'outils permettant de synthétiser les connaissances des acteurs et des experts sur les processus, physiques et sociaux, des systèmes, ainsi que d'intégrer les différents types de mesures envisagées. De tels outils manquent pour éclairer les débats et simuler des scénarios de gestion [Garin et al., 2000].

Le programme CDE (Concertation, Décision, Environnement)¹ du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, comme le projet européen FIRMA (Freshwater Integrated Resource Management with Agents)² témoignent de l'intérêt accru des pouvoirs publics pour une recherche permettant d'aborder les problèmes complexes liés à la prise en compte d'aspects physiques et sociaux, ainsi que d'échelles multiples, dans les procédures de gestion concertée.

Le programme CDE a été lancé en 1999 et doit se conclure par un colloque final en septembre 2005. Il a pour objectif « *d'encourager des recherches portant sur les nouveaux dispositifs et les nouvelles pratiques de concertation, de médiation, de consultation, de participation, de décision, (...) en matière d'environnement* », à travers le financement de projets de recherche et l'organisation de séminaires. Si la plupart des projets de recherche CDE portent sur l'étude des processus de concertation, certains s'intéressent à l'introduction d'objets scientifiques ou technologiques dans la concertation : bases de données, systèmes experts, sites Internet ou systèmes d'information géographiques... Le financement de cette thèse provient en partie d'un projet CDE conduit par le Cemagref et intitulé « *Modèles et jeux de rôles pour l'aide à la négociation dans les processus de gestion de ressources renouvelables* ».

La projet FIRMA (1999-2003) est centré sur la ressource en eau et l'usage de modèles multi-agents. Il promeut l'évaluation intégrée, soit « *la mise en place de processus inter ou pluri-disciplinaires de structuration d'éléments de connaissance issus de disciplines variées de manière à présenter, pour la prise de décision, les aspects pertinents du problème social dans*

¹<http://www.inra.fr/Internet/Directions/SED/environnement/pr-cde.html>

²<http://firma.cfpm.org>

leur cohérence mutuelle » [Krywkow, 2003].

La volonté d'accéder à une gestion durable des ressources naturelles renouvelables, et de l'eau en particulier, a mené à un consensus sur la promotion d'**approches territorialisées et concertées** de gestion de la ressource.

Or la gestion concertée de ressources naturelles, et de l'eau en particulier, porte une double complexité :

- **complexité du système** à appréhender : interconnexion de dynamiques physiques et de dynamiques sociales [van Daalen et al., 2002], interactions portées par l'espace [Izquierdo et al., 2003], échelles spatiales et temporelles multiples et plus étendues [Simonovic, 2000] ;
- **complexité des procédures** : les acteurs et objectifs à prendre en compte sont multiples [Simonovic, 2000] ; les unités de gestion « naturelles » bouleversent les modes d'organisation administratifs traditionnels [Ghiotti, 2001] ; enfin, seules des règles de gestion négociées, adaptatives et compatibles avec les institutions et règles de fait locales peuvent acquérir un caractère durable [Ostrom, 1992].

Face à cette double complexité, la communauté scientifique est appelée à répondre à un besoin en outils d'appui à la gestion qui soient à même d'intégrer la diversité des points de vue et des échelles de gestion et de rendre plus lisibles les interactions physiques et sociales existant au sein et entre les différents niveaux d'un système.

1.1.2 Des outils pour porter appui à la gestion concertée

Face à la double complexité de la gestion concertée, [Collentine et al., 2002] distinguent deux catégories d'outils : des outils visant à **assister directement le processus de concertation** d'une part, et des outils visant à **offrir des représentations du système à gérer** d'autre part. Ces différents outils ne s'excluent pas les uns les autres et peuvent être complémentaires, utilisés conjointement ou successivement dans les différentes phases de la participation.

La première catégorie inclut des outils informatiques visant à **structurer les argumentations** [Karacapilidis and Papadias, 2001], ou des **interfaces de discussions** via Internet [Hare et al., 2001]. On peut aussi y ranger les nombreuses **méthodes de participation formalisées**. Ces méthodes diffèrent suivant la phase de la participation qu'elles formalisent, le niveau de décision, et l'audience visée. [van den Hove, 2001] en liste une vingtaine, parmi lesquelles les focus group (débat de citoyens organisé autour d'un médiateur scientifique sur un problème précis), les ateliers multi-acteurs (mêlant acteurs, décideurs et expert pour délibérer sur une question précise afin de faire émerger des solutions et des points de vue), les exercices de simulation de politiques (jeux de rôles où l'on met des acteurs en situation pour les faire réagir à des scénarios possibles).

Ces différents outils visent à faciliter et focaliser les discussions, mais aussi à faire émerger et organiser des informations afin de faire accéder l'ensemble des acteurs impliqués à une représentation partagée du système (de ses mécanismes présents comme d'objectifs ou de projections dans le futur).

Les outils tels que matrices de préférences [Collentine et al., 2002], programmation graphique [Costanza and Ruth, 1998], réseaux bayesiens [Lynam et al., 2002], ou certains jeux de rôles [Bousquet et al., 2002], visant à **éliciter les représentations des acteurs** se situent entre les

2 catégories. En effet ces outils permettent de structurer les discussions, tout en fournissant en sortie une image co-construite du système.

La seconde catégorie d'outils concerne les **modèles**. Les modèles fournissent aux acteurs une représentation objectivée du système sur un support. Ces modèles peuvent alors servir de base de discussion. Ils peuvent être des **outils cartographiques** [Caquard, 2001] par exemple. Nous nous intéressons plus particulièrement aux **modèles de simulation**, c'est à dire des représentations informatiques pouvant évoluer dans le temps.

Comme il a été évoqué avec les méthodes d'élicitation de représentation, les frontières entre les 2 catégories ne sont pas hermétiques, et le processus de construction d'un modèle, s'il implique les acteurs, tend à faire de la modélisation un outil tenant aussi de la première catégorie.

Définitions

Les mots « modèle » et « représentation » sont fortement polysémiques et sont parfois synonymes.

Le terme **modèle** peut être pris dans un sens « ante » : un objet à imiter, une matrice, ou dans un sens « post » : un objet reproduisant une portion de réalité (une représentation!!).

Dans tous les cas, le modèle est un outil qui sert à fabriquer ou à apprendre quelque-chose. [Legay, 1997]

Le terme **représentation** peut être pris dans un sens « cognitif » : représentation (du monde, d'un système) que se font des êtres vivants (on peut d'ailleurs parler de modèle mental), ou dans un sens « tangible » : représentation (du monde, d'un système) produite pour mettre en forme des connaissances (dessin, carte, modèle...).

A moins de mention explicite, nous utiliserons le mot modèle dans son sens « post », et le mot représentation dans son sens « cognitif ».

Les **modèles de simulation** - que l'on appellera désormais simplement modèles - sont des représentations simplifiées de systèmes évoluant dans le temps.

Enfin, les différentes étapes d'un processus de modélisation informatique produisent différents types de modèles. On reprendra les termes utilisés par [Vanbergue, 2003] :

- un **modèle du domaine** définit données, comportements et hypothèses retenus dans le système cible. Il est souvent décrit en langage naturel ;
- un **modèle de conception** est une version formalisée du modèle du domaine, où les contraintes créées par l'outil de modélisation sont intégrées. Un modèle de conception constitue une version « papier » communicable du modèle opérationnel ;
- un **modèle opérationnel** est le modèle informatique à proprement parler, implémenté dans la machine et qui est la base à partir de laquelle se font les simulations.

Simulations pour la grn Les modèles de simulation, qui représentent l'évolution de l'état d'un système dans le temps, peuvent être utilisés à des fins de prédiction : en partant de l'état actuel du système, et en faisant des hypothèses sur ses dynamiques d'évolution, une simulation permet de décrire les états futurs du système pour différents scénarios.

Mais dans le champ de la gestion des ressources naturelles, les systèmes considérés sont imprédictibles pour au moins 3 raisons :

- de par leur nature complexe : les dynamiques de tels systèmes émergent d'interactions localisées, interdépendantes, et réparties sur différentes échelles. Elles présentent des caractères forts de non-linéarité et de dépendance à l'histoire du système [Levin, 1998] ;
- de par la prise en compte du champ social et donc de la présence de comportements humains - qui ne peuvent par essence être prédits - dans les systèmes [Pahl-Wostl, 2002] ;

- de par la nature des comportements individuels modélisés, forcément simplifiés et basés sur des données incomplètes [Warwick, 2003].

[Carpenter *et al.*, 1999] reconnaît cependant la pertinence de modèles de type prédictif dans le champ de la grn, mais spécifiques à l’accompagnement d’un type de tâche précise (calibration d’ouvrage, estimation de paramètres statistiques). De tels modèles viennent donc apporter des informations complémentaires une fois que les règles de gestion sont reconnues et établies.

Dans le cas général, les modèles pour la grn ne peuvent prédire des futurs probables du système. Mais ils peuvent en expliciter des rouages, aider à l’identification de futurs possibles [Warwick, 2003]. On parle alors de **modèles explicatifs**.

1.1.3 Des modèles pour expliquer les processus et accompagner la concertation

On s’intéressera exclusivement aux modèles explicatifs, dont le but est, plutôt que de prédire l’état futur d’un système, d’en éclairer les fonctionnements présents. [Carpenter *et al.*, 1999] parle de modèles métaphoriques, [Doran, 2001] parle de « soft benefits » de la modélisation : mise en exergue d’un défaut de connaissance, apport pédagogique, médium de communication et de centrage de la réflexion. [van Daalen *et al.*, 2002] par exemple décrivent comment des modèles globaux très simplifiés présentés dans des grandes conférences ont permis de faire admettre au grand public la représentation du monde comme un système global et de sensibiliser les décideurs à l’urgence de certains problèmes environnementaux.

Les travaux rentrant dans ce cadre restent sont de nature assez différente suivant :

- l’usage du modèle : recherche (modèle d’un système destiné aux chercheurs), diagnostic (modèle d’un système destiné aux commanditaires d’un projet sur le système), intervention (modèle de Recherche-Action, destiné aux parties prenantes du système) ;
- l’objectif du modèle : comprendre les processus d’un système, rassembler des connaissances, explorer des scénarios, agir sur les perceptions des acteurs... ;
- le réalisme du modèle : réalité simplifiée ou abstraction
- le contenu du modèle : issu des représentations des acteurs ou des connaissances scientifiques
- le processus de modélisation lui-même : modèle produit par les chercheurs ou co-construit avec les acteurs.

Des modèles interdisciplinaires La modélisation des systèmes engendrés par la gestion des ressources naturelles ne peut se réduire à une approche purement écologique, ou hydrologique (dynamique d’une ressource soumise à des perturbations anthropiques) ou purement économique ou sociologique (dynamique d’un marché ou d’une société soumis à une variabilité naturelle). [Bousquet, 2001] plaide pour une posture qui se doit d’aborder à la fois :

- la ressource : écologie ou hydrologie - comment est générée la dynamique de la ressource, quelle(s) échelle(s) considérer ?
- l’interaction société - ressource : économie de l’environnement - quelle consommation, quels modes de gestion, quelles institutions ?
- la société : sociologie, sciences politiques, sciences cognitives - quels processus de décision, quels modes de coordination ?

Des modèles disciplinaires apportent des connaissances partielles sur un système observé selon un certain point de vue et à une certaine échelle. Ils permettent d’aborder de manière précise un aspect bien délimité d’un problème de gestion de ressources, mais seule une approche permettant d’intégrer différents points de vue et différentes échelles pourra apporter un éclairage sur le fonctionnement du système dans son ensemble.

Le **couplage** de modèles, qui consiste à relier des modèles existants en connectant les flots de données entrantes et sortantes, est un premier moyen d'intégrer des points de vue. Cependant il est souvent techniquement complexe de faire communiquer des modèles : il faut rendre les formats de données compatibles, et surtout ajuster les échelles de temps et/ou d'espace (échantillonnages ou intégrations numériques). De plus le nombre forcément réduit de canaux de communication entre les modèles limite l'explicitation des interactions entre les sous-systèmes. On citera [Fianyo *et al.*, 1998] qui proposent d'identifier les objets communs de modèles indépendants, puis d'utiliser les systèmes multi-agents pour associer ces objets, chaque agent ayant la responsabilité de gérer les horloges des objets qui lui sont associés dans chacun des modèles.

Un important courant de modélisation intégrée pour la gestion de l'environnement utilise la **théorie des systèmes** en décomposant les éco-sociosystèmes en compartiments échangeant des flux d'information et d'énergie entre eux et avec l'extérieur [Low *et al.*, 1999]. Ces approches utilisent un formalisme inspiré de la thermodynamique qui permet de définir des propriétés dynamiques globales des systèmes comme la résilience, qui caractérise la faculté d'un système complexe soumis à une perturbation à retrouver un état stable [Carpenter *et al.*, 1999, Levin, 1998].

Dans les sciences agronomiques, l'utilisation de la théorie des systèmes a inspiré l'approche dite des **modèles d'action** [Sebillote and Soler, 1990]. Les modèles d'action s'intéressent au processus de décision d'un acteur à travers les flux d'énergie et de matière qu'il dirige dans le système qu'il habite. La construction d'un modèle d'action consiste à définir des cycles de décision à l'aide de séries d'indicateurs, de règles et d'évaluations sur les flux du système [Attonaty and Leroy, 1997, Labbé *et al.*, 2000]. La limite de telles approches, consacrées à l'aide à la décision individuelle, se trouve cette fois-ci dans le centrage sur l'acteur décideur qui ne permet pas d'aborder le cadre collectif de certaines règles de décision [Barreteau, 1998].

Les **systèmes multi-agents**, à travers une approche véritablement distribuée, centrée sur la modélisation des interactions entre les différents éléments d'un système, permettent d'intégrer au sein d'un même modèle différentes échelles spatiales ou temporelles, ainsi que des points de vue disciplinaires variés.

Le développement d'un modèle d'un système est un moyen de **rassembler, décortiquer, formaliser, communiquer** des connaissances ou des hypothèses sur ce système. Mené de concert avec les acteurs du système, le processus de modélisation peut devenir un support à la concertation.

On s'intéresse aux **systèmes multi-agents (SMA)**. Les SMA constituent un support de modélisation adapté à des objectifs de simulation exploratoire en appui à la grn [Bousquet and Le Page, 2004, Doran, 2001] : intégrer acteurs, processus et échelles et mettre en scène aisément des hypothèses de travail issues de différentes disciplines, souvent sous la forme de règles de comportement.

1.2 La modélisation multi-agent

Les Systèmes Multi-Agents (SMA) sont des applications informatiques où des entités *autonomes*, les *agents*, évoluent dans un *environnement*. Cet environnement est constitué des objets et ressources accessibles aux entités et peut prendre la forme d'une grille spatiale. Les agents perçoivent leur environnement et les autres agents, et s'en construisent des représentations plus

ou moins évoluées. Utilisant des capacités de raisonnement elles aussi plus ou moins évoluées, ils s'expriment alors en agissant sur l'environnement ou en communiquant avec les autres agents. Ainsi, la dynamique d'un SMA émerge des *interactions* entre ses agents. Les propriétés des SMA seront décrites de manière plus détaillée au chapitre suivant, qui aborde les aspects techniques de la problématique. On se concentre dans ce chapitre sur l'usage des SMA en tant que support de modélisation pour la gestion des ressources naturelles. On illustrera notre propos en décrivant des exemples modèles multi-agents appliqués à la grn, puis on exposera les atouts et les défauts du support de modélisation SMA.

1.2.1 Modèles multi-agents pour la gestion de ressources

Définitions

Les analogies proposées par les systèmes multi-agents pour décrire un système réel sont pratiques mais portent le danger de mêler monde réel et monde virtuel. Nous précisons ici le sens des mots afin d'éviter les confusions (d'après [Ferrand and Deffuant, 1998])

- les individus ou groupes pris dans le processus social (réalité) seront appelés *acteurs*
- leurs alter-ego dans les modèles seront appelés *agents*
- le terme agent ayant une consonance sociale, nous appellerons plus généralement *entités* les éléments, physiques ou sociaux, des modèles. Une entité d'un modèle multi-agent peut représenter un individu aussi bien qu'un groupe, un objet élémentaire aussi bien qu'un ensemble d'objets.

[Bousquet, 2001] identifie 3 modes d'interaction autour des ressources, modes que les modèles multi-agents sont à même d'intégrer :

- **interactions agents-ressource** : actions individuelles des agents sur la ressource, comme conséquences des représentations que les agents ont de la ressource, et des règles de décisions qu'ils suivent. Ce mode d'interaction correspond à une coordination par l'environnement quand la ressource est commune à plusieurs agents (dynamique de la ressource, relations amont-aval...).
- **interactions directes agents-agents** : communications entre agents au sein de réseaux d'accointances. Ce mode d'interaction correspond à une coordination par l'information.
- **interactions agents-agents via les institutions** : représentation de la coordination via des « objets médiateurs », de « référents commun », mythes, lieux symboliques, marchés, institutions. Ce mode d'interaction correspond, entre autres, à une coordination par des règles collectives.

Nous nous baserons sur cette classification pour organiser un bref survol, loin d'être exhaustif, de modèles multi-agents pour la gestion de ressource et des questions qu'ils permettent d'aborder.

Articulations entre usages et espace Certains modèles cherchent à explorer plus spécifiquement une **articulation entre les dynamiques d'usage et de gestion d'une ressource et l'espace physique dans lequel elles s'insèrent**.

Un premier type de modèle représente des agents qui mettent en œuvre des stratégies d'usage d'une ou plusieurs ressources dans une grille qui porte les composantes spatiales de la dynamique des ressources. Les agents n'y interagissent pas directement mais sont soumis à une pression sélective (ceux qui échouent dans leur usage de la ressource font faillite et disparaissent du système). Ces modèles cherchent à **identifier des stratégies de gestion pérennes dans un espace donné**. C'est le cas de Fearlus [Izquierdo et al., 2003] qui s'intéresse à l'occupation des sols, de

[Walker and Janssen, 2002] qui s'intéressent à la gestion de pâturages, et de [Feuillette, 2001] qui s'intéresse à la gestion d'une nappe d'eau.

D'autres modèles incluent des facteurs démographiques et économiques et mettent l'accent sur les règles globales de la ressource plutôt que sur les règles individuelles de gestion et d'usage. Ces modèles s'interrogent sur l'évolution des usages dans un territoire soumis à des mesures de régulation économiques ou institutionnelles. C'est le cas de [Ducrot et al., 2004] qui s'intéresse à la qualité de l'eau dans le bassin de Sao Paulo au Brésil, ou du modèle s'intéressant à la consommation d'eau à Barcelone dans le projet FIRMA [Sauri, 2003].

Enfin, certains modèles s'intéressent plus spécifiquement à l'impact de configurations spatiales sur la dynamique d'une ressource à travers les réseaux de voisinage qu'elles induisent. C'est le cas de [Berger, 2001] qui s'intéresse à la propagation d'innovations dans l'occupation des sols et de ses conséquences sur l'irrigation, de Fearlus-W [Izquierdo et al., 2003] qui rajoute à Fearlus des dynamiques hydrauliques et une pression sociale vis à vis de la pollution, et de [Lansing and Kremer, 1994] qui étudie l'influence d'échelles de coordination sur des pratiques culturelles.

Articulations entre usages et organisation sociale D'autres modèles s'intéressent plus spécifiquement à l'articulation entre les dynamiques d'usage et de gestion d'une ressource et « l'espace social » dans lequel elles s'insèrent. C'est le cas de [Deadman, 1999] qui étudie l'articulation entre imitation et stratégies autour d'un jeu de gestion des communs, ou de [Barreteau, 1998] qui étudie l'articulation entre divers modes de coordination sur la gestion de périmètres irrigués. [Rouchier et al., 2001] s'intéressent aux articulations entre les échanges, marchands ou pas, au sein d'un groupe, et sa structure sociale. On peut aussi citer [Kohler and Gumerman, 2000] qui présentent dans leur ouvrage des modèles anthropologiques, qui permettent de tester des théories sur l'organisation et l'évolution de sociétés disparues en simulant l'effet de règles sociales sur cette organisation.

Articulations entre différents niveaux d'usage Un dernier type de modèle s'intéresse plus spécifiquement à l'articulation entre différents niveaux d'usage et de gestion d'une ressource. Ainsi, [Doran, 2001] simule l'effet d'interventions de gestion sur un système représentant des usages multiples de l'eau dans un bassin. Chacun des usages y est représenté à travers une hiérarchie de décision d'appliquant à une sphère d'action. Les différentes hiérarchies de décision y interagissent, quand leurs sphères d'action se rencontrent. [Courdier et al., 2002] s'intéressent à l'efficacité de différents modes de coordination entre les acteurs qui interviennent dans les différents niveaux d'une chaîne d'échange d'effluents d'élevage. Enfin, [Barreteau et al., 2001, Franchesquin et al., 2003, Le Bars, 2003, Becu et al., 2003, Barreteau et al., 2003] s'intéressent à la mise en œuvre de règles collectives de gestion de l'eau au niveau individuel. Nous reviendrons plus longuement sur ces modèles par la suite.

Enfin, on peut préciser qu'il est tout à fait envisageable d'associer les SMA à d'autres outils : restitution / validation par des jeux de rôles [Barreteau et al., 2001], utilisation conjointe de SIG [Bonin and Le Page, 2000], ou avec d'autres modèles ([Guerrin, 2000] couple des systèmes dynamiques Vensim représentant les flux de matières organiques à l'intérieur d'une ferme avec un SMA représentant les interactions entre fermes).

Ce rapide aperçu aura illustré la vitalité de la recherche dans le domaine de la modélisation

multi-agent appliquée à la gestion de l'environnement. En France, plusieurs équipes travaillent autour de ce thème : Green au Cirad³, Geodes à l'IRD⁴, le LISC et l'équipe Usages au Cemagref⁵, l'équipe MESC du Laboratoire d'Informatique du Littoral⁶. [Bakam Tchiakam, 2003], [Le Bars, 2003], [Feuillette, 2001], [Franchesquin, 2001], [Soulié, 2001], [Mathevet, 2000], [Rouchier, 2000], [Barreteau, 1998] font partie des thèses francophones portant sur les SMA et la gestion de ressources produites ces dernières années. A l'étranger, on citera le Center for Policy Modelling⁷ de Manchester, l'équipe multi-agent de l'université d'Essex⁸, le département de sociologie de l'environnement de l'université de Surrey⁹, le groupe de recherche simulation et modélisation de l'université de Koblenz¹⁰, la division intelligence artificielle de l'Institut des technologies et des sciences cognitives de Rome¹¹, le Agent-Based Modelling Working Group du CSIRO (CABM) en Australie¹², ou le Center for the Study of Complex Systems de l'université du Michigan¹³. Le projet européen FIRMA¹⁴, consacré à l'utilisation des SMA pour la gestion de l'eau témoigne d'une reconnaissance de l'approche. Enfin la modélisation multi-agent est l'objet exclusif des conférences internationales ABS¹⁵ et MABS¹⁶, où figurent toujours des sessions consacrées aux applications à la gestion de l'environnement. Des sessions consacrées aux SMA et à la gestion de l'environnement sont aussi tenues dans les conférences MODSIM¹⁷, ou dans les conférences de l'ESSA¹⁸.

1.2.2 Propriétés des SMA en temps que support de modélisation

[Vanbergue, 2003] fait remarquer que dans leurs applications de modélisation multi-agent, si les propriétés des SMA (autonomie, cognitivité, organisation) sont largement utilisés à un niveau conceptuel comme des supports de description et de formalisation, elles s'expriment rarement au niveau opérationnel, dans les simulations. Il faut en déduire que malgré cette sous-utilisation de leurs propriétés informatiques, c'est leur puissance descriptive qui rend les SMA si populaires pour l'appui à la grn, dans un domaine où le besoin de disposer d'outils supportant un dialogue à la fois entre les disciplines et entre les chercheurs et les usagers est fort.

Les qualités accordées aux SMA en tant que support de modélisation pour la grn sont énumérées dans de nombreux travaux, parmi lesquels [Bousquet and Le Page, 2004, Haradji *et al.*, 2004, Izquierdo *et al.*, 2003, Pahl-Wostl, 2002, Doran, 2001]. Nous classons ces propriétés en 3 catégories :

³<http://cormas.cirad.fr/>
⁴<http://www.bondy.ird.fr/geodes/>
⁵<http://www.montpellier.cemagref.fr/irrigation/getirri/tr-getirri.htm> et <http://wwwlisc.clermont.cemagref.fr/>
⁶<http://www-lil.univ-littoral.fr/FR/>
⁷<http://cfpm.org/>
⁸<http://cswww.essex.ac.uk/Research/abmas/>
⁹<http://www.soc.surrey.ac.uk/environment.htm>
¹⁰<http://www.uni-koblenz.de/FB4/Institutes/IWVI/AGTroitzsch>
¹¹<http://www.istc.cnr.it/>
¹²<http://www.cse.csiro.au/research/cabm/>
¹³<http://www.pscs.umich.edu/research/projects/sluce/>
¹⁴<http://firma.cfpm.org/>
¹⁵Agent-Based Simulation, <http://www.scs-europe.org/conf/index.html>
¹⁶Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation, <http://www.informatik.uni-trier.de/~ley/db/conf/mabs/>
¹⁷<http://www.cse.csiro.au/modsim05/>
¹⁸European Social Simulation Association, <http://essa.eu.org/>

- propriétés liées à la **manipulation du support de modélisation SMA** : les SMA sont souvent mis en œuvre comme des extensions des systèmes à objet. Ils en héritent donc les qualités de **modularité** (chacun des éléments du système peut être modifié, enlevé, ajouté ou réutilisé indépendamment des autres) et de **flexibilité** (conséquence de la modularité : le système peut évoluer facilement par ajout de nouveaux éléments ou modification de seulement une partie de ses éléments).

Nous verrons cependant que le seul concept d'agent est limitant pour formaliser des éléments générique pour la grn ;

- propriétés liées au **contenu** des modèles : on définit l'**expressivité** d'une méthode de modélisation comme sa capacité à offrir un formalisme pour représenter des éléments et des points de vue hétérogènes sur un système. On revient plus en détail sur l'expressivité des SMA au paragraphe suivant ;
- propriétés liées à l'**utilisation du modèle** : on a déjà abordé les perspectives d'utilisation explicative ou médiatrice des modèles dans la grn. Cette utilisation est rendue possible par une propriété essentielle des SMA qui est l'**émergence** : les interactions, souvent non-linéaires, entre ses éléments sont la source de la complexité d'un système et même des comportements individuels très simples peuvent produire des comportements collectifs complexes et imprévisibles [Drogoul, 1993].

L'émergence est une propriété des systèmes complexes en général. Les SMA, dont la dynamique repose sur les interactions entre agents sont eux-même des systèmes complexes et sont donc particulièrement bien adaptés à la simulation de ces systèmes [Ferber, 1995, Bradbury, 2002].

En offrant un formalisme pour expliciter des comportements et des interactions à un certain niveau et en observer les effets à un niveau supérieur, les SMA permettent d'éclairer des rouages et des chaînes de cause à effet du système modélisé.

De plus, en offrant la possibilité d'intervenir sur les entités et les interactions d'un système, ils permettent une approche véritablement expérimentale des simulations : les SMA comme « laboratoires virtuels » [Vanbergue and Drogoul, 2002].

Ce travail mène une réflexion sur la prise en compte de la complexité des systèmes dans les SMA. Il se concentre donc sur les propriétés de modularité et d'expressivité du support de modélisation SMA.

Expressivité des SMA On décline les capacités des SMA à représenter des éléments variés d'un système suivant 3 axes selon lesquels s'exprime la complexité d'un système [Pahl-Wostl, 2002] :

- **complexité individuelle** : la capacité des SMA à représenter des comportements individuels évolués provient de différentes propriétés :
 - **l'intégration du qualitatif** : si les modèles de type numérique ne permettent de manipuler que des données quantitatives, les modèles à base d'entités programmables permettent d'intégrer des règles de comportement et des données d'ordre qualitatif. Ceci permet aux disciplines proches des sciences sociales de s'ouvrir à la simulation. Cela veut aussi dire que l'on peut exprimer dans un SMA des dynamiques sociales comme des dynamiques physiques ou des dynamiques spatiales ;
- **la modélisation de l'action** : les entités identifiées dans le système cible deviennent des agents dans le modèle, leurs actions ou dynamiques deviennent des règles de comportement. C'est en cela que les concepts sous-tendant les SMA offrent un support métaphorique adapté aux thématiciens des différentes disciplines impliquées dans la grn

qui peuvent ainsi exprimer leurs hypothèses de manière directe. Il devient alors possible de travailler directement sur des hypothèses de comportements élémentaires [Doran, 2001], ce qui offre des possibilités de modélisation très explicatives des systèmes

Ces deux dernières propriétés illustrent les capacités des SMA à favoriser une approche collaborative et interdisciplinaire de la modélisation ;

- modélisation d'une **rationalité limitée** : les décisions des agents cognitifs sont basées sur la représentation que ceux-ci se font du système et sur leurs objectifs propres. En bâtissant cette représentation sur des croyances, des connaissances partielles, des communications imparfaites, il devient donc possible de représenter des agents à rationalité limitée, prenant leurs décisions suivant leur propre système de représentation ;
- **hétérogénéité** des entités et des fonctions du système. La capacité des SMA à représenter des comportements individuels variés se manifeste à plusieurs niveaux :
 - un agent peut faire preuve de capacités d'adaptation et évoluer au cours d'une simulation. Les entités d'un système peuvent donc se différencier au cours d'une simulation, en construisant éventuellement leur propre système de représentation ;
 - on peut intégrer dans un modèle **plusieurs types d'entités**. On peut notamment faire cohabiter des entités sociales, des entités biophysiques et des éléments purement spatiaux comme les cellules d'une grille ;
 - enfin, en allant encore plus loin, les entités d'un SMA peuvent représenter des individus, des groupes d'individus, ou encore des unités spatiales. Il est donc possible d'y faire coexister plusieurs niveaux de représentation : le comportement global du modèle résulte de décisions et de comportements combinés à différentes échelles. Ainsi, les SMA proposent un cadre unifié pour intégrer différents niveaux d'un système ;
- **structuration des interactions** entre les entités : Il est possible d'exprimer dans un SMA, en jouant sur les différents niveaux de représentation possibles dans le système et dans les agents, des concepts d'ordre organisationnels : réseaux sociaux comme structures spatiales.

Le thème de la **spatialité** apparaît en filigrane dans ces différentes propriétés des SMA. Les propriétés spatiales d'un système peuvent être prises en compte dans un SMA de différentes manières [Bousquet and Gautier, 1998] :

- les acteurs et les ressources du système peuvent être localisés sur une grille spatiale. En utilisant les propriétés topologiques de la grille (voisinage, proximité), on fait de l'espace un support des interactions ;
- il est possible de définir des entités spatiales comme des agrégats de cellules et de les doter de propriétés (répulsion, attraction...) et de comportements spatiaux (déplacement, agrégation ou désagrégation, déformation...). On peut ainsi travailler de manière directe sur l'organisation et les dynamiques spatiales du système. Le travail de [Lardon et al., 2000] ou la thèse de [Servat, 2000] constituent de bons exemples des potentialités des SMA à traiter de dynamiques spatiales.

Bien que la prise en compte de l'espace soit importante dans la grn, on n'en traitera pas de manière spécifique.

La perspective d'une modélisation destinée à appuyer la gestion concertée de ressources, implique que les modèles puissent être rapidement construits et modifiés, tout en offrant la possibilité de représenter une diversité de points de vue afin de s'adapter au mieux aux besoins des acteurs.

On considère alors comme particulièrement importantes les propriétés de modularité et d'expressivité de la méthode de modélisation utilisée, la première parce qu'elle favorise la formalisation d'éléments génériques ou réutilisables, et la seconde parce qu'elle mesure la capacité du formalisme à représenter des éléments et des points de vue hétérogènes.

On s'intéressera particulièrement à la capacité des SMA à formaliser des concepts d'ordre organisationnels, en considérant la structuration spatiale d'un système comme un mode d'organisation des entités parmi d'autres. Dans cette optique, on souligne que dans un même modèle multi-agent, les agents peuvent formaliser plusieurs niveaux de représentation, il peut en résulter une certaine confusion quant à la lisibilité de ces différents niveaux dans les modèles.

1.2.3 Questions soulevées par la modélisation multi-agent

Adaptés à la représentation des systèmes complexes, les SMA sont eux-même des systèmes complexes. Leur utilisation en tant qu'outil de modélisation amplifie donc certaines des questions récurrentes à toute action de modélisation.

- **contenu des modèles** : à quel(s) niveau(x) d'agrégation se situer ? Cette question est bien propre à tout travail de modélisation. Il faut cependant se méfier du pouvoir descriptif des SMA et bien veiller à garder un niveau de complexité raisonnable, le but n'étant pas de reproduire la complexité du monde réel mais de mieux le comprendre !

D'autre part, même si contrairement à des modèles mathématiques les SMA permettent de mêler facilement niveaux d'analyse et pas de temps, la question du passage et des interactions entre ces niveaux n'en reste pas moins problématique. Sans aborder la question du passage d'échelles dans une hiérarchie emboîtée, nous nous intéresserons aux interactions entre des niveaux d'organisation enchevêtrés ;

- **interprétation des simulations** : [Edmonds and Wallis, 2003] distinguent 2 types de complexité dans les SMA : la complexité sémantique, liée à la complexité des éléments à représenter dans les modèles, et la complexité syntaxique, liée à la complexité des interactions. La complexité sémantique crée une distance entre le modèle du domaine et le modèle opérationnel (traduction des concepts), la complexité syntaxique crée une distance entre le modèle opérationnel et les résultats des simulations (émergence). Il y a donc une double difficulté d'interprétation pour utiliser des résultats de simulation en regard du système étudié.

Afin de faciliter le travail d'interprétation, il est important de pouvoir disposer en amont d'un outillage permettant d'exprimer clairement hypothèses et concepts introduits dans le modèle de conception, et en aval d'un outillage informatique permettant une manipulation flexible des simulations (paramétrisation et observation).

Pour [Grimm, 1999], le modèle n'est qu'un support de démonstration de mécanismes que l'on doit pouvoir expliquer sans se référer au modèle ;

- **validation** : le grand nombre de paramètres présents dans les modèles multi-agents fait que les méthodes d'analyse de sensibilité et de validation classiques (explorations systéma-

tiques ou aléatoires de l'espace des paramètres notamment), qui confrontent de manière systématique les résultats de simulation aux hypothèses et paramètres des modèles ne sont pas toujours adaptées, et qu'il est essentiel de passer par une documentation minutieuse et une construction progressive des modèles [Edmonds, 2001]. A cette difficulté à évaluer que l'implémentation d'un modèle est bien correcte due à la complexité des SMA, s'ajoute la difficulté à valider l'impact d'un modèle explicatif par rapport aux objectifs du travail de modélisation : la validation réside alors essentiellement dans des critères subjectifs. Cette « validation sociale » [Barreteau and Bousquet, 1999, Le Bars, 2004] est un sujet encore expérimental et peu stabilisé que nous n'aborderons pas.

2 Construction d'une réflexion autour de la gestion quantitative de l'eau dans des bassins irrigués

2.1 La gestion quantitative de l'eau dans des bassins irrigués

Des concepts et les outils se rapportant à la gestion concertée de ressources naturelles ont été introduits dans la section précédente. Il s'agit ici de resserrer le questionnement autour de la gestion de l'eau dans des bassins irrigués en France. On illustrera notre propos par une présentation de la diversité des acteurs et des modes de gestion impliqués dans les dispositifs visant à préserver la disponibilité de la ressource sur un bassin.

2.1.1 Irrigation et gestion concertée de l'eau en France

Les actions de gestion concernant la ressource en eau visent à résoudre des conflits d'usage, mener à bien des projets d'aménagement, ou encore développer une approche plus équilibrée, plus adaptative face à des situations de crises (étiages ou inondations).

Définitions

La loi sur l'eau de 1992 définit la **gestion équilibrée** de la ressource en eau comme une gestion visant à préserver les écosystèmes aquatiques et les zones humides, assurer la protection de la qualité de la ressource, et en promouvoir la valorisation économique pour répondre au mieux aux besoins et aux usages.

[Chocat, 1997] définit la **gestion intégrée** comme la recherche d'un équilibre entre milieu et usages par des actions techniques, institutionnelles, juridiques et/ou financières par la coordination d'actions locales dans un cadre global.

Cadres réglementaires et contexte français Avec la loi sur l'eau de 1992, l'eau devient « *patrimoine commun de la nation* ». La « *gestion équilibrée de la ressource en eau* » est officiellement promue et des processus de décision incluant l'ensemble des acteurs locaux d'un territoire, défini par une unité hydraulique consistante, sont favorisés. A cette fin, de nouveaux outils réglementaires sont instaurés :

- les **SDAGE**, Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux, obligatoires et établis par un comité de bassin pour chacun des six grands bassins versants français¹⁹
« *prennent en compte les principaux programmes arrêtés par les collectivités publiques et*

¹⁹Ce sont les bassins couverts par les six agences de l'eau : Adour-Garonne, Artois-Picardie, Loire-Bretagne, Rhin-Meuse, Rhône-Méditerranée-Corse et Seine-Normandie

définissent de manière générale et harmonisée les objectifs de quantité et de qualité des eaux ainsi que les aménagements à réaliser pour les atteindre » ²⁰.

Ce sont donc des documents cadres dont les objectifs généraux servent de balises lors de la mise en place de mesures de gestion sur des unités hydrographiques de taille plus restreinte, où les actions participatives se matérialisent ;

- les **SAGE**, Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux sont des documents élaborés en concertation avec l'ensemble des acteurs d'un sous-bassin. Ils fixent les objectifs généraux de gestion du milieu aquatique, ainsi que les actions à mener pour y parvenir. Le SAGE a une portée juridique dans le sens où les décisions prises par l'État et les collectivités doivent être compatibles au document, mais il n'a pas de valeur obligatoire, ni de délai limite. Le SAGE n'apporte pas non plus de contribution financière de l'État.

Le SAGE est élaboré par une Commission Locale de l'Eau (CLE), collège des collectivités locales, des usagers et des représentants de l'État. Il est ensuite approuvé par le préfet, puis la CLE doit se charger du suivi de son application.

La taille des territoires des SAGE est assez variée. Le texte précise juste que ce doit être une unité autobiographique cohérente, à un niveau plus local que le SDAGE.

Le dispositif des SAGE vient compléter et a été nourri de l'expérience acquise autour du dispositif des **contrats de rivière**. Créés en 1981, les contrats de rivière sont des engagements contractuels sur 5 ans à mettre en œuvre des actions programmées par une négociation locale et agréées par les représentants de l'État. La signature d'un contrat de rivière donne lieu à un financement de l'État, mais n'a pas de valeur réglementaire et ne peut concerner que des actions donnant lieu à une maîtrise d'ouvrage. Si le SAGE apparaît comme un outil de réflexion global, le contrat de rivière est moins large, mais présente des aspects plus opérationnels. Depuis la loi sur l'eau de 1992, la procédure de mise en place d'un contrat de rivière est simplifiée dans le cas d'un SAGE approuvé : le contrat de rivière est appelé à devenir la traduction opérationnelle privilégiée du SAGE. Ainsi, l'évolution des actions de gestion dans le sens d'une territorialisation et d'une implication accrue des acteurs concernés s'illustre en France par l'émergence, au long des 20 dernières années, d'institutions de bassin mettant en place ces procédures de gestion participative. [Allain, 2001]

Le SAGE ne faisant que fixer des objectifs à moyen terme et des actions globales, sa mise en œuvre passe par d'autres **lieux de concertation plus spécialisés** ou plus locaux, impliquant d'autre acteurs que les membres de la CLE, où se négocient les **modalités de mise en œuvre des actions**.

Le **cadre applicatif** de la thèse sera constitué par les discussions entre acteurs visant à définir des modalités permettant d'atteindre les **objectifs fixés vis à vis de l'irrigation et de la gestion des étiages** dans le SAGE de la rivière Drôme.

La Directive Cadre Européenne de 2000 vient confirmer ces orientations en soumettant toute action de gestion de l'eau à la participation du public et en recommandant l'implication des acteurs, ainsi qu'une gestion à l'échelle du bassin.

Gestion concertée et irrigation L'irrigation constitue un usage majeur de la ressource en eau, de par l'importance de ses prélèvements, mais aussi à cause de la spécificité du monde

²⁰ Un SAGE pour la rivière Drôme, District d'Aménagement du Val de Drôme, 2001

agricole et de sa capacité de mobilisation et de lobbying fortes vis à vis des pouvoirs publics. L'irrigation a été un facteur clé de l'intensification agricole et a, à ce titre, longtemps bénéficié d'un appui fort de la part de l'État. Ainsi, les surfaces irriguées en France ont doublé entre 1976 et 1995.

Cet appui s'est accompagné d'une politique d'accroissement de l'offre par la mise en place d'aménagements. Cette gestion est allée de pair avec un arsenal de mesures à court terme pour faire face à des situations de crise ou de déséquilibre : arrêtés préfectoraux d'interdiction de prélèvement, mal acceptés et mal contrôlés ou mise en place d'obligations de déclaration de prélèvement entérinant souvent des situations de déséquilibre.

Ces mesures portent par ailleurs sur des territoires administratifs, dont les frontières sont différentes de celles des bassins. Elles sont de plus fréquemment contournées par un suréquipement des agriculteurs. Malgré des améliorations, assolements et pratiques restent un sujet tabou dans les arènes de concertation, si bien que la demande n'est jamais remise en question.

Avec l'arrivée des SAGE et l'émergence d'actions de gestion concertée, l'objectif devient d'ajuster la demande à l'offre disponible en améliorant l'efficience de l'irrigation et l'allocation des ressources. [Garin *et al.*, 2000]

2.1.2 Caractéristiques des systèmes irrigués

L'irrigation couvre des réalités très variées. On peut commencer par différencier irrigation individuelle, où les équipements de captage et de distribution de l'eau appartiennent à l'agriculteur, et sont utilisés librement dans le cadre des autorisations de prélèvement locales, et irrigation collective, où la distribution de l'eau à l'agriculteur est réalisée via un périmètre irrigué appartenant et géré par une institution. L'agriculteur est alors contraint dans son utilisation de l'eau par les règles collectives de l'institution. En France, 60% des terres irriguées le sont à partir d'équipements individuels [Bouleau, 2001].

L'irrigation collective peut prendre des formes diverses, tant physiquement que socialement. Ainsi, physiquement, les périmètres irrigués peuvent varier :

- par la **taille et structure** du réseau de distribution
 - par le **mode de distribution** : gravitaire ou sous pression
 - par le **mode de captage de l'eau** : dérivation d'une rivière, réservoir, rempli quotidiennement ou annuellement, pompage dans une rivière ou dans une nappe, captage d'un karst.
- Un même réseau peut combiner différents modes de capture.

Et socialement, les périmètres irrigués peuvent varier :

- par l'**institution responsable de la gestion du réseau** : administration nationale ou régionale, structure communale ou intercommunale, entrepreneur privé, groupe d'usagers. Des institutions différentes peuvent être en charge de différentes fonctions d'un périmètre irrigué (e.g. gestion financière et administrative et gestion technique). Le fonctionnement du périmètre sera très différent selon que le gestionnaire est une grande société d'aménagement, ou bien une association d'usagers. Dans ce dernier cas, les règles d'allocation s'adapteront plus facilement aux spécificités individuelles, mais le contrôle social sera plus fort.
- par le **mode de calcul des redevances** : avec partie forfaitaire ou non, selon le volume utilisé ou pas.
- par les **règles d'allocation de l'eau** utilisées :
 - à la demande
 - programmation quotidienne centralisée
 - partage du débit

- tour d'eau : et alors fonctionnement de la rotation

On retrouve la même diversité des modes de captage dans l'irrigation individuelle. Mais les agriculteurs recourant à ce type d'irrigation se retrouvent directement soumis aux réglementations préfectorales, à moins de s'être constitués en association. Ce n'est qu'alors que l'irrigation individuelle peut devenir un interlocuteur dans les concertations sur l'aménagement de modalités de gestion de l'eau à l'échelle d'un bassin.

2.1.3 Acteurs de la gestion de l'eau agricole

Outre les **agriculteurs** et les **organisations en charge de la gestion des périmètres irrigués**, on peut identifier d'autres acteurs qui interviennent directement dans la gestion de l'eau agricole [Montginoul, 1997] :

- l'**État** qui est garant de l'intérêt général. Son intervention la plus directe se fait à travers les arrêtés préfectoraux d'interdiction d'irriguer, mais il se manifeste aussi à travers la police des eaux, et les SAGE ;
- des **sociétés de gestion** de grands aménagements, publiques ou privées, peuvent intervenir à travers une réglementation ou une contractualisation des prélèvements agricoles sur leurs ouvrages. Ces sociétés traitent alors avec des gestionnaires de périmètres irrigués, ou bien directement avec des irrigants individuels ;
- les **Agences de l'Eau** qui prélèvent des redevances liées à la quantité des prélèvements et aux pollutions engendrées. Mais le faible niveau de ces redevances n'en fait pas des mesures incitatives.

Mais la gestion de l'eau agricole ne constitue pas un système isolé, et d'autres acteurs peuvent intervenir indirectement notamment en influant sur les pratiques des agriculteurs : entreprises fixant des normes sur la production de cultures sous contrats, syndicats ou organisations professionnelles, coopératives offrant des débouchés aux productions ou un accès à des machines collectives, ou simples associations informelles où se fait un partage d'équipement ou d'information.... De plus, les procédures de gestion intégrée contraignent le monde agricole à s'ouvrir vers des acteurs dont les usages ont gagné en légitimité (pêche, environnement, tourisme...).

2.1.4 Instruments de gestion de l'eau agricole

Différents types d'instruments de gestion peuvent influencer sur la gestion de l'eau agricole [Gleizes, 1999, Feuillette, 2001] :

- outils **techniques** :
 - outils visant à accroître la disponibilité de la ressource : mise en place de retenues, modernisation des réseaux de distribution ;
 - outils visant à agir sur la demande :
 - outils de régulation des prélèvements : modernisation de l'irrigation au niveau de la parcelle (e.g. micro-irrigation) ou au niveau de la prise d'eau (e.g. limiteurs, vannes) ;
 - outils de mesure et de contrôle : compteurs, tableaux de bord ;
 - outils d'information : tableaux de bord, sensibilisation, conseil ;
- outils **réglementaires**. Ce sont les règles prescrivant les droits d'accès, imposées ou négociées, et s'appliquant à un certain groupe d'utilisateurs :
 - normes sur des techniques ou des pratiques (issues d'organisations professionnelles ou de contrats de culture par exemple) ;
 - droits d'eau : ces droits peuvent être définis en débit, en volume, en temps pour les utilisateurs d'un périmètre irrigué ;

- obligations de déclaration de prélèvement, arrêtés préfectoraux d'interdiction de prélèvement. Dans ces cas là les mesures portent sur l'ensemble des usagers d'une circonscription administrative ;
- outils **économiques** :
 - propres à des contrats de gestion entre gestionnaires d'une ressource et préleveurs : quotas, système de tarification ;
 - incitations financières : Contrats Territoriaux d'Exploitation ou mesures agri-environnementales par exemple.

Ces mesures, de natures très différentes, peuvent bien entendues être combinées. Elles s'appliquent à des échelles d'intervention variées, dans le temps et dans l'espace, et à des groupes d'acteurs définis de manières diverses.

2.2 Quel niveau de complexité représenter ?

Devant la diversité des situations de la gestion de l'eau agricole, nous avons pris le parti d'entamer un processus de réflexion « par le haut », en identifiant les éléments communs à diverses situations. Cette démarche procède d'une volonté de rassembler des connaissances en partant de l'objet, la gestion de l'eau agricole, et non d'une approche disciplinaire particulière. Cette démarche marque aussi une orientation de ce travail vers une interrogation méthodologique qui s'éloigne du terrain pour se concentrer sur la manière de modéliser échelles et modes de gestion entremêlés.

On s'est appuyé sur l'analyse de douze cas français de gestion d'étiages à l'échelle d'un bassin ou d'un sous-bassin. Ces douze cas sont issus du rapport d'étude du projet Irri-Mieux ²¹. Un groupe de travail constitué de chercheurs et d'experts y établit une analyse sur la manière dont s'organise localement la gestion collective de l'eau en France [Gleizes, 1999]. Pour chaque cas, un exposé est fait de : la nature de la ressource, les usages et les enjeux autour de ces usages, les problèmes existants, les acteurs concernés, l'histoire des conflits autour de l'eau et de leur résolution éventuelle, les outils de gestion utilisés, les modes de représentation des usagers, l'expression de l'engagement des agriculteurs.

Pour chaque étude de cas, on a relevé : quelles sont les entités spatiales, quels sont les acteurs et quelle est leur relation à l'eau, quels types d'interactions ont lieu entre les acteurs (sociales, réglementaires, économiques, techniques, échanges d'information). Les tableaux 1 et 2 présentent une qualification des modes d'intervention et acteurs concernés, et des organisations formelles rencontrées. Ces tableaux ne se veulent pas exhaustifs, ils illustrent simplement la variété des modes d'interaction autour de l'eau. Ils se concentrent sur les éléments touchant à la mise en œuvre des règles de gestion en laissant de côté ceux touchant à la constitution de ces règles.

En cherchant à spécifier des entités et des échelles caractéristiques de la gestion de l'eau qui seraient la base d'un modèle générique on a abouti à deux conclusions.

Une entrée par les modes d'organisation : l'optique de modélisation d'un système avec des agents pousse à le décrire en partant des entités qui le composent et des comportements de chacune de ces entités. Une autre manière de décrire un système est de partir de sa structure et de l'organisation des processus qui y ont lieu. Dans le cas des systèmes de gestion de l'eau agricole, la seconde manière paraît plus intuitive et plus intéressante.

²¹Irri-Mieux est une opération nationale du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, du Ministère de l'Aménagement de Territoire et de l'Environnement, et des organisations professionnelles agricoles. Irri-Mieux repose sur la construction et la mise en œuvre de projets visant à améliorer la maîtrise de l'irrigation à l'échelle des bassins ou des sous-bassins, en concertation avec acteurs locaux, organisations professionnelles et pouvoirs publics. Les projets agréés sont financés pour 3 ans. (source : site web du projet http://www.anda.asso.fr/prog_actions/IrriMieux)

Outils d'information	Émetteurs	Récepteurs
Tableaux de bord sur la disponibilité de la ressource	Gestionnaires d'aménagements ou de PI, Animateurs de SAGE	Usagers d'1 PI, d'un aménagement, d'un bassin
Tableaux de bord sur les usages	Usagers d'1 PI, d'un aménagement, d'un bassin	Usagers d'1 PI, d'un aménagement, d'un bassin
Conseil : informations pour l'irrigation	CA, organisations professionnelles	Agriculteurs d'un département, pratiquant un type de culture
Compteurs d'eau	Agriculteurs, Gestionnaires de PI	Gestionnaires de PI, Gestionnaires d'aménagements, CA, DDAF
Outils économiques	Baillleurs	Payeurs
Quotas, systèmes de tarification (diverses modalités)	gestionnaires d'aménagements ou de PI	gestionnaires de PI ou usagers d'un PI ou d'un aménagement
Marchés de droits d'eau	Gestionnaires d'aménagement	Usagers d'un aménagement
Outils réglementaires	Régulateurs	Public
Contrats : demande satisfaite contre obligations tarifaires ou techniques	Gestionnaires d'aménagement	Usagers des aménagements (agriculteurs ou PI)
Obligation d'autorisation de déclaration	Préfecture	Usagers d'un département
Interdictions d'irriguer	Préfecture	gestionnaire de PI, usagers d'un département
Modalités de gestion de crise décidées à l'intersaison	Gestionnaires d'aménagement ou de PI, Animateurs de SAGE	gestionnaires de PI, usagers d'un PI, d'un aménagement ou d'un bassin

TAB. 1 – Outils de gestion relevés dans les études de cas Irri-Mieux. Les acteurs concernés ont été regroupés en acteurs sources et en acteurs cibles. Les listes d'acteurs correspondent aux différents cas rencontrés. PI correspond à Périmètre Irrigué. CA correspond à Chambre d'Agriculture

Organisation	Acteurs membres	Mission(s) de l'organisation	Critère(s) d'appartenance à l'organisation	Responsabilités vis à vis de l'organisation
Association d'irrigation	irrigants	service de distribution d'eau représentation au niveau du bassin	branchement physique sur le réseau de l'association	respect des règles, paiement d'une souscription
Associations corporatistes, fédérations d'usagers	usagers de l'eau	défense d'un intérêt commun coordination, conseil	faire partie d'une certaine catégorie d'usagers	
CUMA	agriculteurs	service de prêt de matériel	proximité géographique, besoin du matériel	paiement d'une souscription
Chambres d'Agriculture	agriculteurs	représentation, conseil	faire partie d'un secteur administratif	
Communauté de communes	élus locaux	représentation, arène de dialogue, mise en commun de moyens	proximité géographique	
Institutions de gestion : CLE, comités de pilotage, syndicats mixtes...	élus locaux, représentants d'usagers, membres chambre d'agricultures, services déconcentrés..	espace commun de gestion d'un ouvrage, d'un bassin ou d'une portion de bassin	selon la constitution ad hoc inscrite dans l'organisation	

TAB. 2 – Qualification des organisations rencontrées dans les études de cas Irri-Mieux

On retrouve des acteurs et des objets communs dans tous les cas, mais ils y prennent part de différentes manières. On peut par contre identifier des modes d'intervention ou des outils de gestion, ou bien encore des modes de circulation de l'eau, qui reviennent dans les différents cas, même si ils impliquent des acteurs ou des objets différents à des échelles différentes. On peut alors en décrire de manière générique des modalités ou des règles dont la mise en œuvre dépendra du contexte et des caractéristiques des acteurs.

Le tableau 1 prend l'exemple des différents outils de gestion, que l'on peut classer, et qualifier par les acteurs qui les utilisent.

Entités et fonctions Le tableau 2 souligne la variété des organisations rencontrées autour de la gestion de l'eau agricole, tant par la nature de leurs membres, que par leur mode de constitution et leurs missions.

Il est difficile d'établir une classification des entités rencontrées dans la gestion de l'eau : pour les entités sociales, comment prendre en compte à la fois le caractère individuel ou collectif, la ou les fonctions vis à vis de l'eau, la ou les fonctions vis à vis d'organisations ? Quant aux entités physiques, faut-il considérer d'abord leur structure physique ou d'abord leur fonction ?

Il semble donc intéressant de pouvoir dissocier les caractéristiques constitutives d'une entité des fonctions qu'elle remplit à travers les interactions auxquelles elle participe dans le système.

Si il est plus facile de décrire un système de grn sur la base de processus ou de modes d'intervention pourquoi ne pas transposer ce raisonnement à la construction de modèles ? Le schéma 2 représente cette idée d'identifier des « briques » de différents types pour initier la description d'un système.

Dans un SMA, de tels concepts correspondent à un niveau de description transversal à celui de l'agent, qui est celui de interactions entre les agents, ou de l'organisation de ces interactions. On peut alors faire l'hypothèse que la combinaison de ce niveau de description au paradigme agent permettra de mieux représenter des systèmes de grn en :

- offrant des objets pour décrire les modalités de règles collectives, et différencier les modalités de ces règles de leur mise en œuvre
- offrant des objets pour différencier l'identité intrinsèque d'une entité des fonctions qu'elles occupent dans le système

L'analyse d'exemples de gestion intégrée de bassins irrigués révèle l'existence d'unités de description d'ordre organisationnel : modes de gestion ou de circulation de l'eau par exemple. Ces unités de description offrent un point de vue générique et transversal à la description des acteurs et des objets.

L'analyse des cas Irri-Mieux tient lieu d'amorce à la problématique de la thèse et ne sera pas poussée plus loin. Un cas précis (le SAGE Drôme) guidera le travail de modélisation.

2.3 Comment représenter les modes de gestion ?

On s'intéresse maintenant aux solutions qu'offrent les modèles existants pour représenter ces unités organisationnelles. On examinera pour cela une dizaine de modèles multi-agents de gestion quantitative d'eau agricole en répondant aux questions suivantes :

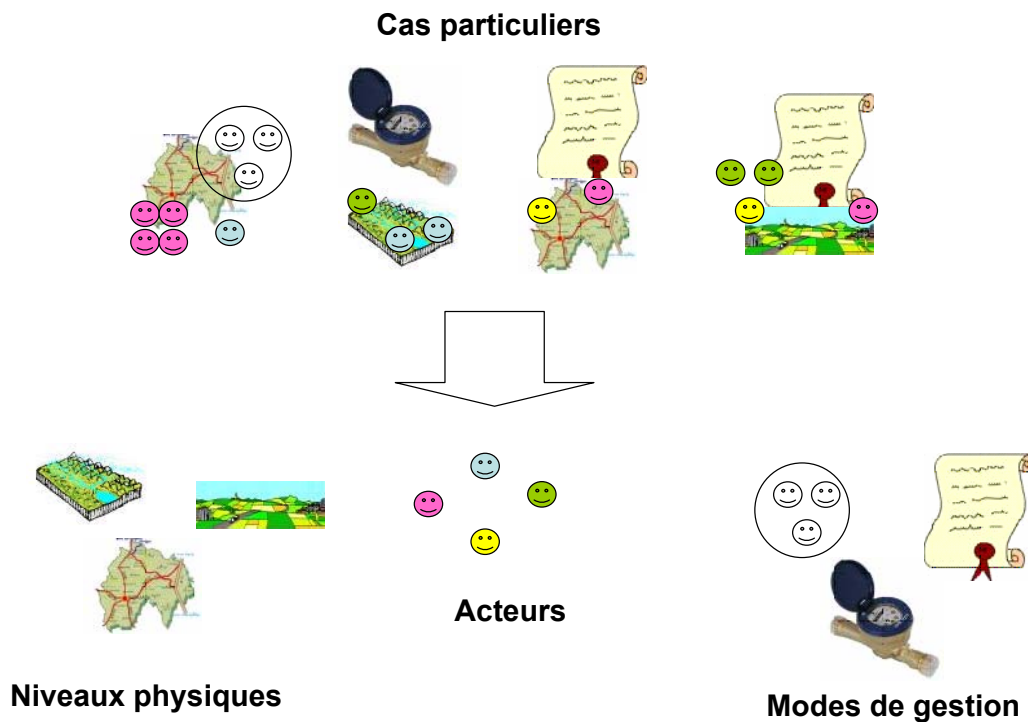


FIG. 2 – A partir de l'analyse d'un ou plusieurs cas particulier de gestion de l'eau, on peut tirer des « briques » qui se combinent : les acteurs d'une part, et des niveaux physiques ou des modes de gestion de l'autre

1. Quels sont les agents utilisés ? On différenciera les agents de type physique et les agents de type social. Dans certains modèles, un même agent gère les processus physiques et sociaux d'un niveau. Il est dans ce cas classé dans les 2 catégories.
2. Comment sont représentés modes de gestion ou d'intervention ?
S'il y en a plusieurs comment sont-ils reliés ?
3. Y a-t-il d'autres types d'interactions sociales ?
Comment sont-elles liées ?
4. Comportements individuels : comment les comportements individuels sont-ils différenciés, selon le contexte et selon l'individu ?

Le tableau 3 présente une synthèse de cet exercice. Seuls les aspects des modèles qui nous intéressent sont répertoriés et des parties de certains modèles peuvent donc être omises. Dans certains cas, les noms des agents ont été changés pour plus de compréhension. Les fiches d'analyses utilisées pour produire ce tableau sont fournies dans l'annexe A. Les 2 derniers modèles présentés dans le tableau 3 ne rentrent pas dans la thématique gestion de l'eau agricole. Le premier s'intéresse plus aux aspects qualitatifs et repose surtout sur des dynamiques d'usage des sols mais il est le seul à introduire du multi-usages (et donc un type de niveau différent de ceux induits par des échelles spatiales ou des modes d'organisation). Le second s'intéresse aux échanges d'effluents d'élevage mais offre des réponses intéressantes à la manipulation dans un SMA de niveaux de gestion multiples.

Examinons maintenant les réponses à nos 4 questions :

2. Construction d'une réflexion autour de la gestion quantitative de l'eau dans des bassins irrigués

Modèle	Entités	Modes de gestion	Interactions sociales	Comportements individuels
Camargue : Gestion hydraulique d'étangs en Camargue [Franchesquin et al., 2003]	Physiques : Parcelle, Canal, Étang, Digue Sociales : Exploitant, Association, GestionnaireDigue, ParcNaturel	ParcNat définit niveau et salinité Étang à respecter GestionnaireDigue définit besoins drainage pour respecter ParcNat Associations négocient sur le drainage demandé pour satisfaire besoins exploitants	Si Associations non satisfaites avec résultat négociations, elles peuvent se coordonner selon polders	Les agents sociaux ont plans et objectifs pour respecter les règles de gestion
Catchscape : Conflits amont-aval en Thaïlande [Becu et al., 2003]	Physiques : Parcelle, Canal, Rivière, Vanne Sociales : Farmer, CanalManager, Village	Demandes en eau définies au niveau des Farmer. Si les demandes ne peuvent être satisfaites, les CanalManager initient rotation avec le canal voisin et entament négociations avec canaux amont. Les Village fixent des prix et des quotas de culture.	Les négociations sont facilitées si les canaux appartiennent au même village	Les comportements individuels sont ajustés par de nombreux paramètres.
GibiDrome : gestion de l'irrigation dans la vallée de la Drôme [Barreteau et al., 2003]	Physiques : Parcelle, Réseau, Rivière, Climat, Pompe Sociales : Paysan, Réseau, CLE	Les Paysan définissent leur demande en eau au niveau individuel. L'eau est distribuée selon des règles de gestion propres à chaque niveau		Comportements individuels non différenciés. Les règles de gestion changent quand le niveau de crise change
Bali : Coordination autour de la gestion de l'eau à Bali [Lansing and Kremer, 1994]	Physiques : Subak (terrasse irriguée), SousBassin, Barrage Sociales : Subak	Chaque subak définit un itinéraire de culture. La disponibilité de la ressource est fixée au niveau du bassin.	Les itinéraires de cultures peuvent être copiés et synchronisés dans des groupes de subaks, définis par l'utilisateur ou émergeant de l'apprentissage des agents.	Les subaks choisissent parmi différents types d'itinéraires culturels disponibles et fixés.
Shadoc : Viabilité de systèmes irrigués au Sénégal [Barreteau and Bousquet, 2000]	Physiques : Parcelle, Bief, Stationnerais Sociales : Paysan, Groupe	Au niveau individuel, les paysans décident de l'irrigation ou pas de leur parcelle. Au niveau collectif, chacun des niveaux est géré par un Groupe qui définit ses propres règles de distribution de l'eau. La distribution se fait alors selon ces règles et les demandes des Paysan	Les Paysans définissent des réseaux d'affinité où : ils échangent préférentiellement de l'information, de l'eau, du crédit, et où ils peuvent copier des comportements performants à l'intersaison	Un répertoire de règle est défini, et les règles adoptées dépendent des groupes d'appartenance, du statut social et des objectifs individuels. Le comportement individuel résulte ensuite de la combinaison des règles adoptées.
Sinuse : gestion d'une nappe d'eau en Tunisie [Feuillette et al., 2003]	Physiques : Parcelle, Puits, PérimètreIrrigué, Nappe Sociales : Exploitant	Gestion au niveau de l'exploitation uniquement : définition des prélèvements et de la dynamique d'exploitation de puits	Échanges fonciers et imitation des comportements performants dans des réseaux de voisinage spatial.	Comportements définis par l'ajustement de nombreux paramètres.
Manga : répartition d'un stock d'eau pour l'irrigation [Le Bars, 2003]	Physiques : Parcelle, StockEau, Climat Sociales : Farmer, Gestionnaire-Stock	Les Farmer définissent leurs besoins en eau. Les GestionnaireStock répartissent leur stock pour la saison selon la règle de gestion testée.		Comportements de Farmer définis par ajustements de paramètres individuels, comportements des GestionnaireStock définis par l'eau disponible et les règles de gestion choisies par l'utilisateur.
Sao Paulo : qualité de l'eau en zone péri-urbaine [Ducrot et al., 2004]	Physiques : Parcelle, Réservoir, Ville Sociales : Farmer, Urban	Les individus choisissent l'usage de leurs parcelles et procèdent à échange foncier et migration selon leurs résultats. Des dynamiques spatiales ont lieu à des niveaux supérieurs à celui de la parcelle, définis par des agrégats (Ville, Réservoir)	Les échanges fonciers sont favorisés au sein de réseaux de voisinage	Les individus définissent leur comportement selon leur cash. Les parcelle définissent leur comportement selon leur usage et leur appartenance à un agrégat.
Biomass : échanges de déchets organiques à La Réunion [Courdier et al., 2002]	Physiques : Parcelle, RoadSegment, StationTraitement Sociales : Farmer, Role, GroupeGestionStation, System	Les Farmer définissent la quantité de matière organique qu'ils produisent et consomment selon les caractéristiques de leur exploitation. Le Groupe impose des quotas.	Les échanges sont favorisés au sein de réseaux d'affinités définis au niveau du System.	Des rôles définissent des fonctions de satisfaction et des places dans des protocoles de dialogue. Les comportements individuels sont définis par les rôles pris en charge et les contraintes imposées par les groupes d'appartenance.

TAB. 3 – Modèles multi-agents de gestion de l'eau et prise en compte de niveaux de gestion

1. Dans la majorité des cas, chaque échelon hydraulique est lié à un niveau de gestion, et donc pour chaque niveau de gestion, un agent social et un agent physique sont définis. Dans quelques cas, il n'y a pas de modélisation physique [Le Bars, 2003], ou bien il n'y a qu'un seul niveau de gestion [Feuillette *et al.*, 2003]
2. Les règles de gestion sont définies soit implicitement, soit sous forme d'objectifs au niveau des agents responsables de la gestion d'un niveau. Dans ce cas, il y a confusion entre règles de gestion et mise en œuvre de ces règles de gestion. Souvent, c'est le niveau de l'exploitation qui commande, et les règles de gestion des niveaux supérieurs ne sont déclenchées qu'en cas de crise [Becu *et al.*, 2003], ou c'est le niveau du bassin qui commande et cherche à satisfaire les demandes des irrigants en employant ses règles de gestion quand ça n'est pas possible [Barreteau *et al.*, 2003, Barreteau and Bousquet, 2000, Le Bars, 2003]. Chez [Feuillette *et al.*, 2003], il n'y a qu'un seul niveau de gestion. Seule [Franchesquin *et al.*, 2003] boucle 2 niveaux de gestion par des négociations.
3. Dans beaucoup de modèles, les agriculteurs copient les stratégies individuelles d'autres agriculteurs performants à l'inter-saison. Les agriculteurs qui peuvent être copiés sont listés dans un agent global [Courdier *et al.*, 2002], déterminé par un voisinage spatial [Feuillette *et al.*, 2003, Lansing and Kremer, 1994], ou bien être définis au niveau de l'agent dans sa liste d'« amis » [Barreteau and Bousquet, 2000]. Dans [Le Bars, 2003], les agriculteurs fournissent des informations privées sur leurs stratégies au gestionnaire, qui agrège ensuite ces informations en une information globale rendue publique, ce qui induit une forme d'imitation des stratégies les plus performantes.
D'autres modes de coordination apparaissent : négociations au niveau d'un voisinage spatial [Franchesquin *et al.*, 2003, Becu *et al.*, 2003], échanges de travail dépendant d'un statut social [Barreteau and Bousquet, 2000], échanges à l'intérieur d'un réseau d'acointances [Courdier *et al.*, 2002].
4. Les comportements individuels peuvent être insensibles aux règles de gestion (les agriculteurs demandent toujours la même chose et cette demande peut ne pas être satisfaite) mais varier selon d'autres paramètres [Becu *et al.*, 2003, Lansing and Kremer, 1994, Feuillette *et al.*, 2003, Le Bars, 2003]. Ils peuvent ajuster leur comportement aux règles de gestion soit en basculant de stratégie quand les règles de gestion changent [Franchesquin *et al.*, 2003, Barreteau *et al.*, 2003], soit en adaptant leurs actions par paramétrage [Barreteau and Bousquet, 2000, Courdier *et al.*, 2002].

On en conclut que dans la plupart des cas, les modes de gestion sont incorporés au niveau d'agents et agissent sur le système de manière « aveugle » (les agents dépendant de ces règles de gestion n'en voient la conséquence que de manière indirecte). Les modèles où les règles sont explicitement prises en compte sont ceux où il y a communication ou négociation, ou bien ceux où des règles ou des contraintes sont explicitement appliquées aux agents prenant part à un groupe.

Il ne ressort pas de cet exercice une manière générique satisfaisante d'aborder un niveau de description organisationnel dans les modèles MA. On retiendra cependant les travaux de [Barreteau and Bousquet, 2000] et [Courdier *et al.*, 2002] qui introduisent des points de vue organisationnels en utilisant des types d'entités différents pour représenter des niveaux de gestion différents et en représentant explicitement des groupes. [Courdier *et al.*, 2002] utilisent même la notion de rôle pour représenter la fonction d'une entité par rapport au processus principal du modèle.

Modes d'intervention, de gestion ou de circulation de l'eau, et schémas d'interaction sont apparus dans l'analyse d'études de cas de gestion de l'eau comme des unités de description génériques, relativement indépendantes des acteurs y prenant part. Ces unités de description organisationnelles, orthogonales au niveau individuel de l'agent ne sont pas représentées de manière satisfaisante dans l'échantillon de modèles MA de gestion de l'eau que nous avons analysé.

Des abstractions supplémentaires sont nécessaires pour pouvoir appréhender de manière « propre » les différents niveaux apparaissant dans la gestion de l'eau à travers ces unités de description organisationnelles.

3 Un questionnement méthodologique autour du concept de niveau d'organisation

3.1 Le concept de niveau d'organisation

Dans la section précédente, nous avons parlé de modes d'intervention, de gestion ou de coordination, d'unités de description organisationnelles, parfois d'échelles ou de niveau. Derrière tous ces termes se cache une abstraction que nous cherchons à capturer et que nous appellerons **niveau d'organisation**

3.1.1 Niveau d'organisation et concepts associés dans la littérature scientifique

Le terme de niveau d'organisation est couramment employé (mais beaucoup moins souvent défini !) dans toutes les disciplines touchant à la description de systèmes complexes.

Dans son acception la plus courante, apparaissant dans les domaines de l'écologie, de la biologie, et plus généralement de la science des systèmes, un niveau d'organisation est un degré de complexité hiérarchique et imperméable d'un système : cellule, organe, individu... par exemple. Ce concept est aussi désigné parfois sous le terme de **niveau d'abstraction** (chez [Hill, 2000] par exemple).

Cette définition est propre à la théorie de la hiérarchie : un phénomène se décompose en niveaux le long d'une échelle spatio-temporelle. Chacun de ces niveaux a ses propres règles et ses propres rythmes et doit être étudié séparément. Mais chaque niveau est le composant d'un niveau supérieur qui détermine des variables de forçage du niveau étudié ; et chaque niveau peut être divisé en composantes de niveau inférieur, dont les dynamiques sont explicatives par rapport au niveau observé. Les différents niveaux sont liés par des relations d'émergence.

Concepts associés Nous redéfinissons ici d'après [Gibson *et al.*, 2000] un certain nombre de termes qui sont utilisés de manière interchangeable dans différentes disciplines.

Définitions

Une **échelle** est une dimension spatiale, temporelle ou analytique sur laquelle on peut mesurer et analyser un phénomène. Une échelle est donc comme un axe, sur lequel on peut situer les phénomènes, défini par son **étendue** (taille de l'axe) et sa **résolution** (unité de l'axe).

Une **échelle analytique** est de nature qualitative, elle décrit les classes issues d'un axe d'analyse. Une échelle analytique n'est donc jamais absolue, elle dépend de la manière dont on observe le monde.

Un **niveau** est défini comme une position sur une échelle.

Une **hiérarchie** est un système d'objets ou de processus liés le long d'une échelle analytique. Selon le type d'échelle analytique, une hiérarchie peut être de type exclusif (e.g. échelle analytique définie par une relation de « qui commande qui » donnant une hiérarchie de type général, capitaine, lieutenant, où encore chaînes trophiques) ou emboîté. Les hiérarchies emboîtées sont soit agrégatives (relation de classification, de type chien, mammifère, animal), soit constitutives (relation de composition, de type cellule, organe, organisme, écosystème). Les niveaux d'organisation de la biologie que nous avons définis sont des niveaux d'une hiérarchie constitutive.

Un **pattern** (motif) est créé par un ensemble d'entités, observées à un niveau de temps et d'espace, et produisant un motif stable d'interactions. En écologie, les patterns sont des paysages, en sociologie ce sont des motifs d'interactions sociales, en sciences politiques, ce sont des modes de décision ..

Une **structure** est définie comme le principe d'organisation d'un objet observé : l'objet est composé de parties non équivalentes, et ces parties possèdent des relations particulières.

La **fonction** d'un objet est l'ensemble des propriétés que cet objet manifeste dans son environnement.

On retiendra des ces définitions qu'une hiérarchie est le résultat d'une analyse et donc un point de vue sur un système. En croisant des points de vue différents, un système laisse donc apparaître des hiérarchies et des niveaux partageant des éléments communs.

On retiendra aussi la notion de motif qui représente une structure d'interactions.

3.1.2 Définition ad hoc du concept de niveau d'organisation

On utilisera le terme niveau d'organisation dans une acceptation plus souple et plus ouverte que son acceptation biologique.

Définitions

On définit un niveau d'organisation (n.o.) comme le point de vue d'un modélisateur sur un ensemble d'entités du système accomplissant une certaine fonction à l'intérieur d'une unité structurelle jugée pertinente.

Un niveau d'organisation (n.o.) est un niveau dans une hiérarchie spatio-temporelle de motifs d'interaction. On pourra identifier autant de hiérarchies que de fonctions du système que l'on souhaite décrire.

Les niveaux d'organisation identifiés dans un système sont autant de sous-systèmes interconnectés par le biais des entités qu'ils partagent : ils sont enchevêtrés et perméables.

En revenant sur les exemples de la section précédente :

- un ensemble {mode d'intervention, acteurs sources, acteurs cibles} tel que ceux décrits dans le tableau 1 correspond à un niveau d'organisation. Ce niveau d'organisation peut être décrit de manière abstraite sans instancier acteurs sources et acteurs cibles ;
- un réseau d'irrigation peut être décrit à l'aide de plusieurs niveaux d'organisation : la circulation de l'eau dans le périmètre constituant un niveau d'organisation physique, le bureau responsable du réseau comme un niveau d'organisation social, et l'ensemble {membres du réseau, règles d'allocation du réseau} comme un autre niveau d'organisation social ;
- un réseau de voisinage peut être vu comme un niveau d'organisation social, relatif à un individu.

Liens entre les niveaux d'organisation Les liens pouvant apparaître entre les niveaux d'organisation d'un système sont de différents types :

- intersection entre les réalisation d'un même niveau d'organisation abstrait, par exemple entre 2 associations d'irrigants ont des agriculteurs en commun : liens « horizontaux » ;
- deux niveaux d'organisation peuvent agir sur les mêmes objets, ou bien agir l'un sur l'autre : liens fonctionnels ;
- deux niveaux d'organisation situés à des échelles différentes peuvent échanger un flux d'information, d'eau, d'énergie : liens d'imbrication.

Dans tous les cas, les liens entre des niveaux d'organisation sont créés par le fait qu'ils partagent un objet commun. C'est ce que l'on entend quand on dit que 2 niveaux d'organisation se chevauchent.

3.2 Mise en place d'une réflexion méthodologique

On fait l'hypothèse de la nécessité d'utiliser un formalisme spécifique pour représenter les différents niveaux d'organisation d'un système dans un modèle multi-agent. La thèse se propose d'identifier, d'adapter et de tester un tel formalisme.

La thèse se propose de bâtir une réflexion méthodologique autour de la question suivante : une méthode de représentation formalisée et explicite des niveaux d'organisation d'un système constitue-t-elle un support adapté au développement de modèles génériques de bassins versants irrigués ?

Ce travail vise donc à améliorer le passage entre le modèle abstrait d'un système (modèle du domaine) et ses versions conceptuelles et opérationnelles : il n'aborde pas l'analyse des systèmes - mais pourra aider à affiner cette analyse - ni l'interprétation des simulations. Il n'ira pas non plus jusqu'à des questions d'interface et d'ergonomie.

L'utilisation d'un formalisme de modélisation pour accompagner le passage entre modèles du domaine et modèles opérationnels impliquera alors :

- un travail **conceptuel** : donner une signification adéquate aux divers éléments du formalisme par rapport au domaine de modélisation ;
- un travail **informatique** : préciser au besoin l'implémentation des éléments du formalisme de manière à ce que les modèles opérationnels puissent être réalisés ;

- un travail **méthodologique** : élaborer une méthodologie d'utilisation du formalisme qui accompagne la construction des modèles conceptuels.

Ces trois axes de travail s'enrichiront mutuellement, la définition d'aspects informatiques poussant plus loin la formalisation des concepts et la structuration de l'analyse, tout ceci menant à de nouveaux développements méthodologiques qui peuvent amener à revenir sur l'architecture informatique ou la définition des concepts...

[Vanbergue, 2003] fait remarquer que les activités de modélisation multi-agent ne bénéficient pas directement des avancées de la recherche en IAD parce que les propriétés des agents n'y sont véritablement utilisées qu'à un niveau conceptuel. Toutefois, même si les modélisateurs sous-exploitent l'« intelligence », individuelle ou collective des agents, ils utilisent fortement les cadres formels développés par les informaticiens pour asseoir la description de leurs systèmes. Cela rejoint la remarque de [Bousquet, 2001] : « *Dans le cadre général des sciences de la complexité, qui propose de reposer les questions scientifiques par l'étude des interactions entre entités élémentaires et de leurs organisations dans une démarche ascendante, les SMA vont participer à cette dynamique dans un double mouvement. D'une part les SMA vont constituer une méthode pour catalyser la reformulation de certaines questions en sciences sociales ou en sciences de la nature, d'autre part les chercheurs informaticiens vont puiser dans cette interaction les éléments pour mieux préciser les questions et proposer de nouveaux concepts dans leur discipline* » .

C'est dans cette double perspective que nous placerons notre approche, en allant chercher dans la recherche informatique des ressources non pas pour créer un modèle plus « intelligent », mais pour mieux formaliser et ainsi mieux comprendre les systèmes que l'on cherche à modéliser.

Cahier des charges Ce travail vise à améliorer la modularité et l'expressivité de modèles multi-agents pour la grn en proposant un formalisme permettant de manipuler des niveaux d'organisation au sein d'un SMA. Ce formalisme doit fournir des concepts organisationnels répondant au cahier des charges suivant :

1. être suffisamment **générique** pour s'appliquer à des **niveaux d'organisation sociaux** aussi bien qu'à des **niveaux d'organisation physiques** ;
2. être suffisamment **modulaire** pour la **manipulation** et la réutilisation éventuelle des **objets organisationnels** ;
3. être suffisamment **souple** pour la représentation de **niveaux d'organisation transitoires** ;
4. rendre compte de niveaux d'organisation qui se chevauchent, i.e. permette d'instrumentaliser la modélisation d'**interactions inter niveaux d'organisation** ;
5. **expliciter** règles, comportements et interactions dans les niveaux d'organisation.

Ce travail est axé sur les phases conceptuelles et opérationnelles de la modélisation, et n'abordera pas directement les aspects liés à l'analyse des systèmes ou à l'interprétation des modèles. Il vise à améliorer modularité et expressivité du contenu des modèles à travers 3 axes de développement : un axe **conceptuel** (définition de concepts organisationnels et de leur champ de modélisation); un axe **informatique** (implémentation de ces concepts afin de les rendre opérationnels); un axe **méthodologique** (outils pour guider l'utilisation de ces concepts). Ce travail s'adresse donc au modélisateur plutôt qu'aux usagers et n'abordera pas les questions liées à l'ergonomie ou à l'interfaçage des modèles

On se donne pour **objectif** d'offrir un **cadre formel** plus adapté à la description d'un système comprenant des **niveaux de gestion imbriqués et/ou entremêlés**. On propose un cahier des charges en 5 points pour ce cadre formel : (1) représenter des niveaux d'organisation physiques aussi bien que des niveaux d'organisation sociaux (2) manipuler de manière modulaire des objets organisationnels (3) représenter des niveaux d'organisation transitoires (4) modéliser des niveaux d'organisation qui se chevauchent (5) expliciter règles, comportements et interactions dans les niveaux d'organisation.

CONCLUSION DU CHAPITRE

Cette thèse s'intéresse à la construction de modèles multi-agent proposant des scénarios de mise en œuvre par des individus ou des groupes d'individus de règles collectives de gestion de l'eau.

Pour mieux décrire ces systèmes, on définit le terme de **niveau d'organisation** comme le **point de vue d'un modélisateur sur un ensemble d'entités du système accomplissant une certaine fonction à l'intérieur d'une unité structurelle jugée pertinente**. Ces niveaux se chevauchent quand ils partagent des entités communes.

La thèse s'attache à explorer la question suivante : **une méthode de représentation formalisée et explicite des niveaux d'organisation d'un système constitue-t-elle un support adapté au développement de modèles génériques de bassins versants irrigués ?**

La réflexion se place donc en amont de l'usage des modèles pour se concentrer sur des questions de structuration de modèles autour de 3 axes : conceptuel, informatique et méthodologique. Les questions d'analyse, d'usage ou d'ergonomie ne seront abordées qu'à travers la lunette de cette structuration.

L'approche adoptée se devra de (1) représenter des niveaux d'organisation physiques aussi bien que des niveaux d'organisation sociaux (2) manipuler de manière modulaire des objets organisationnels (3) représenter des niveaux d'organisation transitoires (4) modéliser des niveaux d'organisation qui se chevauchent (5) expliciter règles, comportements et interactions dans les niveaux d'organisation. Il faut maintenant explorer la manière dont la recherche informatique sur les SMA aborde les questions liées à l'organisation et à la composition des systèmes afin d'en déterminer un formalisme adapté à nos besoins.

Chapitre 2

Le choix du formalisme AGR

CONTENU DU CHAPITRE

Ce chapitre aborde les aspects informatiques de la thèse. Les SMA ont été introduits au chapitre précédent à travers leur application à la modélisation. Ils constituent une application de l'Intelligence Artificielle Distribuée. L'intelligence Artificielle étudie la manière de donner à des programmes des comportements exhibant des caractéristiques d'intelligence (manipuler des concepts abstraits, résoudre des problèmes, apprendre...). L'Intelligence Artificielle distribuée poursuit les mêmes buts, mais introduit la notion d'« *intelligence collective* » : l'intelligence n'est plus issue des seules capacités de représentation de connaissances ou d'inférence d'entités individuelles, mais des capacités d'adaptation et de production collective de formes de ces entités.^a

Si une partie des recherches autour des SMA continue à adopter une vision centrée sur les agents, une autre adopte une vision plus « sociale », où l'étude et la spécification de « motifs d'interactions » (ensembles d'interactions récurrents) prévaut sur celle des comportements individuels et introduit de nouvelles abstractions. On parle alors d'approches organisationnelles des SMA.

Le précédent chapitre se conclut sur la définition d'une question de thèse portant sur la représentation formalisée de niveaux d'organisation, et d'un cahier des charges que devrait remplir une approche permettant d'aborder cette question. Ce chapitre décrit pourquoi les approches multi-agents organisationnelles, et plus précisément le formalisme Agent-Groupe-Rôle présentent des caractéristiques propres à répondre à nos attentes.

La première partie revient sur les caractéristiques des SMA et définit le concept d'organisation dans ces systèmes informatiques. La seconde partie redéfinit le cahier des charges en termes de contraintes sur les caractéristiques des SMA et présente une revue d'approches SMA organisationnelles. Cette partie permet de conclure sur la base des critères du cahier des charges que le formalisme AGR est une approche pertinente pour la problématique de la thèse. La troisième partie décrit le formalisme AGR et les travaux qui y sont liés et dresse le bilan des développements conceptuels, informatiques et méthodologiques nécessaires pour l'utiliser dans une application de modélisation.

^adéfinitions et catégories issues du Web Dictionary of Cybernetics and Systems, <http://pespmc1.vub.ac.be/ASC/indexASC.html>

Sommaire

1	SMA et organisation	44
1.1	Définitions sur les SMA	44
1.2	Organisation et concepts organisationnels	46
2	Choix d'un formalisme organisationnel	49
2.1	Caractéristiques d'un formalisme organisationnel	49
2.2	Approches organisationnelles en informatique et en modélisation	51
2.2.1	Formalismes orientés vers la coordination dans un environnement partagé	52
2.2.2	Formalismes orientés vers l'accomplissement d'une tâche collective	52
2.2.3	Formalismes orientés vers la gestion de sous-systèmes	53
2.3	Conclusion	54
3	Le formalisme AGR	57
3.1	Définitions et propriétés	57
3.1.1	Introduire de la socialité pour gérer l'hétérogénéité des systèmes : ACMAS et OCMAS	57
3.1.2	Présentation du formalisme AGR	57
3.1.3	Apports attendus du formalisme AGR	59
3.1.4	Commentaires	62
3.2	Travaux liés à AGR	63
3.2.1	AGR et la simulation	63
3.2.2	Travaux complémentaires	65

1 SMA et organisation

Dans le chapitre précédent, les SMA ont été introduits à travers leurs applications en modélisation pour la gestion de ressources, et le concept de niveau d'organisation a été introduit comme un objet pour décrire un système par le biais d'unités structurelles et/ou fonctionnelles. Cette première partie d'une part revient sur les SMA d'un point de vue plus informatique, et d'autre part se penche sur la notion d'organisation et son lien avec les systèmes informatiques, pour finalement reboucler sur le niveau d'organisation.

1.1 Définitions sur les SMA

Un système multi-agent est constitué d'entités informatiques autonomes appelées **agents** percevant et agissant dans un **environnement**. Un SMA évolue à travers les **interactions** de ses agents, et peut être structuré selon une **organisation**, prédéfinie ou émergente. Nous décrirons les propriétés des SMA à travers ces 4 axes de description, tels que proposés par la méthodologie de conception Voyelles [Demazeau, 1995]. Ces 4 axes sont ceux sur lesquels se décompose la complexité d'un système :

- A pour Agents : complexité individuelle ;
- E pour environnement : complexité des éléments externes au modèle ;
- I pour interaction : nature des interaction ;
- O pour organisation : structure et dynamique des interactions.

Agents Les agents des SMA sont parfois à peine plus que de simples processus, parfois à peine moins que des systèmes experts. La définition de ce qu'est un agent est d'ailleurs un sujet de débat intarissable dans la communauté du domaine. Nous retiendrons la définition de [Ferber, 1995] : un agent est une entité

- qui agit dans un environnement (et donc le modifie) et est capable de percevoir une partie de cet environnement. Il peut aussi construire une représentation de cet environnement à partir de ses perceptions. Selon l'agent, cette représentation est plus ou moins élaborée, plus ou moins complète, ou même absente ;
- qui peut communiquer avec d'autres agents (demande ou offre de services, d'informations...) ;
- qui possède ses ressources propres et est doté de compétences qu'il peut éventuellement offrir en service ;
- qui est mue par un ensemble de tendances (objectifs, fonction de satisfaction, plan...). Son comportement est le résultat de ces tendances en fonction des ressources, perceptions, compétences que l'agent possède à cet instant : l'agent est autonome.

La complexité individuelle des agents peut être plus ou moins développée. Dans le cas le plus simple, des agents que l'on dit réactifs reçoivent des informations de leur environnement ou des autres agents et réagissent de manière réflexe sur l'environnement ou sur les autres agents. Dans des cas plus évolués, des agents, que l'on dit cognitifs, construisent leur représentation du monde, élaborent des plans selon leurs tendances et leurs objectifs, décident des plans à exécuter ou modifier.

Les architectures d'agent cognitives constituent un champ de recherche actif dans la communauté SMA. On citera à titre d'exemple l'architecture cognitive la plus connue : les agents BDI (pour Belief-Desire-Intention) [Rao and Georgeff, 1995], qui sont dotés d'une base de croyances (représentations du monde), d'un ensemble d'objectifs à atteindre et d'une bibliothèque de plans d'action (desires), et d'une structure intentionnelle (plans d'action adoptés).

Environnement Dans un SMA, il peut exister des éléments possédant leur dynamique propre mais non doués d'autonomie : boîtes aux lettres ou ressources par exemple. Ces éléments ne sont pas des agents mais constituent ce que l'on appelle l'environnement du SMA. L'environnement est donc le milieu dans lequel les agents évoluent, qu'ils perçoivent et modifient.

Interactions Les interactions entre agents sont le moteur de la dynamique globale d'un SMA. Il existe deux types d'*interactions directes* dans un SMA :

- les communications d'agent à agent : un agent envoie un message à un autre, l'agent recevant le message choisissant d'y répondre ou pas par une action ou un autre message ;
- les actions des agents sur l'environnement, qui provoquent une modification directe de celui-ci (poser une marque, ponctionner une ressource par exemple).

Or si les agents modifient l'environnement, ils le perçoivent aussi. Le fait de percevoir les modifications opérées par d'autres constitue un mode d'interaction indirect entre les agents : on parle d'*interactions portées par l'environnement*. Ce type d'interaction est extrêmement important dans un modèle de gestion de ressources puisque c'est celui qui supporte les conflits d'usage autour des ressources.

Là encore, la nature des interactions peut être plus ou moins évoluée, de simples interactions de type physique à des interactions portées par des langages structurés.

Il faut souligner qu'une propriété essentielle des SMA est de présenter une **structure d'interaction dynamique** [Ferrand, 1997] : la liberté d'action d'un agent ne réside pas seulement

dans la définition du « contenu » de ses actions mais aussi dans la définition des entités vers qui il dirige ses actions. C'est même cette capacité des agents à refaçonner la structure d'interaction du système qui leur permet de s'adapter à des situations nouvelles et d'exhiber des comportements collectifs émergents [Müller, 2002].

Organisation L'organisation d'un SMA désigne un **niveau de description intermédiaire, entre l'agent et le système** qui rend compte d'une forme de structuration des comportements des agents et de leurs interactions. La représentation d'aspects organisationnels dans un SMA prend diverses formes et dénominations selon que l'organisation du SMA est implicite ou explicite, statique ou dynamique, émergente ou imposée par le concepteur (même si il y a toujours une organisation présente dans la conception)...

A travers les axes de description Agent, Interaction, Organisation d'un SMA, on retrouve les 3 axes de décomposition de la complexité d'un système présentés dans la section 1.2.2 du chapitre précédent : complexité individuelle (architecture interne des agents), hétérogénéité fonctionnelle et émergence (structure d'interaction dynamique), et spécification de structures d'interaction par des approches organisationnelles.

Notre problématique portant sur la description d'un système par le biais de ses niveaux d'organisation, c'est autour de ce troisième axe que nous avons développé notre réflexion.

1.2 Organisation et concepts organisationnels

Les concepts organisationnels utilisés pour structurer les SMA sont inspirés d'analogies sociologiques que nous définirons avant de nous intéresser à la manière dont ces analogies peuvent être utilisées.

Organisation Le terme organisation est fortement polysémique et employé largement dans de nombreux champs scientifiques. Les différentes acceptions du terme « organisation » se distinguent principalement par :

- l'intentionnalité de l'organisation : dans des vues plus **fonctionnalistes**, l'organisation est une structure collective poursuivant un but ; dans des vues plus **interactionnistes**, l'organisation désigne simplement la manière dont des éléments sont structurés ;
- le statut du niveau collectif par rapport au niveau individuel : dans des vues **subjectives**, l'organisation n'existe pas en tant que telle mais est intériorisée dans des règles de comportements individuelles ; dans des vues **objectives**, l'organisation s'impose de manière globale à ses éléments.

Ces dualités de points de vue correspondent à des courants sociologiques identifiés (fonctionnalisme/interactionnisme, compréhension/explication). On les retrouve dans les définitions données par les dictionnaires, comme dans les définitions données dans le cadre de systèmes informatiques, comme l'illustre le tableau 4.

Les deux définitions informatiques qualifiées de subjectives sont en fait peu tranchées sur l'origine, collective ou individuelle, des liens caractérisant l'organisation. Puisqu'il est possible de représenter au sein d'un même modèle des individus et des structures collectives, ainsi que

	Interactionniste	Fonctionnaliste
Objective	<i>Un groupe dont les membres collaborent de manière continue (Cambridge Dictionary)</i> . Ensemble des liens possibles entre les agents qui composent le système [Arlabosse <i>et al.</i> , 2004]	<i>Quelque chose constitué d'éléments aux fonctions variées qui contribuent au tout et à des fonctions collectives (American Heritage Dictionary)</i> . Schéma de communication et de contrôle appliqué à des acteurs pour réaliser des tâches et satisfaire un but [Fox, 1981]
Subjective	<i>Manière dont les différents organes ou parties d'un ensemble complexe sont structurées (Larousse)</i> . Relations entre les composants d'un système qui (a) déterminent la dynamique du système (b) constituent son unité. Les propriétés des composants n'entrent pas dans la description de l'organisation : différents types de systèmes (machines, organismes, sociétés) peuvent avoir la même organisation. La fonction du système n'entre pas dans la définition de son organisation (Web Dictionary of Cybernetics and Systems)	<i>Façon dont un ensemble est constitué en vue de son fonctionnement (Petit Robert)</i> . Ensemble de rôles et de relations entre ces rôles qui réalise une fonction globale. (...) Un système complexe peut se décrire comme un ensemble d'organisations qui sont autant de points de vue sur le système en question. [Müller, 2000]

TAB. 4 – Acceptions communes et informatiques du terme « organisation »

leurs influences réciproques, de nombreux auteurs voient dans les SMA un outil permettant de réunir les 2 points de vue [Castelfranchi, 2001, Rouchier *et al.*, 1998, Ferrand, 1996].

Les différentes définitions ont en commun de décrire l'organisation comme un ensemble de relations et de rôles attribués à des composants.

Fonction, norme et rôle Les termes de fonction, de rôle ou de norme sont fréquemment employés pour positionner des actions individuelles dans une organisation. On utilise ici les définitions de [Rocher, 1968], reprises dans une perspective d'application aux SMA par [Ferrand, 1996].

Fonction La fonction d'une entité dans une organisation désigne la manière dont l'entité contribue à la dynamique et au maintien de l'organisation. [Castelfranchi, 2001] revient longuement sur le concept de fonction qu'il définit comme un *type particulier de motif conduisant à un processus de sélection et de réplication des comportements qui en sont la source*. Par exemple la fonction de chef dans un groupe découle de comportements de domination et la reconnaissance de ces comportements conforte l'individu dans son rôle de chef. Le concept de fonction permet de construire des organisations évolutives, dont les membres peuvent se spécialiser selon les conditions dans lesquelles ils sont plongés. C'est ainsi que [Drogoul, 1993] explore l'apparition de structures sociales (division des tâches, hiérarchie) dans une société de fourmis.

Norme Le concept de norme permet de traduire la contrainte exercée par le collectif sur les actions individuelles. Une norme définit un registre de comportements attendus ou acceptables dans le cadre d'un collectif. Le concept de norme rend notamment possible l'élaboration de stratégies sociales, en rendant prévisible les comportements des autres membres du collectif, qui sont supposés se conformer aux normes.

Rôle Enfin, le rôle est défini comme un ensemble de normes correspondant à la fonction occupée dans un collectif. Le concept de rôle apporte une structuration supplémentaire en différenciant les normes auxquelles doivent se conformer les différents membres d'une organisation.

La figure 3 représente d'une part la manière dont la fonction, la norme et le rôle créent une interface entre la décision individuelle et le niveau collectif, et d'autre part la manière dont l'organisation d'un niveau collectif peut être décrite par les rôles définis dans ce niveau et les relation entre ces rôles.

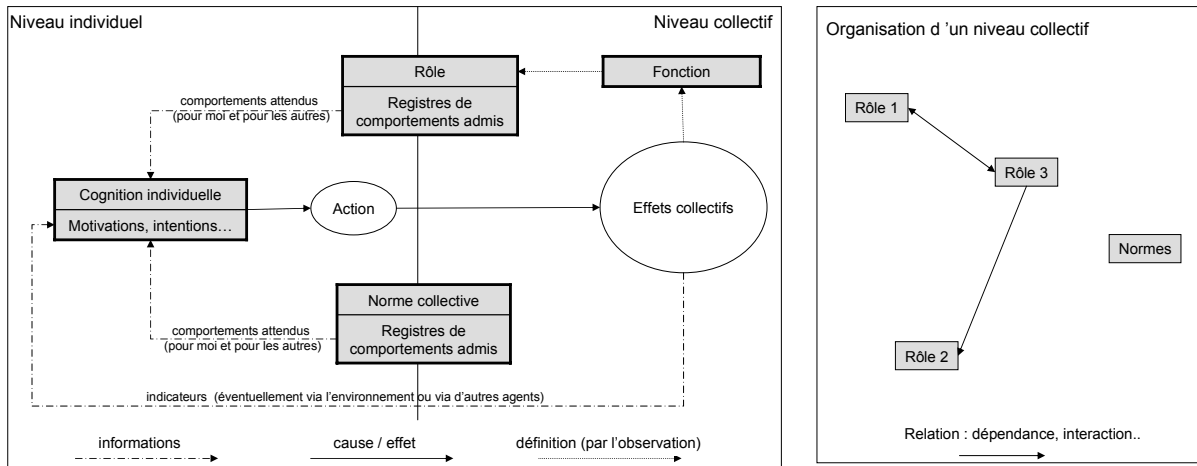


FIG. 3 – Insertion de l'action individuelle dans un collectif : normes et rôles fournissent des modalités de comportements admises dans le cadre du collectif ; les actions individuelles produisent des effets collectifs qui peuvent être identifiés comme une fonction de ces actions ; l'identification d'une fonction définit ou renforce un rôle qui lui est associé. Si on ne s'intéresse plus qu'au niveau collectif, son organisation est alors donnée par l'ensemble de ses rôles et des relations entre ces rôles

Définitions

On définit l'**organisation d'un système** comme un ensemble de rôles et de relations entre ces rôles se répartissant sur les composantes du système. L'organisation d'un système peut être décrite indépendamment des propriétés de ses composants.

On définit le **rôle** d'un composant dans l'organisation d'un système comme le registre de comportements correspondant à la fonction du composant dans le système.

Exemples d'organisations classiques des systèmes informatiques Il existe des modèles d'organisations classiques qui peuvent s'appliquer aux systèmes informatiques. Afin d'illustrer concrètement ce que peut être l'organisation d'un système informatique, on reprend de la synthèse de [Baeijs and Demazeau, 1996] les 3 modèles d'organisation les plus simples :

- la forme la plus simple d'organisation est le *groupe*. Les membres d'un groupe ne sont pas à proprement liés mais constituent une liste d'agents, ce qui permet de grouper les communications ;
- une forme plus évoluée est la *hiérarchie*. Les membres d'une hiérarchie sont liés par des liens unidirectionnels de type maître-esclave. Chaque « maître » ayant un objectif à accomplir peut demander à ses « esclaves » compétents d'accomplir des sous-objectifs ;
- enfin des organisations en forme de *contrat* lient entre eux des agents par des rôles définis par rapport à une offre et une demande. Par exemple dans l'organisation de marché,

des agents producteurs sont liés à des agents consommateurs. Les consommateurs sélectionnent parmi les producteurs celui ayant la meilleure offre par rapport à la fonction qu'ils souhaitent faire exécuter. Ce type d'organisation constitue la base des protocoles de négociation entre agents.

Retour sur les niveaux d'organisation Au chapitre précédent, le niveau d'organisation a été défini comme *un point de vue sur un ensemble d'entités accomplissant une certaine fonction à l'intérieur d'une unité structurelle pertinente*. La notion d'organisation, telle qu'elle vient d'être définie, correspond bien à l'idée d'un niveau de description transversal et intermédiaire entre le niveau individuel et le niveau global. La notion de niveau d'organisation permet d'introduire un « découpage » de l'organisation globale du système.

On peut redéfinir un **niveau d'organisation** d'un système comme un sous-ensemble de l'organisation du système cohérent par rapport à une fonction et/ou à une échelle.

Les niveaux d'organisation ne constituent pas une partition de l'organisation. Ils peuvent se chevaucher, et être définis de manière multiple selon le point de vue adopté.

2 Choix d'un formalisme organisationnel

Les formes d'organisation théoriques présentées à la fin de la section précédente, destinées à résoudre des problèmes opérationnels, sont trop rigides et trop déterminées pour convenir à la diversité des formes de niveaux d'organisation que nous souhaitons modéliser. Il faut donc s'intéresser à une caractérisation plus abstraite des organisations, par le biais de formalismes ou de méta-modèles.

Définitions

Un **formalisme** est défini comme un système symbolique définissant des règles pour manipuler des objets sans avoir besoin de se référer au contenu des objets ni au contexte [Heylighen, 1999].

Un **méta-modèle** est défini comme un modèle permettant de manipuler des modèles (le préfixe méta signale un niveau de description supérieur) : le méta-modèle décrit ce qu'est une organisation ou un rôle, le modèle décrit les organisations ou les rôles du système-cible. Enfin l'**architecture** d'un système informatique désigne la structure du système, la manière dont ses composants sont arrangés (son organisation!).

2.1 Caractéristiques d'un formalisme organisationnel

Les formes d'organisation que nous avons décrites correspondent à des modèles conceptuels, qui ne se concrétisent pas forcément dans le système multi-agent implémenté. L'organisation est d'abord une vue du concepteur lui permettant de structurer son système, comme l'illustre la figure 4.

On s'intéresse aux **formalismes organisationnels**, qui définissent des cadres formels pour manipuler des concepts organisationnels dans les SMA. Le concept de rôle en particulier est

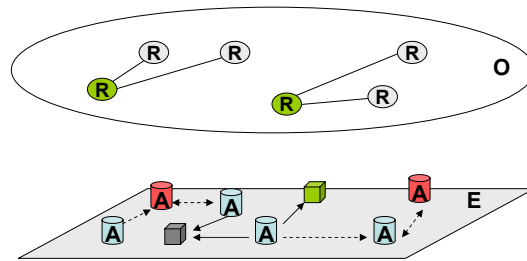


FIG. 4 – L’organisation comme vue conceptuelle sur un SMA : les pions dans le plan représentent des agents « réels » (A) qui communiquent dans leur environnement (E). L’organisation (O) constitue un niveau d’abstraction supplémentaire en offrant un point de vue fonctionnel à travers des rôles et les relations entre ces rôles

utilisé pour qualifier la fonction ou la place d’un agent dans le système²². Les approches SMA organisationnelles se distinguent principalement sur :

- la capacité du formalisme à manipuler des organisations évolutives : des formalismes que nous qualifierons de **prédéterminés** définissent l’ensemble des rôles et relations possibles des organisations ; des formalismes que nous qualifierons d’**évolutifs** proposent des mécanismes d’auto-organisation (identification de fonctions et construction automatique de rôles durant la simulation) ;
- la manière dont le formalisme traduit les rôles : dans les formalismes que nous qualifierons de **symboliques**, les rôles sont traduits sous la forme de contraintes que les agents interprètent ; dans les formalismes que nous qualifierons de **comportementaux**, les rôles sont traduits sous la forme de comportements que les agents peuvent choisir de mettre en œuvre.

Ce critère rejoint la distinction point de vue fonctionnaliste / point de vue interactionniste sur les organisations : dans le cas symbolique, l’organisation contraint le comportement des agents, alors que dans le cas comportemental, l’organisation est définie par le comportement adopté par les agents ;

- le niveau d’explicitation du formalisme : dans les formalismes que nous qualifierons d’**implicites**, les concepts organisationnels sont explicités dans les modèles conceptuels, puis sont intégrés dans les agents au niveau opérationnel ; dans les formalismes que nous qualifierons d’**explicites**, les concepts organisationnels sont explicites jusqu’au niveau opérationnel ;
- la capacité du formalismes à définir des organisations dynamiques : les formalismes que nous qualifierons de **statiques** définissent des systèmes où les agents adoptent la structure d’une organisation de la même manière tout au long de la simulation ; les formalismes que nous qualifierons de **dynamiques** définissent des systèmes où les agents peuvent changer de rôles durant la simulation, et où la structure de l’organisation peut donc évoluer. Cela ne signifie pas pour autant que l’organisation est évolutive : les rôles pris en charge peuvent tous être définis dès le début de la simulation ;
- la capacité du formalisme à gérer plusieurs niveaux d’organisation : les formalismes que

²²Les acceptions informatiques du concept de rôle reposent sur l’inspiration sociologique (registre de comportement correspondant à une fonction dans une organisation) mais diffèrent d’un formalisme à l’autre. Dans la plupart des cas, un rôle informatique désigne un concept plus général de place dans l’organisation du système informatique.

nous qualifierons de **mono-organisationnels** considèrent le système comme une seule organisation ; les formalismes que nous qualifierons de **multi-organisationnels** considèrent autant d'organisations que de points de vue dans le système ;

- le degré de spécificité du formalisme : les formalismes que nous qualifierons de **spécifiques** ne permettent de manipuler que certains schémas d'organisations (hiérarchies ou marchés par exemple) ; les formalismes que nous qualifierons de **génériques** permettent de définir des schémas d'organisation ad hoc.

En reprenant les exigences du cahier des charges défini à la fin du chapitre 1, on peut d'ores et déjà dresser un portrait-robot d'un formalisme organisationnel susceptible de répondre à nos attentes.

Exigences du cahier des charges face aux critères de distinction :

1. pouvoir représenter des niveaux d'organisation physiques comme des niveaux d'organisation sociaux : le formalisme doit être aussi **générique** que possible
2. manipuler de manière modulaire les objets organisationnels : le formalisme doit être **explicite**, afin que les objets organisationnels soient toujours présents au niveau opérationnel
3. représenter des niveaux d'organisation transitoires : le formalisme doit être **dynamique**
4. modéliser des niveaux d'organisation qui se chevauchent : le formalisme doit être **multi organisationnel**
5. expliciter règles, comportements et interactions dans les différents niveaux d'organisation : l'objectif étant de structurer la description d'un système réel, le formalisme sera **prédéfini** d'une part, et un formalisme **comportemental** sera mieux adapté à l'explicitation de règles et de comportements (nous reviendrons plus longuement sur cet argument par la suite).

La prochaine partie dresse un état de l'art non exhaustif de formalismes et d'approches organisationnelles que nous examinerons à la lumière des critères que nous venons de définir.

2.2 Approches organisationnelles en informatique et en modélisation

Nous avons distingué 3 objectifs recherchés par l'utilisation d'approches organisationnelles dans des SMA :

1. Assurer la coordination d'agents a priori non coopératifs dans un environnement partagé ;
2. Concevoir la coopération d'agents devant accomplir une tâche collective ;
3. Gérer l'interaction de sous-systèmes dans un système plus global.

Dans tous les cas, la dimension organisationnelle, en proposant de structurer des ensembles récurrents d'interactions sous forme de relations entre des rôles, permet au concepteur de spécifier une structure d'interaction à réaliser dans le système [Müller, 2002]. Toutefois, dans les 2 premiers cas, l'objectif est la conception d'une structure d'interaction permettant au système de fonctionner ou d'accomplir une tâche, alors que dans le 3ème, l'objectif est la représentation d'une structure d'interaction existante.

Ces différents objectifs peuvent coexister, et les approches se voulant génériques cherchent à englober les 3 objectifs. Le cahier des charges induit a priori un choix de formalisme visant l'objectif 3. Toutefois, on présentera des exemples pour chacun des 3 objectifs afin d'illustrer la variété des approches organisationnelles et de replacer notre choix dans un contexte informatique plus vaste.

Ces exemples sont classés suivant le contexte dans lequel l'approche est utilisée : modèles multi-agents destinés à la simulation, systèmes « opérationnels » (SMA utilisés au sein de logiciels, pour accomplir des tâches), ou encore méthodes de conception pour l'ingénierie logicielle. Suivant les contextes, l'approche organisationnelle utilisée a une portée plus ou moins générique. Dans les méthodes de conception, les concepts organisationnels sont définis dans des formalismes mais une architecture correspondante n'est pas forcément proposée. À l'inverse, dans les modèles et les systèmes opérationnels, les concepts organisationnels sont présents dans l'architecture, mais ne sont pas forcément abstraits en un formalisme.

2.2.1 Formalismes orientés vers la coordination dans un environnement partagé

Ces formalismes sont conçus pour que des agents puissent agir collectivement dans un environnement qui n'est pas connu à l'avance. L'organisation y contraint l'action des agents et assure qu'ils ne se gênent pas et puissent bénéficier les uns des autres.

Systèmes opérationnels [Castelfranchi *et al.*, 1999] proposent dans le cadre de la théorie des agents non coopératifs un formalisme basé sur des agents BDI²³ destiné à assurer l'adaptation d'agents à un environnement changeant. L'organisation se matérialise sous la forme de *normes*, qui sont des représentations symboliques. Les agents construisent une représentation des normes auxquelles ils sont soumis et peuvent choisir de les respecter ou pas. Le respect d'une norme se traduit par la génération de plans et d'objectifs conformes à cette norme. Les agents suivent une norme si ils font de ces plans des intentions. Ils peuvent donc faire face à des normes incohérentes. Les agents peuvent aussi générer des normes.

[Sallé, 2002] présente un formalisme appliqué au commerce électronique. Les niveaux d'organisation sont des contrats utilitaristes délibératifs « classiques » (protocoles d'interaction). En s'engageant dans un contrat, l'agent prend un rôle défini en logique déontique comme un ensemble d'assertions du type *si condition alors {obligation, permission, interdiction} de faire action tant que condition*. Chaque assertion est assortie de sanctions définies aussi en logique déontique. L'agent choisit de suivre son rôle en faisant la balance entre l'utilité de l'assertion et la sanction assortie. Il communique ses choix à ses partenaires.

2.2.2 Formalismes orientés vers l'accomplissement d'une tâche collective

Ces formalismes sont conçus pour que les agents soient capables de résoudre collectivement des problèmes ou d'accomplir un ensemble de tâches (planification), définis ou pas à l'avance. L'organisation assure la répartition du travail entre les agents.

Méthodes de conception [Collinot *et al.*, 1996] présente la méthode Cassiopeia, destinée à concevoir des systèmes devant collectivement accomplir une tâche ou résoudre un problème. Dans une première étape, la méthode consiste à identifier les comportements élémentaires nécessaires à l'accomplissement de la tâche, puis à construire différents types d'agents en regroupant ces

²³Belief Desire Intention. Architecture cognitive d'agent standard déjà évoquée p.45. Ce formalisme organisationnel rajoute une dimension sociale à l'architecture BDI.

comportements dans des « rôles » . Dans une deuxième étape, un graphe d'influence est produit en listant les dépendances entre les rôles. Les rôles ainsi liés entre eux constituent des groupes qui définissent un comportement collectif. Dans une dernière étape, les comportement visant à former, maintenir et dissoudre les groupes sont définis. Ces 3 étapes correspondent à 3 niveaux de description et 3 types de rôles : individuels, relationnels et organisationnels. Ainsi, un agent qui fait face à une tâche peut former un groupe et mobiliser les rôles d'autres agents nécessaires à l'accomplissement de la tâche.

Systèmes opérationnels Dans MOISE, [Hübner *et al.*, 2002] introduisent un formalisme organisationnel également défini sur 3 niveaux : (1) un niveau individuel définit des rôles qui sont des ensembles de permissions ou d'obligations sur des missions à accomplir (2) un niveau social définit des liens entre ces rôles qui peuvent être des liens hiérarchiques ou des liens de communication (3) un niveau collectif définit des groupes qui sont formés d'ensembles rôles, liens, mission. Ainsi, l'accomplissement d'une tâche correspond à l'activation d'un groupe. MOISE est destiné à être couplé avec des agents de type BDI.

Avec DEPINT, [Sichman, 1998] définit une architecture basée sur le raisonnement social, destinée à ce que des agents en système ouvert puissent évaluer des tâches faisables et former des coalitions. Ces coalitions forment une structure de groupe définie dynamiquement grâce à des réseaux de dépendances : un agent ne pouvant accomplir seul une tâche recherche dans son réseau de connaissances des agents ayant les compétences requises. Il en devient alors dépendant. Un agent apportera de l'aide de préférence à un agent dont il est également dépendant, si bien que des coalitions stables peuvent se former.

Simulations [Doran, 2001] présente une architecture destinée à simuler la gestion intégrée d'un bassin versant. Il utilise des agents BDI représentant des acteurs du monde réel, et organisés en hiérarchies. Un rôle dans une hiérarchie définit des buts auxquels un agent doit se conformer, et des récompenses associées à l'accomplissement du but. L'agent au sommet d'une hiérarchie se voit confier des buts globaux, représentant l'intérêt de toute la hiérarchie. Il décompose ces buts en buts plus locaux qu'il confie aux agents qu'il commande et ainsi de suite. Un agent prend en charge un rôle si il pense qu'il en tirera une récompense suffisante. Chaque hiérarchie est associée à une sphère d'activité spécifique, définie par un ensemble d'éléments de l'environnement auxquels les agents de la hiérarchie ont accès. Ces sphères d'activité se superposent, créant une compétition sur les ressources. [Doran, 2001] n'aborde pas la possibilité pour un agent d'appartenir à plusieurs hiérarchies.

2.2.3 Formalismes orientés vers la gestion de sous-systèmes

Cette catégorie est plus générale que les 2 précédentes. L'organisation peut y structurer la complexité du système multi-agent et/ou offrir des motifs réutilisables (motifs organisationnels) plus étendus que ceux offerts par le seul concept d'agent.

Méthodes de conception La méthode Gaïa de [Wooldridge *et al.*, 2000] est destinée à concevoir des applications logicielles ayant une structure organisationnelles stable. Gaïa utilise des concepts organisationnels lors de la phase d'analyse pour revenir à une architecture agent classique lors de l'implémentation. Les rôles clés qui doivent être accomplis dans le système à concevoir sont documentés en détail, avec les activités qu'ils définissent, les protocoles auxquels ils prennent part, les permissions d'accès aux ressources qu'ils induisent, ainsi que les comportements que l'on attend d'eux. Les motifs d'interactions composant le système sont aussi

documentés en détail, avec les rôles qui y sont impliqués et les informations qu'ils utilisent. Lors de la phase de conception, les rôles sont regroupés dans des agents, et des vues sur les services du système et les liens entre les agents sont définies. Les modèles de rôles et d'organisations (les protocoles d'interaction) disparaissent à l'implémentation, encapsulés dans les agents. La différence essentielle entre Gaïa et Cassiopeia est que Cassiopeia implémente une approche ascendante, en construisant des comportements et un graphe d'interaction à partir de tâches élémentaires, alors que Gaïa implémente une approche descendante, en commençant par définir des tâches et des protocoles globaux et en raffinant la description vers des comportements élémentaires.

La méthode Voyelle [Demazeau, 1995] inclut aussi une vue organisationnelle, mais les différentes briques sont définies à un niveau individuel ou inter-individuel. Pour [Amiguet, 2003] ces briques ont un grain trop fin pour être véritablement réutilisables.

Systèmes opérationnels [Ferber and Gutknecht, 1998] présentent un méta-modèle destiné à gérer l'hétérogénéité des agents et des applications dans un SMA nommé Agent-Groupe-Rôle (AGR)²⁴. Des structures de groupe définissent un ensemble de rôles et toutes les interactions possibles entre ces rôles. Des structures organisationnelles définissent toutes les structures de groupe, ainsi que les interactions possibles entre les rôles de différents groupes. Ce méta-modèle s'instancie en une architecture nommée Agent-Groupe-Rôle (AGR), où groupes et rôles sont définis au niveau de l'implémentation, sans présupposé sur l'architecture des agents. Les groupes forment des sous-systèmes à l'intérieur desquels les agents interagissent par le biais de rôles qu'ils y ont pris en charge. L'interaction entre les sous-systèmes est localisée dans les agents prenant en charge des rôles dans différents groupes.

Simulation Dans SHADOC, [Barreteau, 1998] définit des groupes pour représenter des entités collectives de gestion des périmètres irrigués. À ces groupes sont associées des règles que les agents appartenant à ces groupes sont amenés à respecter. De plus, les agents ont une représentation de leur statut social ainsi que de leurs connaissances, ce qui forme un autre niveau organisationnel.

La plate-forme BIOMAS [Courdier *et al.*, 2002] définit 3 niveaux de description d'un système : un niveau macro où sont définis les réseaux d'acointances (graphes avec des liens pondérés sur la priorité des communications) du système ; un niveau medium où des groupes définissent des sous-systèmes qui peuvent synthétiser des comportements ou poser des contraintes sur des agents ; un niveau micro avec des agents et des objets situés reliés par des relations spatiales. Il est aussi possible d'associer des rôles, représentant des fonctions à accomplir, aux agents.

Enfin, dans la simulation de ruissellement par la circulation de boules d'eau, [Servat *et al.*, 1998] introduisent des entités représentant des échelles de description différentes : sous certaines conditions, les boules d'eau peuvent se regrouper en une entité collective (mare, ravine..) agissant à leur place.

2.3 Conclusion

Les différents formalismes présentés sont examinés dans le tableau 5 selon les critères de distinctions établis au 2.1.

Reprenons les 5 points du cahier des charges (voir 2.1) :

²⁴Dans cet article, AGR est en fait présenté comme une architecture instanciant un méta-modèle nommé AALAADIN. Dans des articles ultérieurs, les auteurs ne se réfèrent plus qu'à AGR pour désigner leur formalisme. On cite l'appellation AALAADIN, à laquelle des articles se réfèrent parfois pour mémoire, mais, pour la commodité de la lecture on n'utilisera que l'appellation AGR dans le document.

	Application	Degré de spécificité	Niveau d'explicitation	Organisations dynamiques	Superposition n.o.	Organisations évolutives	Nature des rôles	
Méthodes de conception								
	Cassiopeia [Colinot et al., 1996]	Résolution de problèmes	Générique	Implicite	Oui	Non	Non	Comportementaux
	Gaia [Wooldridge et al., 2000]	Génie logiciel	Générique	Implicite	Non	Oui : encapsulé dans les agents	Non	Comportementaux
	Voyelles [Demaizeau, 1995]	Génie logiciel	Générique	Implicite	Non	Non	Non	Comportementaux
Systèmes opérationnels								
	[Castelfranchi et al., 1999]	Théorie SMA	Organisations sociales	Normes explicites	Oui	Oui : Adoption de plans	Oui	Symbolique (normes)
	[Sallé, 2002]	Commerce électronique	Contrats	Contrats explicites	Non	Non	Non	Comportementaux
	MOISE [Hübner et al., 2002]	Réalisation de tâches	Organisations sociales	Tâches explicites dans des groupes	Oui	Non	Non	Symboliques (définition de tâches)
	[Siehman, 1998]	Réalisation de tâches	Coalitions	Implicite	Oui	Oui : appartenance à coalitions multiples	Oui	Symbolique (tâches)
	AGR [Ferber and Gutknecht, 1998]	Génie logiciel	Générique	Groupes et rôles explicites	Oui	Oui : rôles simultanés dans différents groupes	Non	Non précisé
Modèles ou plate-formes de simulation								
	[Doran, 2001]	gestion intégrée de bassin versant	Niveaux sociaux	Hierarchies explicites	Non	Oui : sphères d'activité communes aux hiérarchies	Non	Symboliques (Buts)
	Shadoc [Barreteau, 1998]	modèles d'organisation des périmètres irrigués	périmètres irrigués	groupes explicites mais modes d'organisation implicites dans les agents	Non	Oui : combinaison de règles	Non	Comportementaux
	Biomass [Courdier et al., 2002]	échanges dans systèmes de production	Générique	Groupes explicites, relations spatiales définies séparément	Non	Oui : contraintes issues de différents groupes	Non	Symboliques
	[Servat et al., 1998]	Méier des échelles de description	Dynamiques hydrauliques	entités collectives explicites	Oui	Non	Oui	Comportementaux

TAB. 5 – Tableau récapitulatif des propriétés et caractéristiques des formalismes organisationnels cités

1. le formalisme doit être suffisamment générique pour représenter des niveaux d'organisation physiques comme des niveaux d'organisation sociaux : ce critère élimine toutes les applications trop spécialisées.
Parmi les systèmes opérationnels, [Castelfranchi *et al.*, 1999], [Hübner *et al.*, 2002] et [Ferber and Gutknecht, 1998] définissent véritablement des formalismes organisationnels, mais seul le méta-modèle AGR de [Ferber and Gutknecht, 1998] est véritablement générique puisqu'il ne préjuge ni du type d'application ni des architectures d'agents utilisées.
Aucune des applications à la simulation n'utilise des concepts organisationnels à la fois sur des aspects sociaux et des aspects physiques. [Courdier *et al.*, 2002] portent toutefois des concepts organisationnels jusqu'au niveau de la plate-forme de modélisation ;
2. le formalisme doit être explicite afin qu'il permette de manipuler des niveaux d'organisation de manière modulaire. Ce critère disqualifie les 3 méthodes conception, qui ne proposent pas d'architecture organisationnelle correspondant au formalisme de description qu'elles définissent. Parmi les systèmes opérationnels et les applications de modélisation, seul AGR propose une structure organisationnelle explicite véritablement générique.
L'examen de ces 2 premiers critères suffit à qualifier le formalisme AGR, qui se distingue par sa pureté et sa généricité. On se contentera donc de vérifier qu'il satisfait les 3 critères suivants ;
3. le formalisme doit être dynamique : AGR prévoit des mécanismes pour la gestion dynamique de modification de la structure organisationnelle d'un système (création ou destruction de groupes, prise en charge ou abandon de rôles) ;
4. le formalisme doit être multi-organisationnel : AGR prévoit que plusieurs groupes puissent coexister dans un système, et interagir par le biais d'agents prenant en charge simultanément des rôles dans ces différents groupes ;
5. le formalisme doit être comportemental : [Ferber and Gutknecht, 1998] ne précisent quelle est la nature des rôles d'AGR. [Ferber *et al.*, 2003] recommandent que la structure organisationnelle d'un système soit purement symbolique. Il reste toutefois possible de spécifier le formalisme AGR dans une optique comportementale.

L'examen des différents critères définis par le cahier des charges qualifie largement le formalisme AGR de [Ferber and Gutknecht, 1998], qui se distingue des autres approches organisationnelles par sa généricité et sa simplicité.

On utilisera donc le formalisme AGR comme support de modélisation pour structurer les niveaux d'organisation dans des modèles de gestion de l'eau.

3 Le formalisme AGR

3.1 Définitions et propriétés

Le formalisme AGR est introduit et défini dans [Ferber and Gutknecht, 1998] et développés de manière extensive dans la thèse d'Olivier Gutknecht [Gutknecht, 2001]. [Ferber *et al.*, 2003] introduisent quelques définitions complémentaires et proposent une méthodologie d'utilisation d'AGR plus consistante.

3.1.1 Introduire de la socialité pour gérer l'hétérogénéité des systèmes : ACMAS et OCMAS

L'introduction d'AGR part du constat que les approches orientées agent classiques, centrées sur la définition des comportements individuels des agents, peinent à gérer l'hétérogénéité et l'ouverture des systèmes informatiques : comment faire coopérer des agents parlant des langages différents dans un environnement informatique ouvert tel que Internet, comment gérer de manière souple et modulaire la collaboration d'applications hétérogènes dans un système informatique ? Ces préoccupations englobent les différents objectifs visés par les approches organisationnelles présentées dans la section précédente.

Pour Ferber et Gutknecht, une réponse générique à ces problèmes passe par une approche purement sociale, où l'on s'abstrait totalement de l'architecture interne des agents pour ne plus s'intéresser qu'à leur organisation. [Ferber *et al.*, 2003] introduit les acronymes ACMAS pour Agent Centered Multi-Agent System et OCMAS pour Organization Centered Multi-Agent System pour opposer les approches agents « classiques » des SMA aux approches organisationnelles, et pose les principes d'une approche OCMAS :

- un formalisme organisationnel pose une structure sur l'activité des agents mais ne décrit pas cette activité. Il ne contient que des spécifications, pas de code ;
- les rôles décrits par l'organisation ne définissent que des comportements attendus. La manière dont ces comportements sont mis en œuvre doit rester du domaine des agents (indépendance organisation - architecture des agents) ;
- l'organisation définit des sous-systèmes qui sont opaques les uns vis à vis des autres : les agents intervenant dans un sous-système sont libres d'interagir entre eux, mais les interactions ayant lieu dans des sous-systèmes où ils n'interviennent pas leurs sont invisibles.

On peut alors voir un OCMAS comme une structure organisationnelle, où les agents, vus comme des composants, peuvent venir s'emboîter. En s'emboîtant dans une même couche de la structure, des agents peuvent ainsi communiquer (solution à une hétérogénéité de langages). En s'emboîtant entre 2 couches, un agent peut créer un lien entre ces 2 couches (solution à une hétérogénéité des applications).

3.1.2 Présentation du formalisme AGR

Le formalisme AGR est présenté comme un modèle possible d'OCMAS. Il s'articule autour des notions d'Agent, de Groupe, et de Rôle.

Définitions

Les axiomes de définition d'AGR sont les suivants :

- l'**Agent** : il est défini classiquement comme une entité active communicante, sans présupposé sur son architecture interne. Un agent prend en charge des *rôles* dans des *groupes*. Un agent peut prendre en charge simultanément plusieurs rôles dans plusieurs groupes (*composition* de rôles) ;
- le **Groupe** : c'est un ensemble d'agents interagissant par le biais de leurs rôles. Un groupe est une instance d'une **structure de groupe**. Une structure de groupe définit l'ensemble des rôles qui peuvent être tenus dans le groupe, ainsi que l'ensemble des interactions entre ces rôles. Un groupe peut n'instancier qu'une partie des rôles définis par la structure de groupe, ou bien instancier plusieurs fois un même rôle. Un agent devient membre d'un groupe en prenant un rôle en charge. Deux agents ne peuvent communiquer que s'ils sont membres d'un même groupe, et deux groupes ne peuvent communiquer que par le biais d'un agent qu'ils partagent ;
- le **Rôle** : c'est la représentation abstraite de la fonction d'un agent dans un groupe^a. Les rôles sont locaux aux groupes dans lesquels ils sont définis. Un rôle définit sa multiplicité ainsi que d'éventuels autres rôles auxquels sa prise en charge est liée. Dans le respect de ces contraintes, un rôle peut être pris en charge de manière multiple et indépendamment des autres rôles.

^aCette définition du rôle est moins explicite que la définition « sociologique » (registre de comportements correspondant à une fonction dans une organisation). Elle garde toutefois la signification que le rôle est ce que l'individu donne à voir aux autres membres de la collectivité.

Les principes du formalisme AGR sont schématisés sur la figure 5. Ce schéma souligne la souplesse et la modularité apportée par l'abstraction du groupe dans la description d'un système, puisque les groupes s'instancient de manière dynamique et variée selon que certains ou tous leurs rôles sont pris en charge, de manière simple ou multiple.

La figure 6 illustre la structuration apportée par le formalisme AGR en présentant côte à côte un système structuré avec AGR et son équivalent sans structuration organisationnelle : la structuration organisationnelle apporte une dimension supplémentaire, si bien que le système sans AGR se représente comme une « vue du dessus » (une projection au sens géométrique) du système avec AGR.

On vérifie bien que le formalisme AGR respecte notre cahier des charges :

1. aucun présupposé n'est fait sur la nature des rôles des agents ou des groupes, le formalisme est totalement générique ;
2. Les groupes et les rôles constituent des entités définies du niveau conceptuel jusqu'au niveau opérationnel. La modularité est renforcée par le fait que les différents rôles d'une structure de groupe peuvent être pris en charge indépendamment les uns des autres ;
3. le formalisme est particulièrement orienté vers la simulation de dynamiques organisationnelles, et des mécanismes d'acceptation ou d'exclusion des groupes sont spécialement prévus ;
4. la prise en charge de rôles multiples par un agent dans différents groupes est autorisée. Les groupes peuvent ainsi se chevaucher ;
5. la structuration induite par les groupes et les rôles amène un premier niveau d'explicitation. La nature du contenu des rôles n'est pas précisée.

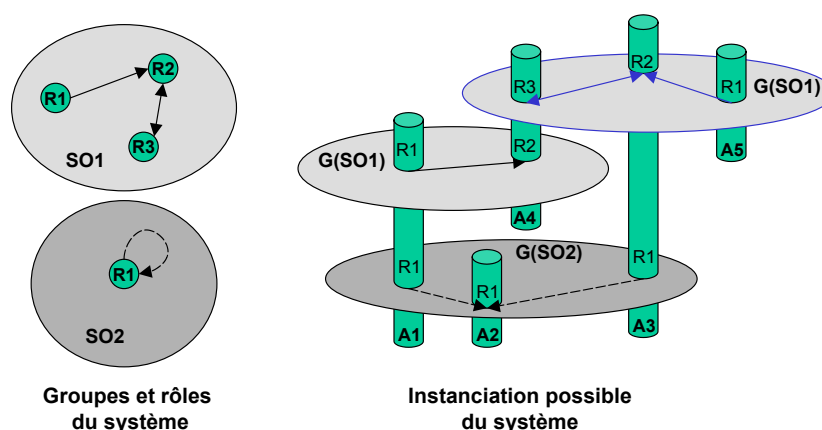


FIG. 5 – Illustration du formalisme AGR : un système est décrit abstraitement par deux structures de groupe, SO1, qui définit 3 types de rôles, et SO2, qui en définit 1 seul. Une instanciation possible de ce système abstrait avec 3 groupes, dont 2 instances de SO1, est montrée dans une représentation de type « cheeseboard » (d’après [Ferber and Gutknecht, 1998]) : les agents sont représentés par des pions traversant les plateaux représentant des groupes où ils prennent en charge des rôles. Par exemple l’agent A4 prend en charge un rôle R2 dans une instance de SO1 et un rôle R3 dans une autre.

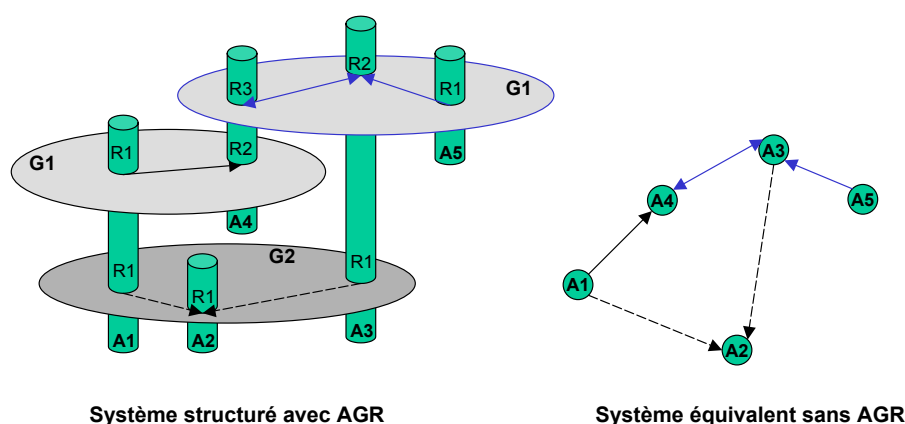


FIG. 6 – Illustration de la structuration apportée par AGR

Il est maintenant possible d’expliciter la manière d’utiliser le formalisme AGR et ses apports potentiels à une problématique de prise en charge de niveaux d’organisation dans des modèles de gestion de l’eau.

3.1.3 Apports attendus du formalisme AGR

Application des concepts AGR à la modélisation de systèmes complexes L’analogie entre le point de vue proposé par AGR et l’analyse que nous souhaitons mener en terme de niveaux d’organisation se fait de manière directe :

- les **niveaux d’organisation** d’un système sont représentés par des **groupes** : le comportement d’un niveau d’organisation est décrit par les comportements des rôles du groupe

correspondant ;

- les **comportements** individuels dans des niveaux d'organisation sont représentés par des **rôles** : les rôles définissent des motifs de comportements propres à des niveaux d'organisation et les agents interviennent sur le choix et la mise en œuvre de ces motifs ;
- l'**implication** d'une entité dans **plusieurs niveaux d'organisation** revient à une **superposition de rôles**.

Les hypothèses que nous faisons sur les bénéfices que nous pourrions tirer de l'utilisation d'AGR sont alors de trois ordres : structuration du système (expressivité sur un plan statique), localisation des dynamiques (expressivité sur un plan dynamique) et apparition d'une modularité fonctionnelle et organisationnelle.

Apports en termes d'expressivité, aspects statiques Le schéma de la figure 5 souligne que le concept de groupe permet de **décrire chaque niveau d'organisation de manière indépendante**, comme un sous-système, et de porter cette description jusqu'au modèle opérationnel. La structuration globale résultante **rend plus lisible la participation des agents dans les différents niveaux d'organisation où ils sont impliqués**.

Au niveau individuel, l'utilisation de rôles permet de **discriminer fonction et identité**, ce qui apporte une réponse à d'éventuels problèmes de classification.

Apports en termes d'expressivité, aspects dynamiques D'un point de vue dynamique, chaque **niveau d'organisation** voit son comportement décrit par les **interactions « horizontales »** entre les rôles qui sont pris en charge dans le groupe correspondant, alors que les **interconnexions** entre niveaux d'organisation sont localisées dans des **interactions « verticales »**, entre les rôles pris en charge par les agents intervenant dans ces niveaux (schéma fig. 7).

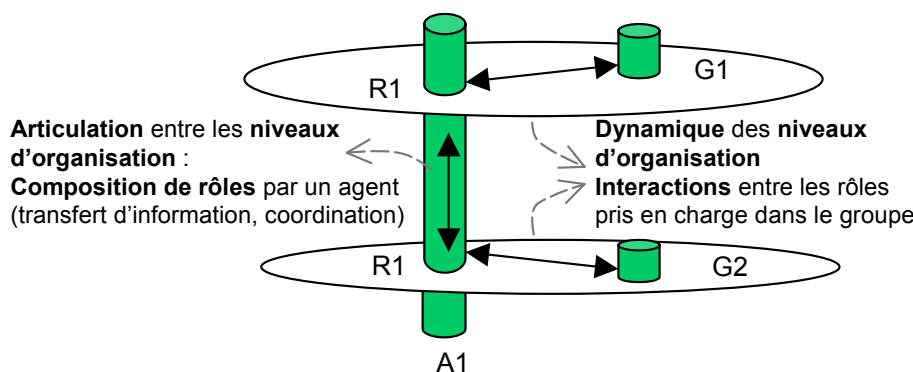


FIG. 7 – Le formalisme AGR permet de modéliser comportements dans un niveau d'organisation et interconnexions entre niveaux d'organisation par des interactions orthogonales

En prenant en charge un rôle dans un groupe, un agent gagne un accès à l'information contenue dans le niveau d'organisation correspondant, ainsi qu'une capacité d'action dans ce niveau : l'articulation entre les niveaux d'organisation se localise dans le **passage d'information** au niveau d'entités communes.

La prise en charge simultanée par un agent de rôles dans différents niveaux d'organisation permet de mettre en œuvre un **couplage inter-dimensionnel** : chaque niveau d'organisation correspond à une dimension d'un système complexe (un point de vue, une échelle), et la

représentation des interactions entre ces niveaux d'organisation correspond à un couplage inter-dimensionnel. La question des couplages inter-dimensionnels est récurrente dans la modélisation de systèmes complexes (voir par exemple [Castelfranchi, 2001] et la question du passage lien micro-macro dans les systèmes sociaux, ou [Lovell *et al.*, 2002] et la question de l'interconnectivité des échelles dans les systèmes de grn). Le formalisme AGR permet d'instrumentaliser ce couplage dans la **composition de rôles** mais ne le résout pas pour autant puisqu'il reste encore à faire en sorte que les agents sachent gérer ces compositions de rôles et les sollicitations éventuellement contradictoires de leurs rôles.

Apports en termes de modularité Structures de groupe et rôles sont des briques de description réutilisables supplémentaires par rapport à une architecture agent classique. La dynamique d'un système peut se construire de manière souple en emboîtant les agents dans ces briques (figure 8). Là encore si AGR permet d'instrumentaliser un nouveau type de modularité, il faudra résoudre les problèmes liés à la prise en charge de rôles multiples pour que cette modularité soit réellement opérationnelle.

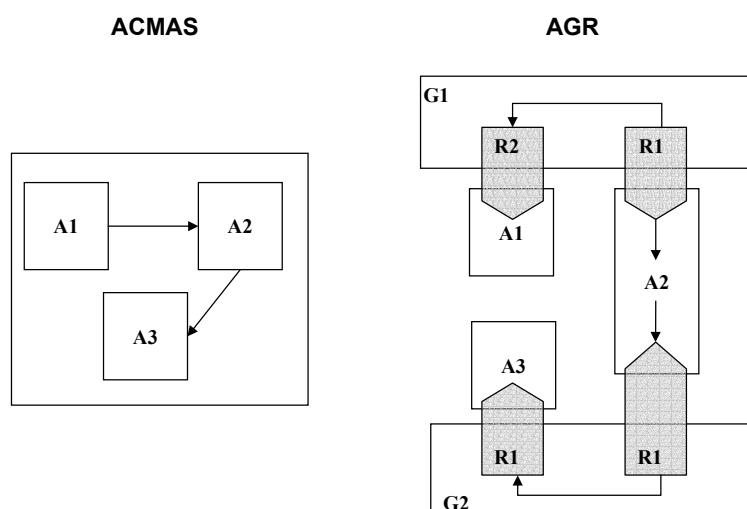


FIG. 8 – AGR et modularité : les rôles sont des briques de comportement, et les structures de groupe forment des briques d'interaction. Pour reconstruire la dynamique d'un système, il « suffit » d'emboîter les agents dans les groupes portant les interactions voulues.

Ainsi le système simulé peut être modifié niveau d'organisation par niveau d'organisation, et il devient possible de décrire des généralités à un niveau individuel (les agents), fonctionnel (les rôles) et organisationnel (les structures de groupe).

Le formalisme AGR permet une approche de modélisation correspondant à nos préoccupations du chapitre 1 (voir schéma 2) : les groupes permettent de manipuler de manière explicite et indépendante les niveaux d'organisation du système, alors que les agents ne représentent plus que les caractéristiques propres des acteurs, et définissent leurs comportements dans un niveau d'organisation par le choix de rôles qu'ils y prennent en charge.

Nous faisons l'hypothèse que la structuration ainsi amenée dans la description des entités et des interactions améliore l'expressivité des modèles et que les groupes et les rôles constituent des briques organisationnelles et fonctionnelles qui en améliorent la modularité.

3.1.4 Commentaires

Un méta-modèle générique La force et la pertinence du formalisme AGR réside dans sa simplicité et sa généricité : AGR propose de décrire l'organisation d'un système uniquement par sa structuration en groupes et en rôles, et laisse l'utilisateur libre de définir l'architecture concrète des agents et des rôles. Ce travail d'instanciation du méta-modèle AGR en une architecture adaptée à des applications de modélisation pour la gestion de ressources constitue la base des développements de cette thèse, et sera décrit au chapitre 4.

Rôles comportementaux ou rôles fonctionnels ? Dans sa définition des principes des OCMAS, [Ferber *et al.*, 2003] postule clairement que les rôles ne doivent pas renfermer de code, et ne définir que des comportements attendus. Ceci correspond à une vue *fonctionnelle* des approches organisationnelles, où un agent signifie son appartenance à un groupe en endossant des responsabilités, des dépendances, des objectifs. Les rôles décrivent alors une norme symbolique que l'agent doit s'efforcer de suivre, et les groupes représentent des contextes sociaux.

Nous nous écartons du principe des OCMAS qui postule que les éléments organisationnels doivent structurer les dynamiques sans les décrire en adoptant une vue *comportementale*, plus proche de la définition sociologique du rôle, où un agent signifie son appartenance à un groupe en endossant un élément de comportement décrit par le groupe. Les rôles décrivent une composante du comportement de l'agent, et les groupes représentent des unités d'interaction.

La première raison de ce choix est informatique : l'utilisation de rôles symboliques renforce la généricité de la structure de groupe mais induit que les agents soient en mesure d'interpréter ces rôles et aient donc une architecture cognitive relativement évoluée. Il y a donc une balance à faire entre généricité organisationnelle et complexité individuelle, et nous avons choisi de réduire la complexité individuelle.

La deuxième raison de ce choix tient à notre objectif de modélisation explicative : nous faisons le choix d'explicitier des règles et des interactions réparties sur différents niveaux d'organisation plutôt que de nous concentrer sur des aspects cognitifs plus individuels.

D'un point de vue méthodologique [Gutknecht, 2001] présente plusieurs types d'applications d'AGR, dont la simulation. Il voit bien AGR comme un moyen de décomposer un système aussi bien sur un axe structurel que sur un axe fonctionnel. Il propose des décompositions AGR du modèle Sugarscape de [Epstein and Axtell, 1996], sans aller plus loin.

Dans le cadre d'applications à la modélisation, [Ferber *et al.*, 2003] proposent des notations et une méthodologie, que nous reprendrons en partie dans le chapitre 4, sans spécifier plus avant les éléments du modèle AGR.

Une plate-forme AGR existante mais non adaptée Le modèle AGR a été implémenté par ses auteurs comme noyau de la plate-forme multi-agent en libre accès Madkit. Mais cette plate-forme suit les principes normatifs d'OCMAS : les rôles y sont implémentés comme des étiquettes, et les groupes comme des ensembles référencés d'agents. Nous avons donc fait le choix de ne pas utiliser Madkit et de réimplémenter une architecture AGR sur une autre plate-forme multi-agent.

Bilan Le tableau 6 présente un bilan des aspects conceptuels, informatiques et méthodologiques de l'approche AGR : quels en sont les éléments que nous retenons, ceux qui ne sont pas pertinents pour notre application, et enfin quelles sont les questions qui restent à résoudre.

AGR	Concepts	Architecture Informatique	Méthodologie
Éléments retenus		Groupes, Rôles, structure de groupe	Certains éléments de [Ferber <i>et al.</i> , 2003] (voir chapitre 4)
Éléments non pertinents	Rôles uniquement symboliques, ne décrivant pas de comportements	Madkit	
Questions à résoudre	Signification des groupes et des rôles	Composition de rôles	Méthodologie plus développée

TAB. 6 – Approche AGR : bilan

Le formalisme AGR apporte bien des objets organisationnels pertinents mais il reste encore à :

- d'un point de vue conceptuel, mieux préciser leur champ de modélisation ;
- d'un point de vue informatique, déterminer la nature des rôles et la manière de gérer leur composition ;
- proposer une méthodologie d'utilisation consistante.

3.2 Travaux liés à AGR

3.2.1 AGR et la simulation

Durand La thèse de Durand [Durand, 1996] est un travail précurseur dans la mise en œuvre de structures organisationnelles pour la modélisation et a en partie inspiré le modèle AGR. La recherche d'un nouveau mode de modélisation y est motivée par une problématique de représentation du système complexe constitué par la propagation d'épizooties dans des cheptels.

Son idée est de décomposer le système qu'il étudie en *points de vue* disciplinaires, et d'associer à chacun de ces points de vue un *schéma d'organisation*, qui est un ensemble de rôles décrivant les processus de ce point de vue.

Un agent s’exprimant sous plusieurs de ces points de vue voit ainsi son comportement décomposé en rôles qui représentent sa participation à chacun des points de vue. Un rôle décrit une liste d’activités. Le comportement d’un agent résulte de la somme des comportements de ses rôles si bien que l’agent n’a plus de comportement propre.

Ce travail montre bien comment les schémas d’organisation amènent une nouvelle dimension descriptive dans un modèle de système complexe. Ces schémas sont instanciés dans une simulation quand des agents prennent les rôles qu’ils définissent en charge (tableau 7).

	Niveau structurel	Niveau organisationnel
Niveau descriptif	classes des agents	schémas organisationnels : activités et accointances des rôles
Niveau exécutif	instanciation au sens objet	mise en œuvre du schéma organisationnel par prise en charge de leurs rôles par les agents

TAB. 7 – Niveaux introduits par Durand (d’après [Amiguet, 2003])

[Durand, 1996] fournit un formalisme très structuré, accompagné de diagrammes de conception adéquats, qui permet de détailler les différents niveaux d’action d’un rôle, ainsi que les différents niveaux de description du modèle.

Commentaires L’objectif de [Durand, 1996] était de construire un formalisme permettant d’intégrer différents niveaux d’organisation dans un modèle. Notre **logique de modélisation** est bien **similaire** à la sienne, mais en profitant du développement d’AGR, nous chercherons à mieux développer la modularité et la genericité d’une approche organisationnelle de la modélisation.

Si nous suivrons son choix de développer des **rôles comportementaux**, nous n’irons pas jusqu’à défaire les agents de toute caractéristique et de tout comportement propre : si les rôles représentent l’implication d’un agent dans un niveau d’organisation, l’agent doit conserver ce qui fait son identité (caractéristiques et comportements intrinsèques, décisions de prise en charge et d’activation des rôles). Nous reviendrons plus longuement sur ce sujet dans le chapitre 4 quand nous développerons la signification des concepts organisationnels.

Le formalisme de Durand conduit à des **spécifications très détaillées** (comportements élémentaires et liens entre les comportements élémentaires de différents types). Ce niveau de détail lui permet de proposer une **méthodologie graphique** d’utilisation du formalisme très complète, mais fait aussi que le formalisme, sans doute trop proche de l’implémentation, est trop rigide : un rôle ne peut être pris en charge que par un seul type d’agent, et les liens entre les différents rôles d’un schéma d’organisation sont spécifiés de telle manière qu’on ne peut les instancier indépendamment les uns des autres. Nous profiterons du formalisme AGR pour garder de la distance entre les modèles conceptuels et les questions d’implémentation et faire en sorte que les rôles et les groupes soient aussi génériques et modulaires que possible.

Le tableau 8 synthétise les aspects conceptuels, informatiques et méthodologiques du travail de Durand que nous retenons, et ceux que nous considérons comme non pertinents pour notre problématique.

Nous n’avons pu trouver dans la littérature d’autres exemples d’une application d’AGR à la simulation. Des modèles de simulation existent qui utilisent la plate-forme Madkit mais n’exploitent pas son architecture AGR. [Amblard, 1999] par exemple construit un modèle de dynamique décisionnelle dans des réseaux sociaux en agentifiant le concept de relation mais sans

Durand	Concepts	Architecture Informatique	Méthodologie
Éléments re- nus	Schémas d'organisation pour décrire des points de vue sur le système Rôles comportementaux		Utilisation de diagrammes de conception
Éléments mis de côté			
Éléments non pertinents	Agents sans autonomie	Rigidité des schémas d'or- ganisation	Niveau de détail des dia- grammes de conception

TAB. 8 – Formalisme de [Durand, 1996] : Bilan

mentionner l'utilisation de rôles ou de groupes.

3.2.2 Travaux complémentaires

MOCA (Modèle Organisationnel et Componentiel pour systèmes multi-Agents)

Relevant la nécessité de concrétiser rôles et mécanismes de prise en charge des rôles dans le formalisme AGR, Amiguet veut dans sa thèse [Amiguet, 2003] rendre l'approche opérationnelle dans le cadre du génie logiciel : il se donne pour but de donner un cadre formel aux rôles et à la prise de rôles multiples. Il enrichit pour cela l'approche organisationnelle d'AGR en la combinant à une approche « componentielle » : les rôles sont considérés comme des composants, c'est à dire comme des boîtes noires produisant un certain comportement et que l'on peut ajouter et enlever à loisir pourvu qu'on en connaisse les bornes d'entrées et de sortie.

Le résultat de son travail est une plate-forme SMA étendant Madkit et nommée MOCA. Les extensions réalisées par MOCA concernent principalement spécification et prise en charge des rôles :

- **les rôles sont des objets**, au même titre que les agents, décrivant des **comportements** à l'intérieur d'une organisation. Quand un agent prend en charge un rôle, il est contraint à suivre les comportements prescrits par ce rôle ;
- **les rôles sont des composants** que l'agent peut prendre en charge ou abandonner de manière dynamique. Un composant définit des **compétences** qu'il requiert pour être pris en charge, et des compétences qu'il fournit quand il est pris en charge. Ces compétences représentent ses bornes d'entrée et de sortie. Une compétence requise est une méthode que l'agent (ou un de ses rôles) doit implémenter pour prendre le composant en charge. Une compétence fournie est une méthode visible, un service, du composant ;
- Le **comportement d'un rôle** est décrit graphiquement par une représentation inspirée des diagrammes d'état UML²⁵. Ces diagrammes décrivent sur leurs transitions toutes les activations externes ou internes que peut recevoir un rôle et la réaction du rôle que ces activations provoquent. Ils permettent de séparer proprement description des interactions (parties graphique) et description des fonctions internes (code) ;

²⁵UML : Unified Modelling Language. UML est un langage formel aujourd'hui standard permettant d'exprimer ou d'élaborer des modèles orientés objet, indépendamment de tout langage de programmation. UML propose un support de notation graphique constitué de plusieurs types de diagrammes permettant d'exprimer différentes vues sur un modèle. De nombreux ouvrages de références décrivent le langage UML. Pour plus d'informations, on pourra se référer au site web d'UML <http://www.uml.org>, ou pour une présentation du langage et des notations qu'il propose en français <http://uml.free.fr>.

Le diagramme d'état décrit les changements d'état qu'un objet est susceptible de parcourir. Il prend la forme d'un graphe ou les états sont reliés par des arcs orientés représentant les transitions entre états.

- les interactions entre agents ne sont possibles que si les agents prennent en charge des rôles dans un même groupe ;
- ces interactions sont représentées par des envois d'**influences** : les agents n'effectuent pas directement des actions, mais produisent des influences, qui produisent éventuellement chez les agents récepteurs, combinées à d'autres influences reçues des changements d'état et des réactions (l'agent n'ouvre pas une porte, il la pousse, et la porte s'ouvre si un autre agent ne la pousse pas de l'autre côté) [Müller, 2002]. L'utilisation d'influence permet la gestion d'actions simultanées ;
- à l'intérieur d'un agent, la **gestion de rôles multiples** est assurée par un module spécial. Les conflits de rôles ayant lieu lorsque 2 rôles d'un même agent veulent accéder la même compétence, ce module s'occupe de fournir des primitives définissant des options de gestion des compétences en cours d'utilisation : gel total de la compétence, autorisation d'utilisation sous certaines conditions, pas de gel du tout.
Ce mécanisme de maintien de l'intégrité des ressources vient compléter celui de gestion des actions simultanées par les influences en vue de proposer une gestion aussi générique que possible des problèmes liés à la composition de rôles ;
- MOCA propose également un **groupe** responsable de la **gestion des dynamiques organisationnelles**. Ce groupe fournit différents types de rôles amenant aux agents les compétences nécessaires à la gestion d'un groupe. Il fournit aussi un service de « pages jaunes », qui recense l'ensemble des rôles du système et leurs compétences requises et fournies. Un agent à la recherche d'un service peut ainsi demander la prise en charge d'un rôle fournissant la compétence attendue.

Commentaires Les avancées du travail de Mathieu Amiguet par rapport à AGR sont principalement d'ordre informatique, puisqu'il se propose de fournir une **plate-forme** orientée vers le génie logiciel rendant opérationnelle la prise en charge de rôles multiples. Il se concentre donc sur la spécification et le développement d'abstractions de haut niveau, les **compétences** et les **influences**, qui permettent de ramener les choix en matière de composition des rôles à un niveau conceptuel : la description du comportement d'un agent consiste entre autres à spécifier une politique de gestion pour chacune de ses compétences, alors que la description du comportement d'un rôle consiste à spécifier le traitement des influences dans un statechart.

Notre travail se place davantage sur un plan méthodologique, notre objectif étant d'explorer la manière d'utiliser une approche organisationnelle pour la modélisation de systèmes complexes. Le développement d'un méta-modèle ne vient donc qu'au second plan, pour supporter notre exploration. Ce travail était déjà trop avancé pour pouvoir utiliser MOCA quand elle a été opérationnelle. Nous avons donc du développer nos propres abstractions. Nous suivons Amiguet sur la teneur des comportements des rôles et des agents, et nous avons réutilisé les concepts de compétence et d'influence sans toutefois parvenir à les intégrer de manière systématique dans la modélisation.

Les mécanismes et les outils proposés par MOCA se concentrent sur la description des comportements des rôles et des agents. Ils paraissent pertinents mais leur exploitation a été repoussée au profit d'une réflexion sur l'utilisation d'AGR. Le tableau 9 synthétise finalement quels sont les aspects, conceptuels, informatiques et méthodologiques de MOCA qui seront utilisés, et ceux qui sont mis de côté.

Travail de Odell et Parunak On peut citer, en complément, les travaux de Odell et Parunak [Parunak and Odell, 2002, Odell *et al.*, 2001, Odell *et al.*, 2003] qui s'appuient sur le formalisme

MOCA	Concepts	Architecture Informatique	Méthodologie
Éléments retenus	Rôles comme composants décrivant des comportements. Les agents choisissent leurs rôles et gèrent leur composition ; il peuvent moduler leur exécution (compétences)	Les rôles sont des objets. Utilisation des compétences des agents. Influences pour gérer actions simultanées (mais pas partout!).	
Éléments mis de côté	Gestion des conflits de rôles	MOCA! Groupe de gestion des dynamiques organisationnelles	Statecharts
Éléments non pertinents			

TAB. 9 – MOCA : Bilan

AGR pour creuser les concepts utilisés dans les approches organisationnelles et proposer des notations de type UML adéquates. Leur travail constitue une consolidation conceptuelle et méthodologique, mais ne propose ni applications, ni implémentations.

De même que [Amiguet, 2003], ils soulignent que la minimalité du modèle AGR, tout en étant sa force, appelle à construire extensions et compléments en vue d’une opérationnalisation. Ils estiment notamment que les rôles doivent pouvoir définir des comportements récurrents, et que les groupes devraient être autorisés à prendre eux-même en charge des rôles (structure holonique), et proposent également un certain nombre de diagrammes UML pour spécifier un SMA basé sur le modèle AGR.

[Odell *et al.*, 2003] discutent plus particulièrement du concept de rôle, qu’ils définissent comme un *répertoire comportemental normatif*, et de la teneur du contenu des rôles, qu’ils caractérisent selon 2 propriétés : la **spécialisation horizontale**, qui définit la largeur d’action d’un rôle (diversité des comportements élémentaires pris en charge par le rôle) ; et la **spécialisation verticale**, qui définit le degré de contrôle qu’un rôle a sur ses actions et celles des autres rôles : un rôle qui s’active simplement à la demande de l’agent qui le porte est très spécialisé verticalement, alors qu’un rôle responsable du contrôle des actions d’autres rôles est étendu verticalement. Afin de guider les dynamiques organisationnelles, ils proposent également l’introduction du concept de **position** pour signifier qu’un rôle est vacant dans un groupe, et que le groupe appelle à sa prise en charge.

Commentaires Nous utiliserons les travaux de Odell et Parunak pour affiner la définition de nos concepts, et nous retiendrons surtout certaines de leurs notations UML lors de la construction de notre méthodologie graphique. Leurs idées de groupes holoniques et de positions n’ont pu être creusées dans le temps de la thèse. Le tableau 10 synthétise finalement quels sont les aspects, conceptuels, et méthodologiques qui seront utilisés, et ceux qui ont été mis de côté.

Bilan Le tableau 11 synthétise les différents éléments des travaux liés à AGR que nous réutiliserons en regard des objectifs de notre travail.

Notre travail consistera donc à affiner la définition des concepts, à en réaliser une implémentation ad hoc, et à en proposer une méthodologie d’utilisation. Il faudra par exemple définir des manières d’identifier des niveaux d’organisation dans un système, ainsi que des règles pour discriminer quels sont les comportements et caractéristiques des entités qui sont définies au niveau

Odell/parunak	Concepts	Architecture Informatique	Méthodologie
Éléments retenus	Rôles comportementaux. Degrés de spécialisation		Diagrammes UML
Éléments mis de côté	Structure holonique (prise en charge de rôles par des groupes). Positions		
Éléments non pertinents			

TAB. 10 – Travaux de Odell et Parunak : Bilan

	Concepts	Architecture Informatique	Méthodologie
Éléments retenus dans les travaux existants			
AGR		Groupes, Rôles, Structure de groupe	Certains éléments de [Ferber <i>et al.</i> , 2003]
Durand	Schémas d'organisation pour décrire des points de vue sur le système. Rôles comportementaux		Utilisation de diagrammes de conception
MOCA	Rôles comme composants décrivant des comportements. Les agents choisissent leurs rôles et gèrent leur composition; il peuvent moduler leur exécution (compétences)	Les rôles sont des objets. Utilisation des compétences des agents. Influences pour gérer actions simultanées (mais pas partout !)	
Odell/parunak	Rôles comportementaux Degrés de spécialisation		Diagrammes UML
Éléments développés dans la thèse			
	Définition de la limite agent/rôle	Composition des rôles. Implémentation de groupes et de rôles	Construction d'une méthodologie graphique ad hoc

TAB. 11 – Travaux autour d'AGR : Bilan des éléments retenus

de l'agent, de celles qui sont définies au niveau des rôles. Le point concernant la composition de rôles sera abordé plus longuement. La manière de gérer des comportements simultanés ou des informations contradictoires issues de rôles multiples constitue un point délicat de l'utilisation d'AGR. S'il est possible de contrôler au niveau du méta-modèle l'action des agents pour ne pas qu'ils fassent plusieurs choses à la fois, l'interprétation des informations éventuellement contradictoires fournies par différents rôles sera laissée aux agents du modèle eux-mêmes.

CONCLUSION DU CHAPITRE

Le formalisme AGR propose une structuration organisationnelle des SMA : les agents interagissent au sein de groupes à travers les rôles qu'ils prennent en charge, et les groupes interagissent à travers les agents qu'ils partagent.

On identifiera niveaux d'organisation et groupes, comportements dans ces niveaux d'organisation et rôles, et les agents seront responsables du choix des rôles qu'ils prennent en charge, ainsi que la possibilité de paramétrer leur mise en œuvre.

L'utilisation d'AGR poursuit les **objectifs** suivants :

- un **gain en expressivité** : lisibilité amenée par la structuration organisationnelle, distinction entre différents comportements d'une entité suivant les niveaux d'organisation auxquels elle participe. La composition par un agent des rôles qu'il prend en charge dans différents groupes explicite (1) qu'un acteur a accès aux informations issues des différents niveaux d'organisation auxquels il prend part (2) que cet acteur s'exprime en retour par le choix et la paramétrisation de comportements dans ces niveaux d'organisation. La mise en œuvre de cette composition de rôles constitue toutefois un point délicat de l'application d'AGR ;
- un **gain en modularité** : les groupes permettent de manipuler et de factoriser des fractions de système, les rôles permettent de manipuler et de factoriser des fractions de comportements.

Le formalisme AGR doit être encore spécifié pour être appliqué à la modélisation. Quelle est la nature et le type de contenu d'un rôle ? Comment se concrétise sa prise en charge, comment un agent combine-t-il plusieurs rôles ? Les premiers éléments de réponse sont que les rôles définissent des éléments de comportement, et que leur prise en charge correspond à l'adoption de ces éléments de comportement.

La question de thèse se décline en sous-questions plus précises :

1. **comment faire du formalisme AGR un support adapté à la modélisation ?**
 - **quels éléments des systèmes les concepts du formalisme AGR permettent-ils de manipuler ?**
 - **quelle implémentation du formalisme AGR est adaptée à l'opérationnalisation de ces concepts ?**
 - **quelle méthodologie peut guider le développement d'un modèle AGR ?**
2. **Le support de modélisation ainsi développé favorise-t-il l'expressivité et la modularité ? Permet-il de produire des modèles à portée générique ?**

Avant d'aborder les développements répondant à la question de thèse, on revient à l'application, en présentant plus en détail le terrain dont seront issus les modèles, et en précisant la démarche qui sera adoptée.

Chapitre 3

Cadre d'application : le SAGE Drôme

CONTENU DU CHAPITRE

La thèse aborde une problématique générale de représentation de niveaux d'organisation multiples grâce à une approche SMA particulière, l'approche AGR.

Tout en adoptant une orientation très méthodologique s'éloignant d'une intervention directe, la thèse s'appuie cependant sur un cas concret : la gestion des étiages dans le SAGE Drôme. Ce cas servira de base pour alimenter les différents modèles qui seront produits pour tester l'approche.

Ce chapitre a pour objet de présenter ce cadre d'application. La première partie offre une description du système. Cette description se fera en deux temps, par les différents acteurs impliqués d'abord, puis par les niveaux d'organisation qu'on identifie dans le processus collectif de gestion ensuite. Cette première partie se termine par l'exposé de données plus factuelles pouvant alimenter les modèles.

La seconde partie est consacrée à la concertation autour des règles collectives de gestion, en appui desquelles le Cemagref est intervenu. Après avoir tracé un bref historique du SAGE et présenté les enjeux et les objectifs de cette concertation, on décrit les différents outils qui ont été introduits dans les réunions. On s'intéressera plus particulièrement aux limites de ces outils par rapport à la représentation qu'ils offrent du système pour conclure sur notre démarche expérimentale de construction et de tests des modèles AGR.

Sommaire

1	Acteurs et niveaux d'organisation de la gestion collective de l'eau dans la Drôme	72
1.1	Situation générale	72
1.2	Acteurs et usages	73
1.2.1	Irrigation	73
1.2.2	Autres usages	76
1.2.3	Les autres acteurs de la gestion quantitative de l'eau	77
1.3	Niveaux d'organisation	78
1.3.1	Niveaux d'organisation physiques	78
1.3.2	Niveaux d'organisation sociaux	78
1.3.3	Bilan	81
1.4	Informations factuelles	83
1.4.1	Niveau global	83
1.4.2	Niveau du bassin	84
1.4.3	Niveau des réseaux	85
1.4.4	Niveau des exploitations	87
2	L'intervention du Cemagref	92
2.1	Contexte de l'intervention	92
2.1.1	Objectifs du volet gestion des étiages du SAGE Drôme	94
2.1.2	Concertations autour de l'irrigation	95
2.1.3	Intervention du Cemagref : vers l'accord local sur le partage de la ressource	97
2.2	Simulation de scénarios pour la signature de l'accord local	97
2.3	Retour vers la recherche : SMA et jeu de rôles	98
2.4	La thèse : une étude hors des enjeux du terrain	100

En plus des sources d'information citées tout au long du chapitre, certains éléments concernant le système, dont l'ensemble des citations, sont issus :

- de l'observation de réunions de concertation en 2001 et 2002 ;
- d'un **séjour de terrain** de 2 semaines réalisé durant l'été 2002. Durant ce séjour, 18 entretiens ont été réalisés afin de compléter et rafraîchir les informations acquise par Sébastien Zanker 2 ans auparavant. Les présidents des 3 réseaux d'irrigation collectifs ainsi que l'ancien président de l'association des irrigants individuels ont été rencontrés. Les 14 autres entretiens ont été réalisés auprès d'autres agriculteurs du secteur. Des détails sur le choix de ces agriculteurs, ainsi que le guide d'entretien sont fournis dans l'annexe. **B**

1 Acteurs et niveaux d'organisation de la gestion collective de l'eau dans la Drôme

1.1 Situation générale

La situation générale de la basse vallée de la Drôme est représentée sur la figure 9. La rivière Drôme est un affluent du Rhône et connaît un régime de type préalpin, subméditerranéen, avec des étiages sévères durant l'été. Le débit de la rivière n'est régulé par aucun ouvrage de soutien.

On s'intéresse à la basse vallée (Val-De-Drôme), à l'aval de Crest, où se situe la majeure partie des cultures irriguées (figure 10). Dans cette partie de la rivière, l'irrigation représente

l'essentiel des prélèvements, les communes étant alimentées en eau potable par des réserves karstiques. **2210 hectares sont irrigués : 1780 hectares par les 3 réseaux d'irrigation collective sous pression, et 430 hectares par des prélèvements individuels directs dans la nappe d'accompagnement de la Drôme.** En 1999, le maïs représentait environ 50% des assolements irrigués (mais plus de 80 % de la consommation en eau estivale), mais des cultures spécialisées se développent (semences, ail, herbes aromatiques). [Zanker, 1999]

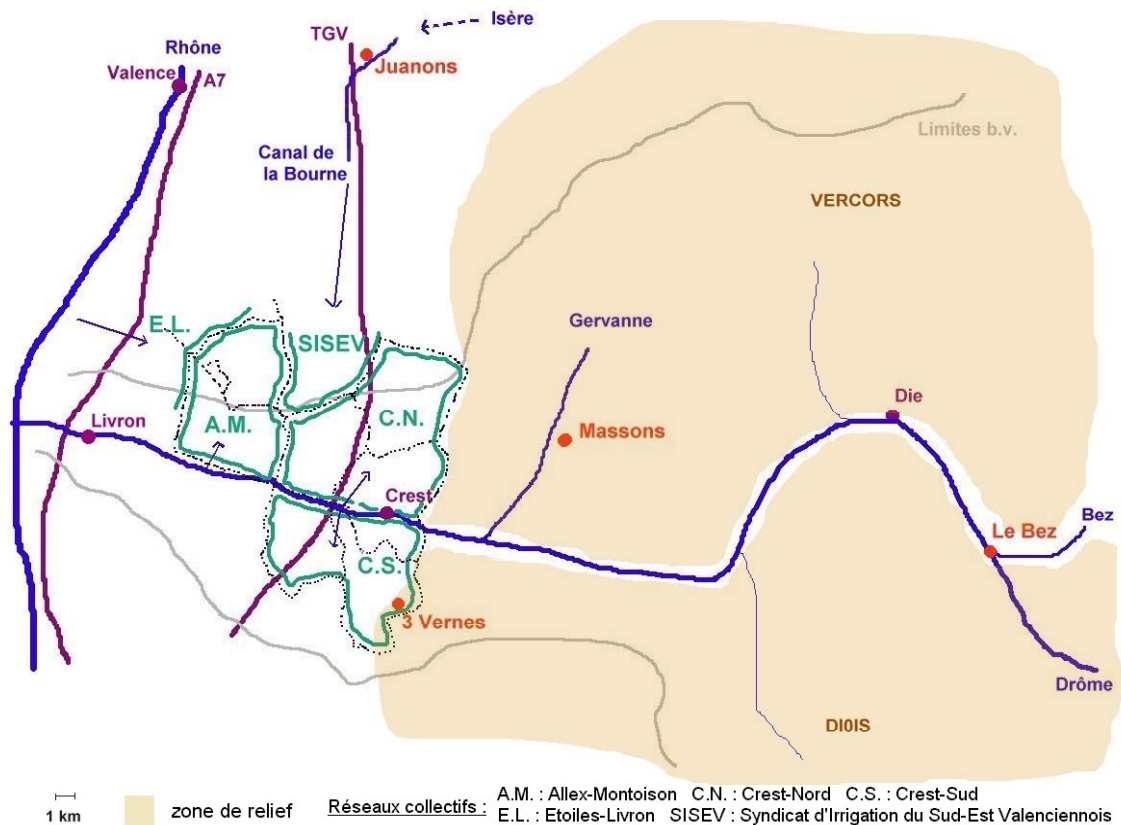


FIG. 9 – Vallée de la Drôme : limites du bassin versant, cours d'eau, infrastructures et villes principales, massifs, aménagements qui ont été envisagés pour amortir les étiages de la Drôme (Juanons, Massons, Le Bez, 3 Vernes) , périmètres irrigués de la basse-vallée. Allex-Montoison, Crest-Nord et Crest-Sud s'alimentent dans la Drôme ; Etoiles-Livron dans la nappe d'accompagnement du Rhône ; le SISEV est alimenté par le canal de la Bourne (dérivation de l'Isère)

Un SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux, voir la section 2.1.1 dans le chapitre 1) est en cours sur le bassin de la Drôme. Lancé en 1991, il a été signé en 1997 et définit le cadre et les objectifs des actions de gestion en cours sur la rivière. Des détails sur la SAGE Drôme sont donnés dans la section 2 de ce chapitre.

1.2 Acteurs et usages

1.2.1 Irrigation

Les acteurs de l'irrigation concernés par le SAGE Drôme sont les **3 réseaux collectifs** en aval de Crest qui s'alimentent dans la Drôme, les **irrigants individuels** qui pompent dans la

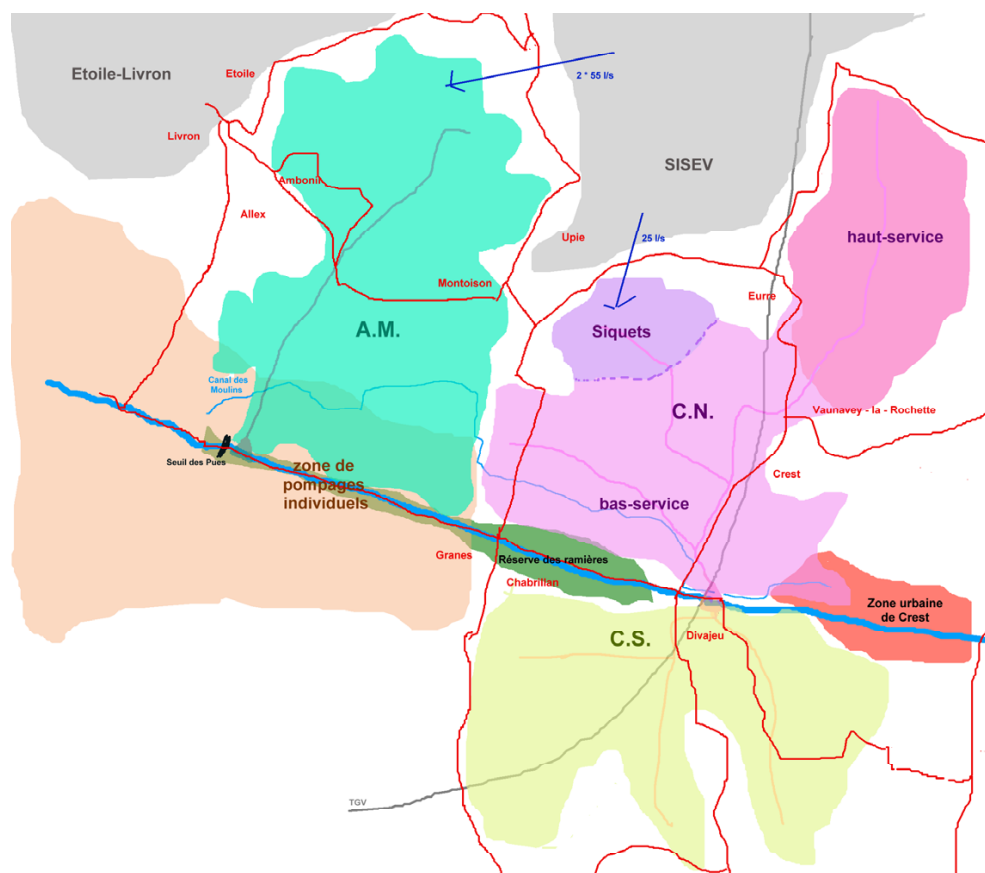


FIG. 10 – Basse-vallée de le Drôme : 3 périmètres irrigués (CN, CS, AM) avec leurs canalisations principales et la zone qu'ils desservent, zone où se situent la majorité des pompages individuels, zone couverte par la réserve des Ramières, zone urbaine de Crest, limites des différentes communes du territoire. (source : CCVD)

nappe d'accompagnement, et dans une moindre mesure le **Syndicat d'Irrigation du Canal de la Bourne (SICB)**, qui s'alimente dans le bassin de l'Isère mais vend de l'eau aux 2 réseaux collectifs de la rive droite de la Drôme, et le **Syndicat d'Irrigation du Sud-Est Valenciennois (SISEV)**, qui transporte l'eau vendue par le SICB jusqu'aux réseaux de la rive droite. Le SISEV est alimenté par le SICB.

Selon [Zanker, 1999], les réseaux collectifs d'irrigation présentent un problème de **sous-dimensionnement** : le dimensionnement des conduites et des prises d'entrée a été effectué en prenant pour référence les périmètres irrigués de la vallée du Rhône, où la culture de fruitiers dominante fait que seule 50% de la surface souscrite est irriguée en été. Mais dans la vallée de la Drôme, le maïs prédomine, si bien que 90% de la surface souscrite est irriguée en été. Les débits instantanés demandés en pleine saison sont trop importants, pour la rivière et pour les réseaux eux-même (pertes de pression importantes pour les abonnés les plus éloignés de la rivière, saturation des pompes).

ASA de Crest-Nord L'ASA de Crest-Nord dessert **650 hectares**. Son alimentation principale est constituée d'une prise de **400 l/s** dans la Drôme, juste en **aval de Crest**. Un secteur

haut est alimenté par une connexion de **25 l/s** du **SISEV**. Une **règle collective interne** d'« égalisation des volumes » y est instaurée depuis 1991 : chacun des abonnés est contraint durant toute la saison d'ouverture du réseau à un nombre de jours d'arrêt hebdomadaires proportionnel à son débit à l'hectare.

Crest-Nord est le premier des 3 réseaux d'irrigation du Val-de-Drôme à avoir été créé, en 1978. L'irrigation était auparavant déjà pratiquée grâce au canal des Moulins (voir carte) dont la mise en eau devenait difficile à cause de l'abaissement du lit de la rivière suite à l'exploitation de ses graviers. En s'appuyant sur les réseaux sous pression déjà mis en place sur le Rhône (réseau d'Étoile-Livrons), le SMARD²⁶ « a amené toute sa compétence technique et administrative pour aider les agriculteurs à mettre ce réseau [Crest-Nord] en place ».

Les agriculteurs se sont constitués en ASA, et le SMARD est resté jusqu'à aujourd'hui propriétaire des ouvrages. Cela rend le fonctionnement de Crest-Nord différent des 2 autres réseaux, créés une dizaine d'années plus tard. Ceux-ci, tout en ayant reçu le soutien technique et administratif du SMARD, sont propriétaires de leurs ouvrages, et sont constitués en syndicats intercommunaux. Le SMARD apporte un suivi sur les 3 réseaux.

Syndicat Intercommunal d'Irrigation de Crest-Sud Il dessert **500 hectares**. Il est alimenté uniquement par une prise de **391 l/s** couplée avec la prise de l'ASA de Crest-Nord. Depuis 2000, le syndicat a instauré une **règle collective interne** de répartition des irrigations : tous les abonnés sont contraints à un jour d'arrêt hebdomadaire à partir du 1er juillet. Le syndicat de Crest-Sud a été créé en 1987.

Syndicat Intercommunal d'Irrigation d'Allex-Montoison Il dessert **580 hectares**. Son alimentation principale est constituée d'une prise de **400 l/s** dans la Drôme, juste en **amont du seuil des Pues**. **110 l/s** supplémentaires sont apportés en circuit ouvert par 2 connections au **SISEV** (voir paragraphe suivant). En 2002, il n'y existait **pas de règle collective interne** de répartition des irrigations.

Le réseau d'Allex-Montoison a été créé au milieu des années 80 à l'initiative d'un petit noyau d'agriculteurs de Montoison autour de son président actuel. Aux dires du président du réseau, la DDAF avait alors garanti qu'il y avait suffisamment d'eau dans la rivière, et que si l'eau venait à manquer, on pourvoirait aux renforcements nécessaires. Il est à noter que dans les années 70, il était prévu que la commune de Montoison soit incluse dans le réseau d'Étoile-Livrons, mais elle s'était retirée pour des raisons politiques. En conséquence, il existe un tuyau datant de cette époque, qui arrive aux limites de la commune de Montoison.

SISEV et SICB Le SICB, qui mène une activité importante de vente d'eau, apporte un approvisionnement complémentaire aux réseaux d'Allex-Montoison et de Crest-Nord, via le SISEV. Les maillages ont eu lieu à l'initiative des 2 réseaux lors de la mise en place du SISEV. Allex-Montoison qui sentait son approvisionnement menacé suite aux étés difficiles de 90-91 a pu demander suffisamment tôt un dimensionnement pour récupérer 110 l/s. Crest-Nord n'est maillé que sur 25 l/s. Le SAGE Drôme aura notamment débouché sur le projet de construction de la retenue des Juanons (voir carte) dont la mise en service permettra d'acheminer 200 l/s supplémentaires à l'ASA de Crest-Nord.

Le SICB est présent dans les discussions sur la gestion collective de l'eau dans la basse-vallée de la Drôme au titre de fournisseur contractuel d'eau.

²⁶Syndicat Mixte d'Aménagement de la Rivière Drôme. Structure créée en 1971 à l'initiative du Conseil Général et de la Chambre d'Agriculture pour porter des projets d'aménagement de l'équipement rural.

Irrigation individuelle L'irrigation individuelle concerne environ 30 % des irrigants de la basse vallée. Les prélèvements se font majoritairement dans la nappe d'accompagnement de la Drôme, sur les communes d'Allex et de Granes. On trouve aussi marginalement d'autres types de ressources individuelles qui ne s'alimentent pas dans la rivière Drôme : forages profonds, sources, ruisseaux, petites retenues collinaires.

Parmi les irrigants ayant recours à des prélèvements individuels, 60 % sont **aussi abonnés** à l'un des 3 réseaux collectifs. Dans la plupart des cas, ces agriculteurs ont conservé leurs droits sur une ressource individuelle antérieure à la construction des réseaux, et ne l'utilisent que comme ressource d'appoint (durant la fermeture des réseaux, ou comme complément durant les périodes de restriction).

Les irrigants « 100% individuels » sont peu organisés et bénéficient d'une mauvaise image d'individualistes refusant de participer aux efforts collectifs auprès de leurs collègues abonnés aux réseaux : « *ils ne sont pas coopératifs dans la tête alors de toute façon on ne les changera pas* ». Cependant, les entretiens révèlent des exemples de règles collectives locales autour de certains aménagements privés : instauration d'un tour d'eau entre voisins quand le niveau des puits devient trop bas, gestion commune d'une retenue collinaire.

L'**ADARII** (Association Départementale des Agriculteurs en Réseau d'Irrigation Individuelle) a été créée au début du SAGE afin d'amener une représentation de l'irrigation individuelle dans les débats : « *si on peut démontrer qu'on a une gestion collective, une gestion raisonnée, on ne sera pas dans les mêmes taxations. Il y a un intérêt direct pour s'organiser* » (Président de l'ADARII). Cependant l'action de l'ADARII est très mal identifiée, par ses adhérents mêmes : « *il n'y a pas trop de réunion, de choses qui se passent, je ne sais pas trop ou ça en est* »

L'association a tout de même obtenu la mise en place de **modalités collectives de gestion** pour les irrigants individuels. C'est toujours le préfet qui déclenche le passage en gestion de crise, mais des jours d'arrêts en cas de crise sont attribués selon les communes en début de saison.

1.2.2 Autres usages

On ne s'intéresse qu'aux usages concernés par la gestion quantitative de l'eau. Les données proviennent du rapport sur le SAGE publié par la Communauté de Communes du Val de Drôme²⁷.

Eau potable Les prélèvements pour l'alimentation en eau potable ne représentent que 100 l/s sur l'ensemble du bassin et sont entièrement réalisés à partir des eaux souterraines (karsts, nappes d'accompagnement). Les prélèvements en eau potable ne rentrent en conflit avec les prélèvements agricoles que lors d'années exceptionnellement sèches. Il faut tout de même noter que dans le débat sur la création de ressources en eau, il a été jugé préférable de préserver le karst de la Gervanne, qui fournit une eau de très bonne qualité, comme réserve potentielle d'eau potable plutôt que de l'exploiter pour le soutien d'étiage.

Extraction de graviers Jusqu'au début des années 90, 6 entreprises extrayaient les graviers du lit de la Drôme en aval de Crest. Cette exploitation, qui a provoqué un affaissement important du lit de la rivière (5 mètres) ainsi qu'une baisse du niveau de la nappe d'accompagnement, avait donc un impact important sur l'occurrence des étiages. Les extractions ont finalement cessé en 1993, et la construction du seuil des Pues en 1998 a permis de remonter le niveau du lit de la Drôme d'1 mètre.

²⁷ Un SAGE pour la rivière Drôme, District d'Aménagement du Val de Drôme, 2001

Industrie Les prélèvements et dérivations dus à l'industrie sont insignifiants sur la rivière.

Tourisme et loisirs Le tourisme est un secteur d'activité important sur la rivière, mais les sites de baignade et les parcours de canoë-kayak sont situés majoritairement en amont de Crest.

Il existe par contre un enjeu environnemental non négligeable dans la basse-vallée : la réserve naturelle des Ramières s'étend sur toute la zone de prélèvement des réseaux d'irrigation. La **FRAPNA** (Fédération Rhône-Alpes de Protection de la Nature), qui fut un temps gestionnaire de la réserve est le principal acteur de défense de l'Environnement dans la basse-Vallée de la Drôme. Elle a connu des périodes de conflit ouvert avec les agriculteurs. C'est la **Communauté de Commune du Val de Drôme**, porteuse du projet du SAGE et qui a également un rôle actif dans la préservation des milieux naturels, qui est maintenant responsable de la gestion de la réserve.

Conclusion : étiages et conflits d'usages Le débit d'étiage mensuel quinquennal²⁸ de la rivière est de **2.20 m³/s** à Crest. Le débit décadaire maximal²⁹ prélevé par l'agriculture en aval de Crest représente **1.35 m³/s** en année moyenne, et **1.88 m³/s** en année sèche. En période d'étiage, l'agriculture prélève donc une part très importante du débit de la rivière, et son approvisionnement n'est absolument pas sécurisé. Les prélèvements agricoles ne concurrencent pas d'autre types de prélèvements, mais le développement du tourisme vert comme la création au début des années 90 de la réserve naturelle des Ramières au cœur de la zone irriguée font que les étiages de la Drôme provoquent des tensions importantes entre le monde agricole et les représentants du tourisme et de la défense de l'environnement.

1.2.3 Les autres acteurs de la gestion quantitative de l'eau

On cite ici, de manière non exhaustive, les acteurs qui contraignent ou encadrent les usagers :

- la **Communauté de Communes du Val de Drôme (CCVD)**, autrefois District d'Aménagement du Val de Drôme (DAVD) regroupe 35 communes de la basse-vallée de la Drôme. Elle a été créée en 1976 et œuvre au développement du territoire dans une orientation fortement tournée vers le respect de l'environnement.

La CCVD est la **structure initiatrice et porteuse de la concertation**. Elle est étroitement liée au SAGE Drôme : la Commission Locale de l'Eau (CLE) est présidée par le président de la CCVD ; l'animatrice du SAGE est salariée par la CCVD ; le secrétariat de la CLE est logé dans ses locaux. C'est aussi dans les locaux de la CCVD qu'on lie les réunions de concertation avec les représentants des irrigants.

La CCVD est devenue un interlocuteur privilégié du monde agricole, avec qui elle a su établir un dialogue constructif tout au long des concertations autour de la mise en œuvre des modalités de gestion de crise préconisées par le SAGE.

- la **Chambre d'Agriculture** intervient par l'appui et le conseil qu'elle fournit aux irrigants. Elle est aussi représentée dans la CLE ;
- la **DDAF** délivre les autorisations de prélèvement, et est aussi représentée dans la CLE ;
- la **Police de l'Eau**.

Quelques acteurs complémentaires sont répertoriés dans l'annexe **C.1**

²⁸le débit d'étiage mensuel quinquennal ou QMNA5 est une valeur statistique calculée en observant une série de débits mensuels d'étiage (moyenne mensuelle des débits la plus faible de l'année). Le QMNA5 représente la valeur en dessous de laquelle se situe statistiquement le débit mensuel d'étiage 1 année sur 5

²⁹valeur maximale de moyennes de débit réalisés sur 10 jours

1.3 Niveaux d'organisation

On présente dans cette partie quels sont les principaux types de niveaux d'organisation, physiques et sociaux, que l'on identifie autour la gestion de l'eau agricole dans la Drôme.

1.3.1 Niveaux d'organisation physiques

On identifie 3 types de niveaux d'organisation physiques, qui permettent de définir une représentation simplifiée de la circulation de l'eau dans le système :

- le **bassin** : à ce niveau, l'eau circule dans la rivière et dans la nappe d'accompagnement, et est prélevée en certains points selon un débit variable ;
- le **réseau** : à ce niveau, l'eau circule dans le réseau depuis les prises d'entrées du réseau jusqu'aux bornes des abonnés en fonction des demandes de ces bornes. La manière dont la répartition de l'eau entre les bornes se fait dépend de caractéristiques physiques ou de réglages propre au réseau ;
- la **parcelle** : à ce niveau, l'eau circule depuis une pompe jusqu'à la parcelle, en fonction du réglage de la pompe. L'eau amenée à la parcelle est ensuite stockée par le sol et consommée par la culture.

Pour chacun de ces niveaux physiques, les différents réglages sont le fait d'acteurs qui mettent en œuvre des règles de gestion issues de niveaux sociaux.

1.3.2 Niveaux d'organisation sociaux

Niveaux de gestion Les niveaux de gestion sont ceux où s'effectue la mise en œuvre des règles de gestion de l'eau :

- le **bassin** : c'est à ce niveau que s'effectue la mise en œuvre des restrictions appliquées aux usagers directs de la rivière ou de sa nappe d'accompagnement en cas de crise ;
- le **réseau** : c'est à ce niveau que s'effectue la mise en œuvre des règles collectives de répartition de l'eau internes aux réseaux ;
- l'**exploitation** : c'est à ce niveau que s'effectue la mise en œuvre des règles individuelles de gestion de l'eau propres à chaque agriculteur.

Chacun de ces niveaux sociaux définit des règles de gestion collective que les niveaux inférieurs auxquels ils sont reliés doivent respecter. En retour, ces niveaux inférieurs peuvent renvoyer de l'information. Ces règles collectives résultent de discussions ayant lieu dans des niveaux de concertation (voir paragraphe suivant). D'autre part, chaque niveau social intervient sur le niveau physique dont il est gestionnaire.

Des liens « horizontaux » entre ces niveaux existent du fait la dispersion des exploitation qui fait que de nombreux irrigants sont abonnés à plus d'un réseau, ou possèdent également des accès individuels.

Niveaux de concertation Ce sont les niveaux où sont négociées les règles collectives de gestion :

- la **CLE** (Commission Locale de l'Eau du Sage Drôme) : les acteurs qui siègent à la CLE négocient les **objectifs de gestion** et les **mesures** à mettre en place. C'est au niveau de la CLE qu'a été défini l'objectif de respecter un **débit d'étiage de $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$** au seuil des Pues 3 années sur 4, et de mettre en place les mesures suivantes :
 - créer de **nouvelles ressources** apportant 2 millions de m^3 supplémentaires à la basse-vallée ;

- mettre en place des **mesures de gestion collective** correspondant à la gravité des étiages ;
- mettre en place un **observatoire de l'eau**.

La CLE réunit les représentants de l'ensemble des usages de la rivière (associations, organisation professionnelles et chambres consulaires), les élus locaux, et les représentants des services de l'état. Deux des présidents des réseaux d'irrigation y représentent l'irrigation collective, et le troisième y siège en tant que maire. Le président de l'ADARII représente l'irrigation individuelle à la CLE ;

- le **groupe de travail** chargé de la discussion des **modalités d'accomplissement des mesures** fixées par la CLE.

Ce groupe de travail réunit de manière régulière les présidents des 3 réseaux d'irrigation et de l'ADARII, ainsi que le président du SICB, l'animatrice du SAGE, et à certaines occasions des techniciens du CCVD ou de la Chambre d'Agriculture, des irrigants, des experts ou des chercheurs du Cemagref.

Dans ce groupe de travail

- les préférences des agriculteurs concernant de nouvelles ressources ont été discutées. La décision concernant la construction de nouvelles infrastructures dépasse cependant largement le cadre du groupe de travail ;
- les règles de gestion de crise qui s'appliquent à chacun des réseaux et aux individuels ont été négociées, avec l'appui technique du Cemagref (voir section 2 de ce chapitre). Cette négociation a débouché sur un accord local de partage de la ressource ;

- **bureaux des réseaux** : c'est au niveau des bureaux des réseaux que sont fixées notamment les **règles de gestion internes aux réseaux**. En effet, si les modalités de l'accord local fixent des niveaux de prélèvements à respecter, les réseaux sont responsables de la manière dont ils assurent la mise en œuvre ces restrictions.

Pour chacun des 3 réseaux, environ 1/3 des abonnés sont représentés dans les bureaux, ce qui fait que les décisions et les remontées d'information se font très facilement. Cependant, durant les entretiens, certains adhérents regrettent que leur réseau n'organise pas d'assemblées plénières régulières (seule l'ASA de Crest-Nord le fait).

Chacun des 3 réseaux se distingue par le degré de régulation exercé sur les abonnés : ainsi, il n'existe à Allex-Montoison aucune règle collective interne, alors que à Crest-Nord, des tours d'eau ont été mis en place depuis plus de 10 ans et les abonnés des secteurs délicats sont tenus d'informer le président de leur assolement. Ces différences semblent tenir à la personnalité des présidents, et aux écarts entre les contraintes de fonctionnement des réseaux.

Niveaux de coopération Ce sont des niveaux d'organisation qui n'interviennent pas directement dans la gestion de l'eau, mais dans lesquels ont lieu d'autres modes de coordination entre les irrigants.

Observatoire de l'eau L'observatoire de l'eau, préconisé par le SAGE, constituerait un niveau d'organisation où les informations concernant l'état de la ressource et les niveaux des prélèvements seraient accessibles à l'ensemble des usagers du bassin.

Îlots semenciers Les cultures de semence doivent être isolées, ce qui impose aux agriculteurs n'ayant pas de surfaces assez grandes une coordination avec leurs voisins. De plus, les semenciers sont à peu près les mêmes pour tout le monde, et pour le maïs, les cultures doivent

être suffisamment synchronisées pour que la castration, réalisée par une CUMA, puisse se faire dans de bonnes conditions.

La création d'îlots semenciers résulte d'actions de sensibilisation du réseau (dans le cas de Crest-Sud) ou des semenciers eux-mêmes, ou bien de la coordination de noyaux d'agriculteurs voisins. Ces noyaux se retrouvent parfois bloqués par une seule parcelle d'un agriculteur refusant de modifier son assolement.

Filières L'existence et le dynamisme de filières créant des débouchés pour certaines cultures spécialisées peut influencer sur le choix de l'assolement. C'est le cas des cultures de semence, qui sont sous contrat. C'est aussi le cas de la tomate qui a vu sa production baisser lors de la fermeture de la coopérative du bassin. On peut aussi citer les plantes aromatiques, pour lesquelles la coopérative locale pousse des agriculteurs du secteur d'Eures à se convertir afin de regrouper ses collectes.

Associations de voisinage Certains agriculteurs ont pris l'habitude de travailler avec leurs voisins. Ainsi dans un groupe d'agriculteurs, peuvent se produire préférentiellement des **échanges d'information** (sur le lancement des irrigations ou la reprise après une pluie notamment), des **achats groupés de matériel** pour commencer ensemble de nouvelles **cultures**, des **prêts de bornes** ou de terrains (ceci s'observe surtout pour l'ail), ou des **tours d'eau informels** sur des équipements partagés. Des **îlots de semence** pourront émerger plus facilement dans un groupe d'agriculteurs ayant pris l'habitude de travailler ensemble.

Un des agriculteurs interviewés a fini par former un **GAEC** (groupement agricole d'exploitation en commun) avec son voisin avec qui il échangeait régulièrement du travail (aller ouvrir des vannes, moissonner).

De nombreux autres niveaux correspondent par exemple aux CUMA (Coopérative d'Utilisation de Matériel Agricole), aux multiples organisations agricoles sectorielles qui véhiculent des informations et des conseils dans leurs secteurs, à l'opération Irri-Mieux qui vérifie les enrouleurs des 3 réseaux et apporte des conseils techniques à l'irrigation, ou à la commission agricole du CCVD, qui a promu les CTE dans la vallée.

Niveaux informels Certains modes de coordination peuvent être identifiés comme des niveaux d'organisation informels apparaissant de manière transitoire.

Ainsi par exemple, il n'existe pas de structure spécifique de coordination des réseaux d'irrigation. Les rencontres entre les présidents ont lieu à l'occasion des réunions de la CCVD, de la préfecture, ou du canal de la Bourne qui coordonne l'opération Irri-Mieux. La **coordination inter-réseaux** peut se faire au coup par coup :

- lors de la sécheresse de 1990, les réseaux alternaient l'activation de leurs prises : *« je rappelle le président de Crest-Sud, je lui dit écoute on n'a plus d'eau. Lui il me dit bon ben j'arrête, j'ai pour 2-3 jours de consommation dans ma souille, puis tu verras bien. Il est allé fermer le soir, nous le matin on avait à nouveau de l'eau en bas. Pour illustrer que la solidarité à ce moment là elle joue »*
- lors de réunions de travail, les présidents de réseaux peuvent s'entendre pour unir leurs voix : *« à la dernière réunion, on s'était dit tous ensemble on ne parlera pas de tours d'eau »* .

On peut noter que ce mode de coordination, s'il est efficace sur un secteur restreint où les prélèvements ne sont le fait que de 3 associations d'irrigation, ne serait plus possible sur un secteur plus étendu ou impliquant plus d'usagers.

Autre exemple, en activant des réseaux informels d'individus de confiance, les associations d'irrigants peuvent faire preuve d'une capacité rapide de réaction et de mobilisation si des actions collectives doivent être organisées (recrutement pour des réunions ou des manifestations, mise en place de tours de garde auprès des installations...) : « *c'était des coups de fil, au coup par coup comme ça. Est-ce que tu veux venir passer la nuit et voilà. Bon c'était toujours un peu les même qui y allait parce qu'il y en a qui n'ont jamais le temps ; on était une quinzaine* »

Ces niveaux informels sont difficilement identifiables (on pourrait aussi citer les informations qui circulent au bistrot !), mais ils peuvent constituer des modes de coordination et d'échanges importants pour la dynamique du système.

1.3.3 Bilan

Le tableau 12 synthétise les types de niveaux d'organisation sociaux qui viennent d'être décrits.

Niveau d'organisation	Acteurs concernés	Processus
Niveaux de gestion		
Bassin	CCVD (gestionnaire) Présidents de réseaux, individuels (usagers)	Déclenchement des crises, mise en œuvre des restrictions
Réseau	Abonnés du réseau, président du réseau	Mise en œuvre des règles collectives internes au réseau
Exploitation	Agriculteur gestionnaire de l'exploitation	Mise en œuvre de règles de gestion individuelles
Niveaux de concertation		
CLE	Élus locaux, représentants de l'état, représentants des usagers	Concertation sur les objectifs globaux de gestion
Groupe de travail irrigation	Présidents de réseaux, président de l'ADARII, animateur SAGE, techniciens CCVD, chercheurs...	Discussion sur les modalités des règles collectives de gestion au niveau du bassin
Bureau des réseaux	Président du réseau et abonnés membres du bureau	Définition des règles internes au réseau
Niveaux de coopération		
Observatoire de l'eau	Usagers de la rivière	Mise à disposition d'informations sur la ressource
Îlot semencier	Semencier, agriculteurs de l'îlot	Respect de normes de cultures, de distances d'isolement
Filière	Coopératives, agriculteurs...	Vente des cultures
Association de voisinage	Agriculteurs voisins	Échanges ou prêt divers
Niveaux informels		
Coordination inter-réseaux	Présidents de réseaux	Coordination au coup par coup quand le besoin s'en fait sentir

TAB. 12 – Synthèse des types de niveaux d'organisation sociaux identifiés autour de la gestion de l'eau agricole dans la basse-vallée de la Drôme

Ce découpage en niveaux d'organisation constitue un point de vue possible, et forcément partiel, sur le système.

La figure 11 présente comment chacun de ces niveaux d'organisation correspond à un point de vue sur un processus pris à une certaine échelle spatiale, et comment ces niveaux sont inter-connectés.

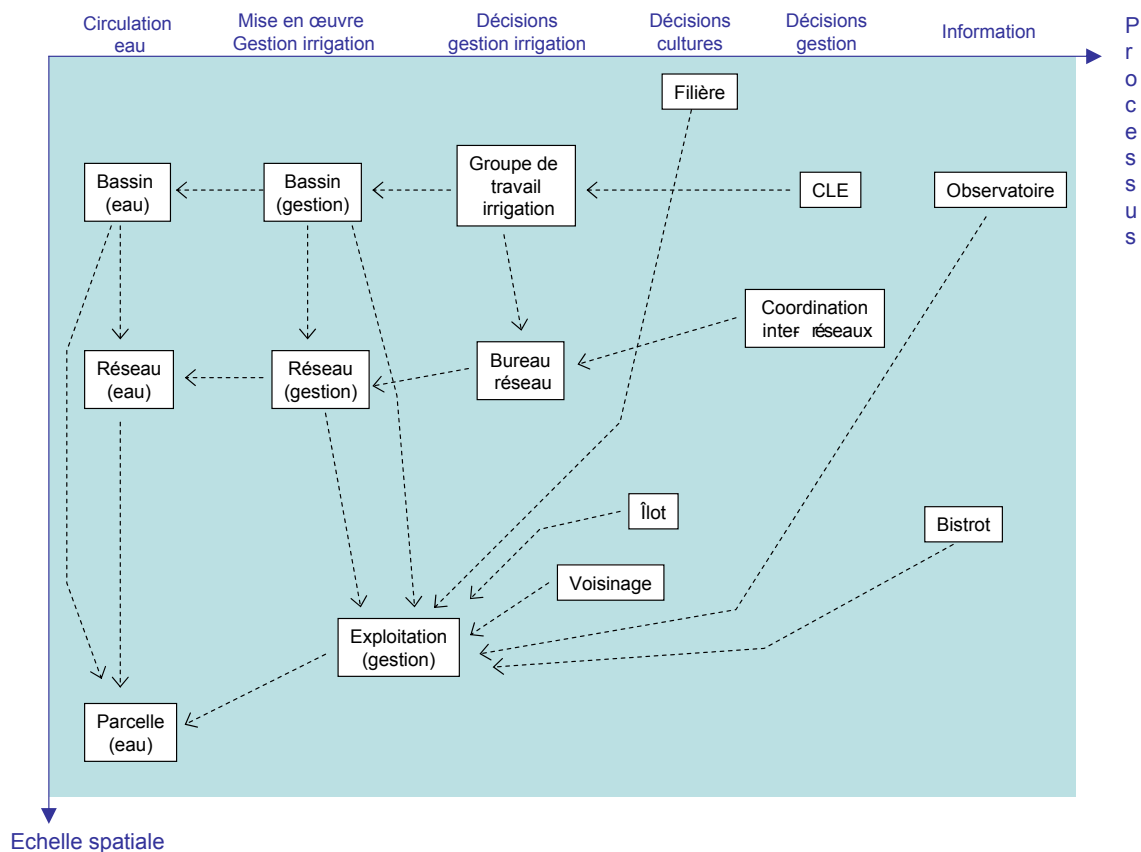


FIG. 11 – Exemples de liens entre les types de niveaux d'organisation identifiés autour de la gestion de l'eau dans la Drôme

L'interconnexion entre deux niveaux d'organisation est issue du fait qu'ils partagent des entités communes : l'eau circule du bassin vers le réseau par le biais d'une pompe partagée par les 2 niveaux, l'exploitation commande la parcelle également par le biais d'une pompe partagée par les 2 niveaux, des informations circulent entre le voisinage et l'exploitation par le biais de l'agriculteur membre des 2 niveaux.

D'autres types de liens peuvent être plus difficile à qualifier (informations volatiles, difficiles à recueillir) mais tout aussi importants : le groupe de travail parvient à un accord parce que deux de ses membres ont discuté au bistrot, ou dans la dynamique même des niveaux d'organisation, l'îlot se crée parce que des voisins vont ensemble au bistrot.

Cette partie a permis d'illustrer la variété des niveaux d'organisation que l'on peut identifier autour de la gestion de l'eau dans la Drôme.

Dans le cadre de ce travail on ne modélisera cependant que les niveaux concernant la circulation de l'eau et la mise en œuvre des règles de gestion.

1.4 Informations factuelles

Cette partie détaille des données, règles et comportements des niveaux physiques et de gestion qui pourront être utilisés pour la modélisation.

1.4.1 Niveau global

Surfaces et capacités Les capacités des prises d'entrées des réseaux et les surfaces qu'ils desservent, ainsi que les surfaces individuelles sont reportées sur la figure 12.

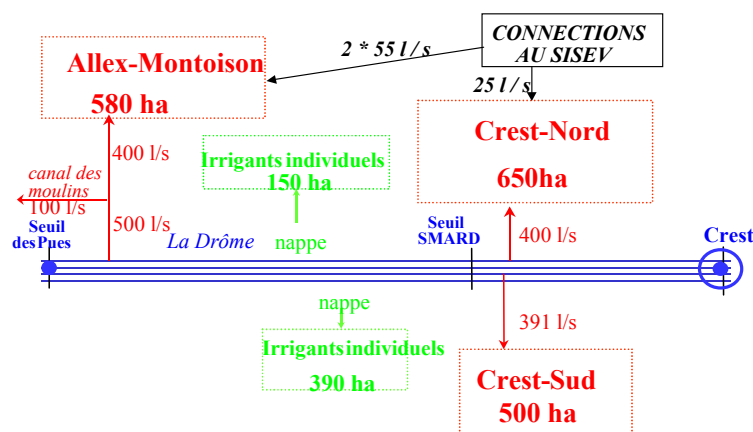


FIG. 12 – Schéma fonctionnel des prélèvements dans la basse-vallée de la Drôme (source : Olivier Barreteau, *Modalités de partage de la ressource en eau à l'aval de Crest*, Rapport d'exécution pour le Cemagref, 2003)

Consommations globales Les consommations annuelles à l'hectare varient entre $1600 m^3$ les années humides et $3000 m^3$ les années très sèches (relevés de l'ASA de Crest-Nord entre 1991 et 2001).

Entre les mesures agri-environnementales, la signature de CTE (Contrats Territoriaux d'Exploitation), et la baisse des primes PAC au maïs irrigué, l'ensemble des présidents observent la fermeture de prises et une **baisse de la consommation** dans leurs réseaux.

Assolements irrigués Il est difficile d'obtenir des chiffres précis quant aux proportions des assolements : les données PAC ne concernent pas l'ensemble des cultures et les déclarations peuvent être faussées. De plus, si individuellement les agriculteurs ne rechignent pas à décrire leur propre assolement, la composition de l'assolement d'un secteur reste un sujet tabou. Le flou autour de données agrégées y est utilisé comme une marge de négociation permettant de tirer les restrictions vers le bas, tout en étant présenté comme la protection d'un espace de liberté sacré de l'agriculteur qui est le choix de son assolement.

Durant la campagne d'enquête, tous les agriculteurs s'accordent à dire que les surfaces de maïs sont en baisse. Les surfaces de tomate diminuent aussi, du fait de la fermeture de la principale coopérative de tomate industrielle de la région.

Les cultures de semence (maïs, tournesol, ail) sont bien implantées dans la vallée, dont les semenciers apprécient le climat qui favorise un bon taux de germination. L'ail, traditionnelle-

ment implanté dans la région, constitue la principale source de revenu, mais aussi de travail, de certaines exploitations.

Les **plantes aromatiques**, sont en plein développement, appuyées par le dynamisme de la coopérative locale.

La culture de vergers, fortement présente dans la vallée du Rhône, est relativement marginale dans la zone d'étude.

1.4.2 Niveau du bassin

Au niveau du bassin, les règles de gestion collective sont celles qui sont fixées par le SAGE, et précisées par l'accord local signé en 2003.

Ressources complémentaires Les réseaux de Alex-Montoison et Crest-Nord bénéficient de ressources complémentaires via des connexions avec le SISEV, qui garantit leur approvisionnement, sauf en cas de force majeure. La construction de la réserve des Juanons amènera 200 l/s supplémentaires à Crest-Nord via sa connexion. La connexion de Crest-Nord est activée de manière permanente, celle de Alex-Montoison ne l'est que lors des situations de crise. Quand les connexions sont activées, les secteurs qui y sont reliés doivent utiliser prioritairement l'eau en provenance de ces connexions. Le surcoût d'exploitation est entièrement pris en charge par les réseaux connectés. Toutefois, leur effort financier est reconnu dans la mise en œuvre des mesures de gestion de crise, et ils ne seront plus sollicités financièrement tant que les autres irrigants n'auront pas fourni un effort équivalent.

Situations de crise Deux niveaux de crise sont définis :

- le niveau **C1** est activé quand le débit moyen journalier au seuil des Pucs (juste en aval des prélèvements agricoles) passe en dessous de $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$;
- Le niveau **C2** est activé quand, au bout d'une semaine ou d'un nombre entier de semaines en C1, le débit au seuil des Pucs reste inférieur à $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$;
- Le retour à une situation normale (**C0**) a lieu dès que le débit moyen journalier au seuil des Pucs devient supérieur à $3 \text{ m}^3/\text{s}$.

Restrictions Les restrictions tiennent compte des diminutions de prélèvements occasionnées par les connexions au SISEV :

- en C1, Crest-Nord et Alex-Montoison sont dispensés de restrictions du fait de leur connexion au SISEV, et Crest-Sud et les individuels doivent réduire leurs prélèvements de 20 % ;
- en C2, Crest-Nord et Alex-Montoison doivent réduire leurs prélèvements de 20 %, et Crest-Sud et les individuels de 40 %. Quand la retenue des Juanons sera en service, Crest-Nord sera entièrement dispensé de restrictions.

Une valeur de référence v_{Ref} est utilisée pour évaluer le débit qu'un réseau doit respecter durant les restrictions. Cette valeur est indexée sur des besoins en eau théoriques moyens du maïs $besoin_{maïs}$, fixés pour chaque semaine d'irrigation. Ces besoins sont des valeurs statistiques qui restent les mêmes quel que soit le climat de l'année en cours.

$$v_{Ref} = \text{surface irriguée du réseau} * besoin_{maïs} * 0.8$$

La valeur 0.8 correspond à un coefficient correcteur traduisant la diversité des cultures (pour chacun des réseaux, on estime que les besoins en eau correspondent à ce que demanderait l'ensemble de la surface irriguée si 80% en était emblavée en maïs).

Mise en œuvre des restrictions Les réseaux collectifs sont responsables de la manière dont ils atteignent les objectifs de réduction de leurs prélèvements. Ils s'engagent à faire état à la CLE tous les mois de leurs prélèvements quotidiens en période normale et horaires en période de crise. Les irrigants individuels reçoivent en début de campagne les jours d'interdiction (1.5 en C1, 3 en C2) qu'ils devront respecter en cas de crise. Ils s'engagent à s'équiper de compteurs et à accepter des contrôles.

1.4.3 Niveau des réseaux

On détaille ici quelles sont les particularités de chacun des 3 réseaux.

Crest-Nord Le réseau connaît des **difficultés** de pression **sur son haut service**, où environ 1/4 de ses surfaces consomment 1/3 du débit. Un surpresseur a donc été installé, qui coupe ce haut-service du reste du réseau. Des contraintes plus strictes y sont appliquées, et une attention particulière y est accordée. 30 ha (secteurs des Piquets) sont déjà complètement basculés sur le SISEV. La réserve des Juanons permettrait de déconnecter définitivement ce haut-service (230 ha) de la Drôme, et d'abandonner le surpresseur, ainsi que éventuellement d'effectuer un transfert de droits du bas service vers le haut service, plus demandeur d'eau.

La consommation plus importante du **haut-service** s'explique par le fait que les **terres y sont plus légères** et que l'on y trouve proportionnellement **plus de tomate et de maïs**. De plus les agriculteurs du haut-service sont globalement plus jeunes et plus tournés vers l'irrigation et donc en demande de droits d'eau plus importants, alors que dans le bas service, certains cherchent plutôt à céder leurs droits d'eau. Ce transfert n'est cependant physiquement pas possible tant qu'une connexion plus importante avec le SISEV n'existe pas.

La présence de grandes surfaces en maïs sur tout le réseau fait que le **développement du maïs semence** y est **très limité**.

Enfin, il y a beaucoup de **petites surfaces** et donc de gros débits à l'hectare. En effet, une borne délivre en général un débit minimal nécessaire au fonctionnement d'un enrouleur quelque soit la surface desservie. Le débit amené sur une petite surface est donc dans certains cas suffisant pour irriguer une surface plus importante.

Règles de gestion Sur Crest-Nord la présence de gros débits à l'hectare, entraînait 2 types d'effets pervers :

- une tendance à frauder et à arroser plus que la surface souscrite ;
- beaucoup avaient la possibilité de n'arroser que dans les conditions idéales, la nuit et sans vent, si bien que le débit instantané demandé alors devenait largement supérieur à la capacité du réseau.

A cela s'ajoutent des problèmes de dimensionnement constitutifs, surtout sur le haut-service, si bien qu'à partir de 1991, des jours d'arrêt proportionnels au débit à l'hectare ont été imposés, de manière à ce que tout le monde dispose d'environ $600 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{semaine}$ dans le bas-service, et de $550 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{semaine}$ dans le haut-service. Cette action est qualifiée par le président du réseau d'« **égalisation des volumes** ». Les jours d'arrêt résultants sont listés dans le tableau 13.

Les irrigants peuvent négocier la répartition de leurs jours d'arrêt : ils peuvent par exemple choisir de les reporter sur une seule prise qu'ils n'utilisent pas et de n'avoir aucune restriction sur leurs autres prises.

Les demi-journées d'arrêt sont définies entre 8h et 20h ou entre 20h et 8h. Au début de la mise en place des tours d'eau le réseau subissait des pointes de débit aux alentours de ces horaires

Débit à l'hectare ($m^3/h/ha$)	Bas-service	Haut-service
en dessous de 4.6	pas de jour d'arrêt	0.5 jour d'arrêt
entre 4.6 et 6.5	1 jour d'arrêt	1.5 jour d'arrêt
entre 6.5 et 8	2 jours d'arrêt	2.5 jours d'arrêt
au dessus de 8	3 jours d'arrêt	3.5 jours d'arrêt

TAB. 13 – Tours d'eau sur Crest-Nord

parce que les irrigants avaient tendance à commencer un peu plus tôt ou à arrêter un peu plus tard. Le problème se serait atténué en insistant sur cette contrainte dans le document.

En 2002, ce tour d'eau était validé comme équivalent à la réduction de 20% demandée pour le stade C1. En C2, 1 jour d'arrêt est rajouté à tout le monde.

L'ASA de Crest-Nord a la particularité d'avoir 1/3 des ses prises dans des jardins. Ces **prises de jardins** irriguent 45 ha, mais ne consomment que l'équivalent de 6 ou 7 ha de terres agricoles. Afin de favoriser l'irrigation agricole, elles sont soumises à un tour d'eau différent : **interdiction d'arroser la nuit, de 22h à 6h**.

Contrôle En début de saison, tous les irrigants reçoivent un document où sont inscrit les jours d'arrêt de tous les abonnés : « *c'est le meilleur contrôle ça. Chacun peut contrôler son voisin qui est à côté* » .

Lors de la mise en place des tours d'eau, le président a tenté d'imposer une **déclaration de l'assolement prévu** à ses irrigants du haut-service afin de mieux répartir prévisionnellement ses jours d'arrêt, et de garder un meilleur contrôle sur des dérives éventuelles. Devant les réticences de certains qui estiment ne pas avoir à rendre de comptes s'ils payent leur abonnement et respectent leur contrat, ces déclarations ne subsistent que de manière informelle (le président leur téléphone chaque année).

D'autre part, **toutes les semaines**, le président du réseau et un technicien de la SMARD regardent les **relevés des compteurs** des bornes du réseau afin de repérer d'éventuels dysfonctionnements ou d'éventuelles fraudes (le président du réseau connaît bien ses irrigants et a donc une idée de leur assolement et de leur consommation normale). Ses abonnés ont aussi l'habitude de l'appeler dès que leur borne ne fonctionne pas normalement. En cas de problèmes techniques, le technicien du SMARD intervient, et si le président soupçonne une dérive, il va voir l'irrigant concerné. Il lui est arrivé de faire intervenir le SMARD, qui représente une autorité plus extérieure, pour contrer une « forte tête » . Le président n'a jamais eu à recourir à des sanctions pour faire respecter les règles du réseau : « *c'est arrivé que l'on trouve des gars, on leur ferme la borne et puis on leur téléphone, on leur dit « eh oh dis » . Puis comme on est tous du pays, quand on est 3 ou 4 à avoir vu le truc, ils ont l'air malin !* »

Il est à noter que malgré la régulation et les contrôle établis sur Crest-Nord, les problèmes de dimensionnement persistent sur le haut-service et ne pourront être résolus que par la mise en place des Juanons.

Crest-Sud La culture de **maïs semence** est **particulièrement développée** sur Crest-Sud où une sensibilisation avait été organisée lors de l'arrivée des semenciers dans la région.

Règles de gestion Le réseau de Crest-Sud impose depuis 1999 un jour d'arrêt hebdomadaire à tous ses abonnés à partir du 1er juillet. Ce tour d'eau systématique a pour but de réguler

préventivement la consommation des irrigants et d'éviter des surcharges sur le réseau. Chaque irrigant se voit communiquer son jour d'arrêt par courrier en début de saison. Un jour d'arrêt supplémentaire est prévu en cas de crise.

Contrôle Selon un abonné, beaucoup de bornes de Crest-Sud n'auraient plus de limiteurs. Les consommations instantanées sont largement supérieures aux débits souscrits et le réseau subit des pointes qu'il ne peut supporter, ce qui serait une raison de la mise en place des tours d'eau. Cette situation, qui concernerait environ 30 % des abonnés du réseau, est ressentie comme une injustice par certains « *On paye 50 frs le m³ souscrit, alors celui qui a souscrit 10 m³ et qui en utilise 40, il vole le réseau; et l'imbécile c'est celui qui a beaucoup souscrit parce qu'il paye pour celui qui n'a pas beaucoup souscrit* ». Elle est cependant tacitement admise par les gestionnaires « *J'en ai parlé plusieurs fois en conseil d'administration et c'est oui mais bon tu comprends, à l'époque c'est son père qui a souscrit, maintenant comment tu veux qu'il fasse ?* ». Par ailleurs, les tours d'eau sont de l'avis des agriculteurs rencontrés bien respectés.

Enfin, un relevé des compteurs est fait au début du mois juillet, et un autre en septembre. Le relevé des compteurs n'est donc pas utilisé comme un instrument de contrôle du fonctionnement du réseau comme c'est le cas sur Crest-Nord.

Allex-Montoison Le président estime que la **connexion avec le SISEV** permettrait d'isoler environ 1/5 du réseau. Mais il préfère fonctionner en **circuit ouvert** afin de mieux répartir la pression. Il estime qu'il peut ainsi monter jusqu'à 30% de prélèvement sur ses connexions.

Règles de gestion En 2002, il n'y avait **pas de tours d'eau** sur Allex-Montoison, et le président qui estime avoir déjà fourni son effort en se connectant au SISEV y est plutôt réticent. Certains irrigants placés en bout de ligne se plaignent de problèmes de pression réguliers et ne peuvent irriguer la nuit, ou alors seulement le weekend. Ceux qui ont aussi des prises sur Crest-Nord ou Crest-Sud affirment que la solution des tours d'eau est plus équitable car elle permet à ceux qui sont en bout de ligne d'avoir un meilleur service.

Pour tous les réseaux La taille relativement réduite des réseaux et la forte représentativité des agriculteurs dans les conseils d'administration fait que tout le monde se connaît et que le contrôle social est très fort. Les règles, explicites et implicites, sont globalement respectées. Même dans le cas des limiteurs de Crest-Sud, la règle du réseau est devenue d'accepter cette déviance. Les présidents des 2 réseaux ayant instauré un tour d'eau affirment que depuis qu'il y a un tour d'eau, les irrigants font globalement plus attention et que les prélèvements ont diminué.

1.4.4 Niveau des exploitations

Organisation de l'irrigation [Zanker, 1999] Le mode d'organisation de l'irrigation sur une exploitation dépend des contraintes objectives (ressource, équipement, assolement, règlements, main d'œuvre) et subjectives (doses, aversion à l'irrigation de jour ou sensibilité aux effets du vent). Généralement, les agriculteurs établissent un programme d'irrigation sur 1 semaine en prenant en compte les contraintes qu'ils se fixent. Suivant le niveau de contrainte, ce programme laisse en général quelques jours de sécurité, où aucune irrigation n'est programmée. En cas de problèmes tels que des pannes, des interdictions d'irriguer, ou des journées de vent, l'irrigation peut être reportée sur ces jours de sécurité.

Quand les jours d'arrêts hebdomadaires, systématiques ou en cas de crise, sont fixés en début

de saison, les irrigants peuvent directement adapter leur calendrier à cette contrainte. Sinon c'est souvent le dimanche ou le weekend qui est dégagé en sécurité. Hormis les interdictions éventuelles, les contraintes principales pouvant amener à reporter des irrigations ou modifier son calendrier apparaissent comme :

- les pertes de charge pour les irrigants en bout de ligne, qui se plaignent de ne plus pouvoir irriguer la nuit, sauf le weekend, particulièrement sur les réseaux où il n'y a pas de jours d'arrêt établis ;
- le vent, qui peut être assez violent dans cette région soumise au Mistral ;
- l'évapotranspiration (ETP). La plupart des irrigants n'irriguent pas de jour par grosse chaleur s'ils en ont la possibilité.

Typologie [Zanker, 1999] a distingué 3 types de stratégies vis à vis de l'irrigation :

1. exploitation tendue de la ressource en eau. Ce cas de figure se retrouve plutôt chez les agriculteurs ayant conservé un gros assolement en maïs. La tension de la ressource reste toutefois limitée pour la plupart des exploitants de la Drôme. Les réseaux de la Drôme étant assez récents, les souscriptions sont assez importantes pour que la plupart des agriculteurs passent leur tour d'irrigation en 5 jours ;
2. exploitation confortable de la ressource en eau. Ce cas de figure se retrouve plutôt chez les agriculteurs ayant diversifié leur assolement vers des cultures de pointe, à forte valeur ajoutée. Ils sont alors souvent plus exigeants sur la fiabilité de la ressource soit qu'ils aient besoin d'irrigation plus faibles mais plus fréquentes, soit que l'assolement soit très sensible au stress hydrique. Pour ces irrigants, l'irrigation du maïs n'est plus une priorité, et les tours peuvent passer en 3 jours ;
3. exploitation occasionnelle de la ressource en eau. La ressource n'est utilisée qu'occasionnellement (assolement demandant 1 ou 2 irrigations). Ce cas de figure est sans doute plus fréquent chez les individuels, car les collectifs souhaitent en général amortir leurs frais fixes d'irrigation.

Ces stratégies se traduisent dans l'organisation du tour d'eau. Schématiquement, dans le cas 1, seul 1 jour ou 2 de sécurité sont possibles. Dans le cas 2, l'irrigant qui « passe en 3 jours » a suffisamment de souplesse pour n'irriguer que dans des conditions optimales (la nuit, sans vent), effectuer des petites irrigations tous les jours, ou regrouper son irrigation sur quelques jours. Dans le cas 3, l'irrigation n'est qu'occasionnelle et il n'y a donc pas spécialement de tour d'eau.

Les disponibilités moyennes se situent entre 4 et 8 $m^3/h/ha$. La plupart des agriculteurs sont suffisamment bien équipés pour supporter 1 à 2 jours d'arrêt hebdomadaires. La mise en place des tours d'eau des réseaux n'a donc posé de problème à aucun des agriculteurs rencontrés, mais par contre les plus justes peuvent se retrouver coincés et devoir irriguer par grand vent, ou sous une forte ETP. Il est à noter que ceux qui font attention au vent ou à l'ETP n'irriguent pas forcément mieux, et que les effets cumulés peuvent être négatifs : « *le gars qui a du confort [...] le jour où ça ne souffle plus il arrose à fond. D'ailleurs c'est après les jours de vent qu'on a des problèmes sur nos pompes* » .

Ressources de différents types Les irrigants possédant à la fois des prises collectives et des ressources individuelles se considèrent souvent d'abord comme irrigants collectifs. Leurs ressources individuelles étaient souvent là avant l'installation des réseaux, et ils s'en servent en complément, ou bien par exemple dans le cas de l'ail pour irriguer en dehors de la période d'ouverture des réseaux.

Pratiques Un tableau listant individu par individu les pratiques observées lors du séjour du terrain ainsi que par Sébastien Zanker en 1999 est fourni en annexe C.2. L'annexe C.3 liste les pratiques évoquées lors des entretiens par rapport à l'utilisation de l'eau, des équipements, et du choix de l'assolement en fonction de types de motivations.

Contraintes particulières à certains types de cultures Les cultures de semence imposent une distance d'isolement. Elle est de 100 m pour l'ail, de 300 m pour le maïs et de 800 m pour le tournesol.

La culture de l'ail, qui prend beaucoup de temps de travail peut entraîner des retards sur le lancement des irrigations sur le maïs (la récolte de l'ail a lieu fin juin - début juillet, au moment où le maïs commence à être irrigué).

Doses apportées Lors des entretiens, plusieurs agriculteurs ont déclaré mieux maîtriser leur irrigation qu'il y a 10 ou 20 ans, parce que plus sensibilisés aux économies d'eau par la pression médiatique notamment. Les doses apportées lors d'une irrigation doivent correspondre aux besoins de la plante pour la durée du tour d'eau. Ces besoins dépendent du type de sol ainsi que du climat et leur estimation est donc très difficile, d'autant que le réglage des équipements ne peut être précis (effets du vent, pertes de débit...). Les irrigants utilisent donc le plus souvent des doses fixes, ou différenciées selon le stade de croissance de la plante.

- **Maïs** Les doses varient entre 30 et 40 mm par semaine. La pratique moyenne établie par [Zanker, 1999] est de 30 mm en début et en fin de saison, et de 40 mm entre le 10 juillet et le 15 août.

Beaucoup d'enquêtés affirment être beaucoup moins attentionnés envers leur maïs depuis que les primes PAC ont baissé. Ainsi, certains n'irriguent que « *quand ça jaunit* », ce qui reviendrait à moins de 10 irrigations « *bien costauds* » dans la saison. Certains ont des terres très profondes où ils n'irriguent pas leur maïs.

Lancement de l'irrigation : dans des réunions, des irrigants ont affirmé commencer systématiquement la **dernière semaine de juin** afin d'anticiper les restrictions qui commencent souvent début juillet. Des informations peuvent être utilisées pour adapter le lancement de l'irrigation au climat ou au sol : tensiomètre, bulletin de la Chambre d'Agriculture, indices visuels (voir le paragraphe « informations utilisées »).

L'irrigation sur le maïs semence s'arrête à peu près 2 semaines avant celle sur le maïs consommation. Les doses apportées sont sensiblement inférieures (30 à 35 mm / semaine en période pointe). En général l'irrigation du maïs consommation continue jusqu'à septembre où s'arrête au moment des orages qui arrivent souvent à la fin du mois d'août.

- **Tomate** Avant le 1^{er} juillet l'irrigation est apportée par petites doses irrégulières de 15 à 20 mm. À partir du 1^{er} juillet, les doses apportées sont sensiblement les mêmes que pour le maïs. L'arrêt de l'irrigation se fait plus tôt, autour du 15 août.
- **Oignon** De début juin à fin juillet, les doses sont de 20 mm tous les 4-5 jours. La plante valorise bien la ressource mais réagit très mal au stress hydrique.
- **Plantes aromatiques** Pas de données précises. Ce sont des cultures à forte valeur ajoutée mais sensibles au stress hydrique. Elles demandent beaucoup de travail, un arrosage fréquent et donc une ressource sûre.
- **Tournesol** Le tournesol consommation n'est pas irrigué ou que très ponctuellement. Le tournesol semence est toujours irrigué une fois avant la floraison.
- **Ail** L'ail n'est pas irrigué en été, mais l'ail de printemps est irrigué à partir de la mi-février, et l'ail d'automne à partir de d'octobre/novembre, c'est à dire hors de la saison d'ouver-

ture des réseaux. Certains irrigants font donc pression pour que les réseaux ouvrent plus longtemps. L'ail de printemps reçoit 2 à 6 irrigations de 30 mm environ entre février/mars et fin-juin mais ne supporte pas le stress hydrique au semis. L'eau est donc absolument nécessaire.

Respect des règles collectives Les tours d'eau imposés par les réseaux, qui bénéficient d'un contrôle social interne, sont globalement bien respectés. Selon le président de l'ADARIL, les irrigants individuels respectent maintenant les jours d'arrêt imposés par commune parce que si quelqu'un arrose dans une commune qui est en jour d'arrêt « ça se voit » . Les interdictions préfectorales qui étaient imposées au jour le jour pendant les étiages, étaient par contre peu respectées par tous, tant par le peu de contrôle exercé par la Police de l'Eau que par le sentiment d'avoir déjà fait suffisamment d'efforts ou de l'inutilité de la mesure.

Gestion de la pénurie Tant qu'il est possible de reporter les irrigations dans des plages de la semaine inutilisées, les irrigants n'ont pas à gérer la pénurie. Si il n'est plus possible de reporter, il faut soit sacrifier une culture moins rentable que les autres, soit répartir la pénurie sur toutes les cultures en raccourcissant les passes.

Réaction à la pluie La réaction à la pluie dépend bien sûr de la propension à maîtriser ses doses de l'irrigant, mais surtout de son niveau de contrainte, puisque les irrigants calculent leur reprise par rapport à la dernière parcelle à être irriguée dans le tour : si le tour d'eau passe en 3 ou 4 jours, la reprise peut attendre quelques jours de plus que pour un tour en 6 jours. Les réactions moyennes relevées sont les suivantes :

	< 20 mm	autour de 30 mm	autour de 50 mm	autour de 80 mm ou plus
tendu	ajuste les doses	3-4 jours d'arrêt	1 tour	1 tour puis ajuste les doses
confortable	1-2 jours d'arrêt	1 tour	10 jours	2 tous

TAB. 14 – Réactions à la pluie selon le niveau de précipitation. Tendu et confortables désignent des réactions moyennes hautes ou basses

Le niveau de réaction peut aussi dépendre du type de sol ou du cycle de la plante.

Informations utilisées En général les irrigants n'utilisent des informations pour ajuster leur irrigation qu'au lancement de la saison ou pour reprendre après la pluie. Seuls ceux qui ont un niveau de contrainte sur la ressource faible ou un équipement réglable et automatique (vannes volumétriques) disent ajuster à chaque tour leurs doses selon l'ETP ou le stade de la culture. Peu d'entre eux ont parlé de différencier leurs doses selon le type de sol (mais les sols sont souvent hétérogènes sur une parcelle) « il y en a qui arrosent 12 heures d'affilée sur du sable. Moi le maximum que je mets c'est 8 heures » . Certains ont plus nettement tendance à innover dans l'automatisation et la maîtrise de leur irrigation (l'un deux prend des stagiaires d'écoles agronomiques tous les étés pour faire des suivis, tester des tensiomètres..). Mais pour d'autres, « ceux qui sont à la pointe de la technique consomment toujours autant » . Les différentes informations utilisées sont les suivantes :

- la **météo** : certains irrigants disent arrêter l'irrigation quand la météo annonce de la pluie dans les 3 jours à venir, soient qu'ils soient attentifs à l'eau qu'ils utilisent, soit qu'ils aient peu de contrainte sur leur ressource ;
- le **tensiomètre** : les tensiomètres permettent de caractériser l'état hydrique du sol. Ils sont utilisés principalement pour lancer les irrigations ou reprendre après une pluie. Beaucoup d'irrigants ne se fient pas aux tensiomètres parce que leurs terres sont trop hétérogènes, et ce au sein même d'une parcelle. Un des irrigants rencontrés dit mettre ses tensiomètres dans les endroits les plus mauvais et revenir plus souvent : *« les terres à bon stock s'adaptent à des petites doses alors que les petites terres ne s'adaptent pas à des grosses doses. Faut aligner sur les mauvaises et puis voilà »* (cet irrigant n'a que 3 passes dans son tour d'eau) ;
- l'**œil** : certains regardent l'humidité du sol directement, à la bêche, d'autre se fient à l'aspect des plantes : départ de l'irrigation du maïs au « stade 3 feuilles », reprise ou arrosage « quand les bordures jaunissent » ;
- le **Zoom**. C'est le bulletin hebdomadaire de la chambre d'agriculture, qui fournit des conseils sur les dates de lancement des irrigations ou de reprise, ainsi que les données climatiques et culturales pour la semaine en cours, évapotranspiration (ETP) et K_c (coefficient cultural), qui permettent de calculer les besoins en eau théoriques. La plupart des agriculteurs regardant le zoom disent s'en servir pour conforter leurs décisions. L'un d'eux, qui a des vannes volumétriques utilise directement l'information pour programmer ses vannes avec le besoin théorique pour la semaine ainsi calculé *« c'est mathématique, et puis point à la ligne »* ;
- les **voisins** : certains se concertent avec leurs voisins sur quand lancer ou reprendre l'irrigation. D'autres regardent ceux qui ont des tensiomètres, ou se donnent quelques jours pour partir après ceux qui « sont toujours un peu en avance » .

Gestion des accès multiples La plupart du temps, les irrigants qui possèdent plusieurs types d'accès ont des exploitations morcelées, si bien que chaque parcelle ne peut être irriguée que par un accès. Le type d'accès ne peut donc alors intervenir que dans le choix de l'assolement. Hormis des cas bien spécifiques (cultures nécessitant une irrigation hors de l'ouverture des réseaux), c'est d'abord le type de sol qui détermine le choix d'un assolement, puis seulement après la qualité de service offerte par le type d'accès (prises en bout de ligne notamment). Quand les agriculteurs décident de ne pas irriguer toute leur surface irrigable, ils privilégient leurs accès collectifs, pour amortir leurs frais fixes, et placent les cultures ne demandant que des irrigations ponctuelles aux accès individuels. Si des parcelles sont irrigables par 2 accès, il devient bien sûr possible d'utiliser l'un des 2 quand l'accès principal est interdit.

Composition de rôles Un des objectifs du séjour sur le terrain, était, dans l'optique d'étudier le chevauchement des niveaux d'organisation dans la Drôme grâce à AGR, de recueillir des informations sur la manière dont l'appartenance à différents réseaux sociaux, par l'accès à l'information qu'elle suppose, pouvait influencer sur la pratique des irrigants. Il s'est avéré que ce n'était pas la bonne manière de recueillir ce type d'information, puisqu'une personne peut difficilement s'auto-analyser et évaluer d'où viennent les informations qu'elle utilise, et comment elle les utilise. On constate cependant que la plupart des agriculteurs rencontrés sont des personnes pivot, qui ont des responsabilités dans des organisation multiples : réseaux d'irrigation, communes, organisations agricoles, commissions de gestion... Quelques éléments recueillis sont fournis dans l'annexe C.4. S'ils n'arrivent pas à identifier ce que leur implication dans ces réseaux

induit vis à vis de leur relation à l'eau, ils reconnaissent qu'ils sont « plus au courant », et aussi pour certains que les autres agriculteurs les considèrent comme des relais d'information.

Dans la suite de notre étude, nous avons donc laissé de côté ce type de composition de rôle, que pourrait modéliser AGR, mais dont la prise en compte aurait demandé un travail sur le terrain beaucoup plus poussé, pour nous concentrer sur les niveaux d'organisation constitués par les différents niveaux de règles de gestion présents sur le bassin. La gestion d'accès multiple constitue alors une composition de rôles.

3 niveaux de règles de gestion de l'eau coexistent dans la basse vallée de la Drôme :

- règles au niveau du bassin, définies par le SAGE : objectifs de restrictions à mettre en œuvre en cas de crise ;

- règles au niveau des réseaux d'irrigation : chacun des 3 réseaux définit des règles collectives qui lui sont propres. Ces règles consistent principalement en des jours d'arrêt, relatifs ou non aux cubages des irrigants, prédéfinis ou non, valables toute la saison, pendant les 2 mois d'été ou seulement pendant les périodes de crise.

Chacun des réseaux se différencie aussi par les ressources complémentaires auxquels il a accès et des contraintes physiques différentes (qualité du dimensionnement, présence de limiteurs), ainsi que par le niveau de contrôle qu'il exerce sur ses abonnés ;

- règles individuelles : chaque agriculteur définit ses propres règles de pilotage de l'irrigation. Ces règles dépendent des doses qu'il souhaite apporter et des contraintes sur ses ressources. Elles portent sur différents moments : démarrage de l'irrigation, reprise après une pluie, réorganisation en cas de jours d'arrêt...

De plus, chacune des ressources à disposition de l'irrigant peut poser des contraintes différentes selon les règles collectives dont elle dépend.

2 L'intervention du Cemagref

Cette partie s'intéresse à la concertation autour des règles de gestion collective de l'eau d'irrigation dans la bassin de la Drôme, et à l'intervention du Cemagref dont elle a été l'occasion. Après avoir brièvement retracé l'historique du SAGE et des enjeux de cette concertation, on présentera les différents outils développés par le Cemagref.

2.1 Contexte de l'intervention

La signature en 2003 d'un accord local sur les modalités de partage de la ressource en eau dans la basse-vallée de la Drôme par les représentants de l'irrigation scelle la mise en œuvre d'un des volets du SAGE Drôme après 5 années de discussion.

L'histoire de la concertation autour de la rivière Drôme commence en 1983 quand des élus locaux, alertés sur la pollution de la rivière, ainsi que sur l'état de ses rives et de son lit par des usagers, entament des démarches qui n'aboutiront pas faute de financements.

87-91 : avant le SAGE [**Lascoumes and Le Bourhis, 1998**] En 1987, la CCVD (à l'époque DAVD) initie un projet de contrat de rivière, et lance des études sur la rivière. Mais certaines

études prennent du retard et un **désaccord** fort apparaît autour de la **gestion des étiages**. Le projet d'une grande retenue très en amont, le **barrage du Bez**, met en exergue deux visions opposées de l'aménagement du territoire et cristallise les tensions entre les partisans du développement agricole, et ceux d'une amélioration de la qualité du milieu. Le projet est finalement écarté et le contrat de rivière est signé en 1991. Il ne porte que sur des actions d'assainissement et de mise en valeur de la rivière.

Les problèmes d'étiages et d'extraction de graviers ne sont pas réglés, et sont encore exacerbés par la sécheresse des années 89 à 91. Quand la Drôme s'assèche à Livron, la FRAPNA (Fédération Rhône-Alpes de Protection de la Nature) assigne l'ensemble des réseaux d'irrigation en procès. D'un autre côté, la complaisance de la préfecture vis à vis du monde agricole continue à s'illustrer *« on allait de l'autre côté dans une ancienne carrière. C'était carrément illégal mais quand même toléré. Le préfet m'avait dit je vous envoie les gendarmes, vous irez signer, mais ça vous laisse encore une semaine ! (..) Bon aujourd'hui ça ne serait plus possible »*.

Durant cette période, la création de la Réserve des Ramières au cœur des sites de pompage, et entièrement gérée par la FRAPNA, vient encore amplifier les tensions entre agriculteurs et naturalistes.

91-97 : Élaboration du SAGE En 1991, les problèmes liés aux étiages et à l'extraction de graviers restent entiers et le dialogue est bloqué. Afin de pouvoir contourner les prés carrés de la DDAF et de la DDE, la CCVD fait appel à la Direction de l'Eau du Ministère de l'Environnement qui est alors en train d'élaborer la loi sur l'eau de 1992 et le dispositif des SAGE.

Le bassin de la Drôme est choisi comme site pilote pour les SAGE, et la première MISE³⁰ y est créée à titre expérimental.

A la sortie des cinq années de son élaboration, le SAGE dresse un bilan détaillé de l'état de la rivière, fixe des objectifs de moyen terme et propose des actions pour atteindre ces objectifs. Les volets principaux concernent la gestion physique de la rivière (lits et berges endommagés notamment par l'extraction de graviers), la qualité de l'eau et des milieux, la prévention des risques, et la gestion des étiages.

C'est à ce dernier volet que l'on s'intéresse exclusivement. La ressource en eau de la Drôme est utilisée presque exclusivement par l'irrigation. Les actions préconisées par le SAGE en matière de gestion collective de la ressource pour atteindre les objectifs de réduction des étiages ne concernent donc que le monde agricole, et leur mise en œuvre est discutée dans le groupe de travail restreint présenté au 1.3.2. Elles sont détaillées dans le 2.1.1.

1997-2003 : Mise en œuvre du SAGE Des comités sécheresse existaient depuis 1994 afin de négocier avant la saison l'application des arrêtés préfectoraux d'interdiction d'irriguer. Dans le cadre de ces comités, les réseaux collectifs ayant mis en place des tours d'eau se voient dispensés des interdictions d'irriguer, et en 1998, des jours d'arrêts par commune sont prévus pour les irrigants individuels.

Parallèlement, le groupe de travail négocie les modalités de mise en œuvre des actions du SAGE, et un second contrat de rivière est signé en 1998 pour 7 ans afin d'opérationnaliser ces actions et d'obtenir des aides financières.

Durant cette période, la CCVD qui apparaissait à la fin des années 80 en forte opposition avec le monde agricole a su établir un dialogue plus constructif au fur à mesure des diverses réunions.

³⁰Mission Inter-Services de l'Eau, coordonne les services touchant à l'eau de la DDAF, de la DDE, de la DDASS et de la DIREN

L'apaisement se fait ressentir aussi au niveau de la réserve des Ramières, maintenant gérée par la CCVD, en concertation avec un conseil composé de représentants des communes, du tourisme, de la protection de l'environnement et des utilisateurs, dont un représentant du monde agricole « *La décision finale appartient à la CCVD. On donne un avis qui la plupart du temps est suivi et ça se passe bien* » .

2.1.1 Objectifs du volet gestion des étiages du SAGE Drôme

Le SDAGE impose qu'un débit objectif d'étiage (DOE), définissant le débit mensuel moyen en dessous duquel les usages de la rivière ne sont plus possibles, soit fixé et respecté sur les cours d'eau.

Le SAGE fixe le **DOE de la Drôme à $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$ au seuil des Pues**, c'est à dire en aval des prélèvements agricoles. Dans le cas où le débit naturel (débit en amont des réseaux) est inférieur à $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$, le DOE est égal au débit de la rivière. La valeur de $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$ correspond au débit réservé, devant garantir la survie de la faune aquatique et fixé par la loi pêche de 1984 au dixième du débit moyen annuel d'un cours d'eau. C'est une valeur arbitraire, qui n'est pas forcément adaptée à un cours d'eau subissant un régime de type méditerranéen comme la Drôme qui descend naturellement en dessous de son débit réservé. Cette valeur est donc très critiquée par les agriculteurs, qui y voient une raison de plus de ne pas concéder d'efforts tant qu'un ouvrage de soutien ne sera pas construit.

Un bilan de la ressource en eau sur 24 ans montre que le DOE n'est respecté qu'une année sur 4, que 2 années sur 4 le déficit estimé est de 2 millions de m^3 , et qu'une année sur 4 ce déficit est estimé entre 2 et 9 millions de m^3 . Le SAGE se fixe pour objectif d'**apporter 2 millions de m^3 supplémentaires** à la rivière afin que le déficit n'apparaisse plus qu'une année sur 4, et de mettre en place une gestion de crise en cas de déficit. A terme, il est prévu d'amener 9 millions de m^3 à la rivière.

Actions préconisées Afin d'atteindre les objectifs de respect du DOE, 3 types d'actions sont préconisés :

- gel de la surface irriguée à la situation de 1995 ;
- création de **nouvelles ressources en eau**. Plusieurs projets ont été envisagés et étudiés :
 - stockage de l'eau dans une **retenue collinaire sur le site des Trois-Vernes** (voir fig. 9). Ce projet prévoyait la construction d'une retenue de 600000 m^3 maillée sur le réseau de Crest-Sud ;
 - construction d'une **réserve tampon aux Juanons**. Cette réserve de 700000 m^3 serait alimentée par le canal de la Bourne et pourrait être réapprovisionnée en cours de saison. Un maillage supplémentaire de 200 l/s serait alors établi entre le SISEV et Crest-Nord ;
 - exploitation du **karst de la Gervanne**. Dans un premier temps, il a été envisagé de construire une retenue sur la Gervanne, au site des Massons, mais ce projet a vite été rejeté pour raisons environnementales (« *d'un coup là-haut, on a retrouvé des écrevisses !* »). Une seconde option serait de pomper le karst de la Gervanne afin de réalimenter directement la Drôme. Des études ont été menées par Antea afin de déterminer quel débit il est possible de pomper dans le karst sans assécher la source par laquelle il se vide naturellement ;
 - enfin, une dernière option est de **remonter de l'eau du Rhône** vers les réseaux d'irrigation. Le projet prévoit de construire 3 adductions de 255 l/s vers les bâches de chacun des réseaux ;

- mise en place de **mesures de gestion de crise**. Une alerte serait déclenchée dès que le débit au seuil des Pues passe en dessous du DOE. En cas d'alerte, les transferts d'eau depuis les ressources complémentaires doivent être mis en service. Deux niveaux d'alerte doivent être définis en fonction de la gravité de l'étiage. Lors d'une première étape C1, les prélèvements doivent être diminués de 20%, et si l'étiage continue à s'aggraver, les prélèvements doivent diminuer de 40% dans une seconde étape C2.

La mise en place d'un observatoire de l'eau est également préconisée, visant à suivre les débits de la Drôme ainsi que des prélèvements. L'observatoire de l'eau implique la mise en place de stations hydrométriques au seuil des Pues et au niveau de Crest, ainsi que de compteurs sur tous les prélèvements, collectifs et individuels.

2.1.2 Concertations autour de l'irrigation

Les discussions du groupe de travail ont porté sur les projets de ressources complémentaires et sur les modalités des mesures de gestion collective de la crise.

Ressources complémentaires Les décisions concernant la construction de ressources complémentaires dépassent bien sûr le cadre du groupe de travail. Les différents projets auront chacun en leur temps été considérés comme des options sérieuses ou repoussés au gré des volontés politiques locales :

- le projet de la retenue des Trois-Vernes a été parmi les premiers projets étudiés. Porté par le président de Crest-Sud et maire de Divajeu, le projet recueillait l'approbation de l'ensemble des usagers mais a été finalement abandonné en 2000/2001 suite à l'opposition de la ville de Crest ;
- le projet des Juanons, également envisagé dès le début de la concertation, a pris beaucoup de retard à cause de sa proximité avec la ligne TGV. La SNCF estimait qu'il ne garantissait pas suffisamment la sécurité des voies. Il a finalement été définitivement approuvé en 2003 et est en cours de réalisation ;
- l'exploitation du karst de la Gervanne rencontrait des réticences chez les agriculteurs mêmes qui ont le sentiment que le karst de la Gervanne, qui fournit de l'eau de très bonne qualité, devrait constituer une réserve d'eau potable ;
- le projet d'adduction du Rhône est particulièrement efficace : l'eau du Rhône est toujours disponible et les réseaux qui s'alimenteraient préférentiellement avec cette eau diminueraient radicalement leurs prélèvements dans la Drôme (le débit de pointe cumulé pour les réseaux est estimé à 1350 l/s, et l'adduction amènerait 755 l/s). Mais le projet est qualifié de pharaonique par certains, d'autant plus que la qualité des eaux du Rhône pose problème
« *maintenant que l'eau [de la Drôme] est propre, on ne va pas ramener l'eau du Rhône* » .

Il aura finalement fallu 6 ans pour qu'une décision définitive concernant l'apport d'une ressource complémentaire soit prise. Ce retard est un élément important de pollution des concertations sur la mise en place de règles de gestion collective : le SAGE promet un apport de 2 millions de m^3 , et les irrigants considèrent ne plus avoir d'efforts à faire tant que les aménagements promis ne sont pas réalisés : « *on est prêts à faire des efforts, on est prêts à payer encore, mais qu'on n'ait plus cette épée de Damoclès des étiages - on en a ras le bol* » .

Avant que le projet des Juanons ne soit finalement validé, la situation s'était à nouveau bloquée : ainsi dans une réunion dont le but était de préparer les modalités de gestion de crise avant l'été 2002, les agriculteurs s'étaient organisés pour faire en sorte que le sujet ne soit jamais abordé « *en attendant le temps passe et on est en train de monter un truc pour gérer la pénurie. (...) C'est fou que dans une région où il y a de l'eau en pagaille on soit pas foutu politiquement de*

se donner les moyens d'avancer. Alors voila on est un petit peu énervés et à la dernière réunion, on s'était dit tous ensemble on ne parlera pas de tours d'eau » .

Modalité des mesures de gestion de crise Les modalités des mesures de gestion de crise discutées par le groupe de travail sont principalement :

- les **conditions de déclenchement** des niveaux de crise C1 et C2 et de retour à la normale ;
- la **répartition** de l'effort financier pour la construction des nouvelles ressources, et la manière dont cet effort est pris en compte dans les restrictions : les restrictions doivent-elles être les mêmes pour les 3 réseaux, ou bien les réseaux recevant un approvisionnement supplémentaire doivent-ils être soumis à des restrictions moindres ?
- la **référence** utilisée pour calculer les restrictions : les débits à respecter en période de restriction doivent-ils être calculés à partir de la capacité des réseaux, ou à partir de leur consommation théorique ? Si cette consommation théorique est établie à partir des besoins du maïs, quel coefficient correcteur doit être appliqué pour prendre en compte la diversité des cultures ? Dans cette discussion, les agriculteurs utilisent le caractère privé de la constitution de leur assolement comme une marge de manœuvre afin de tirer les restrictions vers le bas.

Position des acteurs dans la concertation [Zanker, 1999, Allain, 1999, Barreteau *et al.*, 2003] A la suite des 3 années de sécheresse successives en 89-90-91, les réseaux collectifs ont chacun de leur côté agi pour sécuriser leur approvisionnement : acquisition de ressources complémentaires, mise en place de tours d'eau internes. Les **irrigants collectifs** considèrent ainsi avoir déjà consenti des **efforts vers une gestion collective de l'eau**.

Cependant l'**incertitude sur l'approvisionnement** en eau récurrente tous les étés est ressentie comme une menace et un frein au développement de cultures à forte valeur ajoutée, moins gourmandes en eau mais ne tolérant pas de stress. Les agriculteurs considèrent que si les pouvoirs publics ont autorisé la construction de leurs réseaux, ils doivent en assumer les conséquences, d'autant plus que la Drôme, qui ne bénéficie d'aucun ouvrage de soutien et a été fragilisée par l'extraction abusive de graviers, peut s'assécher sans leurs prélèvements. Ainsi, si les agriculteurs semblent **conscients de leur responsabilité** (« l'année où on a asséché la Drôme » , « Il est allé fermer le soir, nous le matin, on avait de nouveau de l'eau en bas »), ils ne se considèrent **pas comme coupables**.

Alors des blocages apparaissent et certaines mesures préconisées par le SAGE telles que l'instauration de mesures de limitation préventives sont rejetées « [l'eau] que vous la laissiez passer au mois de juin, ou que vous la preniez à ce moment là, au mois de juillet il n'y en aura pas plus, et la Méditerranée elle ne va pas gonfler pour autant » , même si les agriculteurs sont conscients que de telles mesures servent surtout à afficher une bonne conduite qui ne coûte pas cher au monde agricole.

De plus, bien que la sécheresse des années 89-90-91 ait marqué les esprits, les agriculteurs des réseaux collectifs n'ont plus eu à souffrir de restrictions depuis, si bien que la recherche d'un meilleur partage de l'eau n'est pas ressentie comme une nécessité.

Les **irrigants individuels**, peu organisés et moins présents dans les concertations, sont souvent présentés par leurs collègues comme les mauvais élèves d'une gestion raisonnée de l'eau et endossent le rôle de **boucs émissaires** : « Dans les réseaux collectifs (...), entre la location de la borne et le prix du m³, par rapport à un individuel, ils ont déjà été sensibilisés par le prix » .

Finalement pour le monde agricole un enjeu des concertations est de parvenir à **maintenir et**

assurer leur niveau d'approvisionnement. A cet effet par exemple, le caractère privé de la composition de leur assolement est utilisé comme marge de manœuvre pour tirer les restrictions vers le bas.

Pour la CCVD, la concertation créée par le SAGE représente un processus permettant d'amener le monde agricole à sortir de ses retranchements, et de **créer de la confiance et de la transparence** autour de règles de partage acceptées et respectées par tous.

2.1.3 Intervention du Cemagref : vers l'accord local sur le partage de la ressource

La CCVD a fait appel au Cemagref afin de l'assister dans le processus de concertation sur la définition des modalités des règles de gestion de crise. La commande était de simuler différents scénarios sur les règles de gestion et les ressources complémentaires et d'évaluer leur impact sur

- le débit au seuil des Pues ;
- les restrictions subies par les usagers ;
- l'utilisation des ressources complémentaires.

En mai 2003, après acceptation du projet des Juanons, l'accord local est finalement signé. Il repose donc sur la ressource complémentaire amenée par cette retenue, et ne sera appliqué que quand les Juanons seront en fonction. Les modalités fixées par l'accord sont exposées au [1.4.2](#).

L'histoire de la concertation autour la gestion des étiages dans la basse vallée de la Drôme illustre le succès d'un processus où les acteurs ont appris à se connaître et à se faire confiance mutuellement. Toutefois, la coopération du monde agricole reste conditionnée par la concrétisation attendue des aménagements promis. La transparence nécessaire à un bon fonctionnement d'une gestion concertée et prévisionnelle n'est pas encore acquise, certaines informations, concernant l'assolement notamment, restant privées.

2.2 Simulation de scénarios pour la signature de l'accord local

La partie opérationnelle de l'intervention du Cemagref repose sur un modèle sur tableur Excel, appelé SimSage, réalisé par O. Barreteau, et dont les résultats ont été présentés dans le cadre de réunions de la CLE et de réunions publiques en 2000/2001. Certains paramètres du modèle entrant en jeu dans la définition des modalités ont été discutés plus spécifiquement lors de réunions avec le CCVD et les présidents de réseaux.

SimSage ³¹ SimSage calcule, en fonction des données climatiques disponibles (débits entrants et ETP) l'effet de la demande agrégée des réseaux et des irrigants individuels sur le débit de sortie et les occurrences de crise. Les scénarios simulés portent sur :

- les différentes possibilités de ressources complémentaires (voir [2.1.1](#)) ;
- l'existence ou non d'une gestion collective de la crise : pour chaque possibilité de ressource complémentaire, les résultats mettent en regard la situation où les mesures de restrictions C1 et C2 sont appliquées et celle où elles ne le sont pas.

³¹source : Olivier Barreteau, *Modalités de partage de la ressource en eau à l'aval de Crest*, Rapport d'exécution pour le Cemagref, 2003

SimSage ne possède pas d'interface. Il n'est donc pas possible de simuler les scénarios « en direct », à la demande des acteurs. Seuls les résultats des simulations sont présentés sous forme de graphiques. L'outil ne permet donc pas d'interactions avec les acteurs. Les hypothèses utilisées pour simuler les scénarios restent cachées et il est difficile de les amener dans la discussion.

Discussions autour de SimSage SimSage a été utilisé lors de plusieurs réunions entre CCVD et présidents de réseaux pour discuter des niveaux de référence des restrictions.

Les discussions se sont focalisées sur le **coefficient de réduction** utilisé dans le calcul des restrictions. Pour les présidents, il ne reflète pas la réalité de la répartition des cultures : tous n'ont pas la même proportion d'assolement irrigués, et cette proportion n'est pas fixe dans le temps. Tout le monde s'est accordé pour reconnaître qu'un coefficient évoluant dans le temps rendrait la règle trop compliquée. Quant à différencier le coefficient selon les réseaux, cela d'une part remettrait en cause l'équité des restrictions, et d'autre part obligerait les agriculteurs à entrer plus précisément dans une discussion sur la composition de leur assolement. Les présidents de réseaux ont finalement pu obtenir de porter ce coefficient de 0.7 à 0.8.

D'autres points de discussion ont été :

- les conditions de **retour à la normale** après une crise : le retour à la normale doit-il se faire dès que le débit redevient supérieur à $3 \text{ m}^3/\text{s}$ ou attendre un nombre entier de semaines après le passage en crise ? La première solution n'est pas équitable (si la crise dure par exemple 3 jours, seuls les agriculteurs ayant leurs jours d'arrêt dans ces 3 jours sont pénalisés) mais la deuxième solution implique de prolonger des restrictions alors que la rivière n'en a plus besoin, ce qui n'est pas acceptable pour les agriculteurs. L'accord conservera donc la première solution ;
- la prise en compte des ressources complémentaires dans les restrictions : cette discussion est en fait celle de la répartition de la participation financière des réseaux à la construction des Juanons, et de la **balance entre effort financier et effort de maîtrise de la demande**. Soit les réseaux participent tous et les restrictions sont les mêmes pour tous le monde, soit seuls ceux qui sont connectés participent et bénéficient de réductions de leurs restrictions, sachant qu'ils contribuent ainsi à limiter l'occurrence des crises puisqu'ils réduisent leurs prélèvements. La première solution a semblé un temps préférable au président de l'un des 2 réseaux connectés devant engager le plus de frais, ainsi qu'à celui du réseau non connecté qui argumentait pour une équité du prix de l'eau et des restriction dans les 3 réseaux. C'est finalement la seconde solution qui sera choisie.

Les différentes discussions autour des scénarios révèlent une **tension entre équité et simplicité des mesures**. On observe aussi que dans les discussions, les présidents de réseau restent toujours au niveau du bassin, ne descendant jamais ni au niveau des règles mises en œuvre à l'intérieur des réseaux, ni au niveau des pratiques individuelles. Si le monde agricole montre là une répugnance à amener de la transparence dans ses pratiques, une **limite de l'outil SimSage** apparaît aussi : son **caractère agrégé** ne favorise pas la discussion sur les niveaux inférieurs que sont le réel effet des tours d'eau, la composition des assolements ou les pratiques individuelles.

2.3 Retour vers la recherche : SMA et jeu de rôles

L'intervention sur la Drôme a également été pour le Cemagref l'occasion d'explorer l'utilisation de SMA et de jeux de rôles dans des concertations autour de la gestion de l'environnement. Cette action a lieu dans le cadre du programme « Concertation, Décision et Environnement » du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, qui est à l'origine du co-financement de cette thèse.

Intervention d'un SMA : GibiDrome[Barreteau *et al.*, 2003] Un premier modèle multi-agent, appelé GibiDrome a été produit par O. Barreteau. Les **données** (climat, capacité des réseaux et des individuels et surface irriguées) sont les **mêmes** que celles utilisées dans SimSage, mais les demandes en eau et les cultures y sont modélisées au niveau individuel, ce qui oblige à expliciter des hypothèses qui étaient cachées dans SimSage. Les hypothèses fortes de GibiDrome sont les suivantes :

- la nappe d'accompagnement est assimilée à la rivière ;
- la surface irriguée est entièrement cultivée en maïs ;
- les demandes correspondent à la pratique majoritaire observée par [Zanker, 1999] et non plus au besoin théorique des cultures : demande hebdomadaire de 30 ou 40 mm selon la période pour chaque parcelle et un jour sans irrigation (le dimanche) ;
- les restrictions conduisent toujours à une réduction effective de la demande mais c'est cette fois la capacité des prises d'entrée des réseaux qui est réduite. Pour l'irrigation individuelle, le tour d'eau est modélisé. Quand des restrictions sont appliquées, les agriculteurs ne modifient pas leur demande mais rajoutent une irrigation le dimanche ;
- la croissance des cultures est représentée. Elle prend en compte le type de sol ainsi que les apports effectifs en eau.

Alors que les résultats de SimSage étaient présentés sur papier, GibiDrome amène une **interface** permettant de **choisir des scénarios** et de visualiser les résultats « en direct » , sur une **représentation schématique du bassin**. L'introduction de comportements individuels augmente la gamme des modalités de construction d'un scénario :

- choix d'une année climatique ;
- choix des ressources complémentaires ;
- choix des règles de calcul des restrictions :
 - par rapport au besoin théorique de la superficie entièrement irriguée en maïs, irriguée en maïs à 80 %, ou par rapport aux capacités des prises ;
 - prise en compte ou pas de l'apport des ressources complémentaires ;
- règles individuelles utilisées pour lancer l'irrigation ;
- proportion des types de sols.

Le but de GibiDrome est donc d'une part d'amener un outil plus ouvert, où différents scénarios sont choisis « en direct » , et d'autre part, en introduisant explicitement des hypothèses au niveau individuel, d'amener les agriculteurs à **dévoiler leurs pratiques** plus avant et à les introduire dans la discussion. Toutefois, le modèle reste consensuel puisqu'il n'introduit pas d'éléments « tabous » , tels que le choix de l'assolement.

Le contenu de GibiDrome est décrit plus en détail dans le chapitre 5.

Discussions autour de GibiDrome GibiDrome a été présenté une première fois aux responsables du CCVD, puis une seconde fois aux présidents de réseaux. Les réactions des agriculteurs ont porté sur :

- la répartition des sols qu'ils souhaiteraient pouvoir différencier selon les réseaux ;
- l'assolement 100 % maïs : le souhait de pouvoir représenter un assolement plus réaliste a été émis sans toutefois aller plus loin ;
- les pratiques : quelques commentaires ont été faits sur les règles de lancement de l'irrigation.

Le modèle n'était pas suffisamment calé pour lancer une discussion autour des résultats sur les cultures.

Les agriculteurs se sont donc montrés intéressés par l'introduction de comportements individuels, et l'explicitation des hypothèses sur ces comportements a bien suscité des réactions.

Limites de GibiDrome GibiDrome est limité notamment par le fait que réseaux et irrigation individuelle sont séparés, si bien qu'il n'est pas aisément possible de modéliser des approvisionnements multiples. L'approche se prolonge alors sur deux axes :

- fabrication d'un **jeu de rôle** basé sur GibiDrome où les participants disposent de deux approvisionnements et peuvent décider de leur assolement ainsi que de la manière dont ils utilisent leurs approvisionnement. Ce jeu est en cours de test [Barreteau *et al.*, 2004] ;
- recherche d'une **approche de modélisation** permettant de mieux saisir les différents niveaux de gestion et les différents niveaux d'organisation. C'est ce travail qui fait l'objet de cette thèse.

2.4 La thèse : une étude hors des enjeux du terrain

Le thèse se place hors des enjeux de la concertation. Elle aborde une thématique plus générale de représentation de niveaux d'organisation multiples. La Drôme ne constitue plus qu'un cadre d'application.

L'explicitation et la manipulation des niveaux d'organisation d'un système dans un modèle multi-agent grâce à l'approche AGR pourra permettre de mieux localiser les différentes règles de gestion utilisées et d'offrir plus de souplesse dans la présentation de scénarios appropriés aux demandes des acteurs.

L'expérimentation de l'approche se fait à travers 3 modèles basés sur la Drôme, graduellement plus complexes et alimentés avec les règles de gestion et comportements exposés dans ce chapitre, ainsi qu'à travers les modèles déjà produits :

- dans un premier modèle, que l'on qualifie de **modèle-jouet**, les **3 niveaux de gestion** du système, déjà introduits dans GibiDrome (le bassin, le réseau, l'agriculteur) sont repris et représentés en utilisant groupes et rôles. Le modèle résultant correspond à une **version simplifiée de GibiDrome** : prélèvements dans la rivière par un seul réseau, pas de ressources complémentaires, un seul type de comportement individuel. Des améliorations sont toutefois introduites : mise en œuvre des restrictions par réduction de la capacité de la prise d'entrée ou par tour d'eau ; possibilité d'introduire un effet de type perte de charge. Ce modèle vise à tester et finaliser les différents niveaux, conceptuels, opérationnels et méthodologiques, d'une approche de modélisation AGR ;
- un **second modèle** reproduit la **configuration de GibiDrome**. Il faut pour cela à partir du modèle-jouet introduire des ressources complémentaires, relier des prélèvements individuels et augmenter le nombre de réseaux. Cette étape permet d'une part d'évaluer les éventuels biais introduits par l'implémentation AGR en comparant les résultats des 2 modèles, et d'autre part d'évaluer la modularité de l'approche, puisque tous les objets nécessaires à la reproduction de GibiDrome sont déjà définis dans le modèle-jouet ;
- enfin dans un **troisième modèle**, les agents se voient doter de **comportements hétérogènes**, ce qui permet d'évaluer ce que l'utilisation de rôles peut apporter à l'expressivité au niveau individuel.

CONCLUSION DU CHAPITRE

Un véritable enjeu de concertation existe dans la Drôme, autour des modalités de gestion collective imposées par le SAGE. L'intervention du Cemagref a déjà mené à la signature d'un accord local sur ces modalités. La mise en œuvre de ces modalités se situe concrètement à des niveaux d'organisation plus élémentaires, à travers les règles de gestion existant dans les réseaux collectifs, ainsi que dans les pratiques individuelles.

Ces niveaux d'organisation qui relèvent de la responsabilité et du domaine privé des acteurs signataires de l'accord conditionnent l'efficacité des règles collectives définies au niveau du bassin par le SAGE. Ils n'apparaissent toutefois que très marginalement dans les réunions de concertation.

L'introduction d'outils de simulation posant explicitement des hypothèses sur ces niveaux pourrait favoriser l'ouverture d'un dialogue où les règles « privées » sont dévoilées. Un premier pas a été franchi avec le SMA GibiDrome, et se poursuit avec un jeu de rôle. La thèse s'écarte des enjeux de terrain en optant pour un questionnement méthodologique sur la manière d'explicitier et de gérer des niveaux d'organisation interdépendants dans un modèle multi-agent. Le cas de la Drôme constitue une base d'expérimentation qui fournit des éléments pour alimenter des modèles.

On définit alors la **démarche de la thèse** :

1. **spécification du formalisme AGR pour une application à la modélisation** : signification des concepts, implémentation dans une plate-forme de modélisation SMA et définition d'une méthodologie d'utilisation ;
2. **construction de 3 modèles pour explorer l'approche AGR autour de la question de la mise en œuvre des règles collectives de gestion du SAGE**. Parmi les différents niveaux d'organisation sociaux décrits dans ce chapitre, on ne s'intéressera donc qu'aux niveaux de gestion. Les étapes de modélisation sont les suivantes :
 - (a) **développement d'un modèle-jouet**, représentant une situation très simple afin de **tester et consolider la spécification du formalisme AGR** ;
 - (b) extension de ce modèle-jouet à un second **modèle reproduisant GibiDrome** pour **vérifier que l'utilisation d'AGR n'introduit pas de biais dans les simulations** ;
 - (c) extension à un **troisième modèle introduisant des comportements plus hétérogènes pour mettre l'expressivité et la modularité du formalisme à l'épreuve**.

Deuxième partie

Modèles et méta-modèles : développements conceptuels, opérationnels et méthodologiques

Est-ce que le temps est beau ?
Se demandait l'escargot
Car, pour moi, s'il faisait beau
C'est qu'il ferait vilain temps.
J'aime qu'il tombe de l'eau,
Voilà mon tempérament.
Robert Desnos, L'escargot

Chapitre 4

De AGR à ORIGAMI

CONTENU DU CHAPITRE

Le formalisme AGR propose, par l'utilisation de groupes et de rôles, une manière de structurer les SMA à un niveau d'abstraction supérieur à celui de l'agent. La mise en œuvre d'une application d'AGR à la modélisation suppose que (1) sur un plan conceptuel, on précise la signification des groupes et des rôles (2) sur un plan informatique, on définit une implémentation adaptée à nos besoins et des solutions pour gérer la composition de rôles par les agents (3) on propose une méthodologie de conception de modèles AGR.

Le formalisme AGR constitue un méta-modèle de structuration d'un SMA. La précision de la signification des concepts de rôle et de groupe constitue la spécification d'AGR en un méta-modèle conceptuel adapté à un domaine d'application particulier. L'implémentation d'objets informatiques correspondant à ce méta-modèle conceptuel spécifie une architecture liée à une plate-forme de modélisation ou un langage particulier.

Une méthodologie d'utilisation d'AGR permet alors, à partir d'un système cible, de spécifier un modèle conceptuel, qui instancie le méta-modèle conceptuel, puis un modèle opérationnel qui utilise l'architecture proposée.

Ce chapitre a pour but de décrire ces différents méta-modèles et la méthodologie qui permet de les instancier. Dans une première partie, le méta-modèle conceptuel sera défini par la signification donnée aux groupes et aux rôles dans la modélisation. Dans une seconde partie, le méta-modèle opérationnel sera défini en précisant tout d'abord la plate-forme utilisée, puis en définissant les différentes extensions apportées à cette plate-forme. Enfin dans une troisième partie, on décrira la méthodologie ORIGAMI qui propose un jeu de diagrammes inspirés d'UML pour accompagner la modélisation AGR d'un système.

Sommaire

1	Aspects conceptuels	108
1.1	Le concept de rôle en informatique	109
1.2	Le rôle : un élément de comportement contextuel	110
1.3	L'agent	110
2	Aspects opérationnels	111
2.1	Plate-forme utilisée	111
2.2	Méta-modèle opérationnel	112
2.2.1	Les classes de CormasAGR	112
2.2.2	Prise en charge d'un rôle par un agent	116
2.2.3	Composition des rôles	117
2.2.4	Définition et initialisation d'un modèle	117
2.3	Gestion du temps dans CormasAGR	118
2.3.1	Le choix de la gestion par événements	119
2.3.2	Influences	121
2.3.3	Déroulement d'un cycle de simulation	123
2.3.4	Ajouts à l'interface de programmation	123
3	Aspects méthodologique : ORIGAMI	124
3.1	Recommandations méthodologiques autour d'AGR	124
3.2	Les exemples	125
3.3	Les diagrammes de conception	125
3.3.1	Identification des structures de groupe	128
3.3.2	Identification des agents	129
3.3.3	Identification des rôles	130
3.3.4	Initialisation des modèles : diagramme structurel	132
3.3.5	Définition des dynamiques	133
3.3.6	Conclusion	140
3.4	Les diagrammes de mise en œuvre	141
3.4.1	Séquencement des dynamiques	141
3.4.2	Dynamiques et états	144
3.4.3	Bilan	145

1 Aspects conceptuels

A la fin du chapitre 2 la signification des concepts de groupes et de rôles pour la modélisation est précisée :

- les groupes représentent les niveaux d'organisation du système. Les groupes d'un modèle sont les instances de structures organisationnelles qui représentent donc les différents types de niveaux d'organisation d'un système ;
- les rôles représentent des composantes des comportements des agents dans ces niveaux d'organisation.

On ne reviendra pas sur les concepts de groupe et de structure de groupe, liés à la notion de niveau d'organisation qui a déjà été largement définie et illustrée. Les concepts de rôle et d'agent doivent eux être définis plus avant : comment se différencient-ils et comment s'articulent-ils ?

Le concept de rôle introduit un nouvel objet pour définir des propriétés ou des comportements des individus. On commencera par dresser un rapide état de l'art des définitions du concept de rôle en informatique avant de poser nos propres définitions.

1.1 Le concept de rôle en informatique

Le concept de rôle est largement utilisé dans les bases de données, et plus largement dans les systèmes de représentation de connaissances. Il y offre une abstraction complémentaire à celle de la classe, qui encapsule les propriétés et les comportements d'une entité, mais peine à représenter des caractères dynamiques, dépendants du contexte, ou communs à plusieurs entités.

Dans les systèmes multi-agents, on a déjà vu que le concept de rôle était parfois utilisé dans les méthodes de conception pour décrire la place d'une entité dans le système.

Les rôles pour représenter les caractères dynamiques des individus Dans les bases de données, les classes peuvent être utilisés pour représenter différents types d'entités, chaque classe pouvant répondre à une requête à sa propre manière. Par exemple, différentes classes peuvent être utilisées pour représenter des entités ayant différents types d'activité. Mais le concept de classe, qui est lié à l'identité de l'entité, ne suffit plus à représenter :

- une entité dont l'activité change dans le temps : une entité ne peut pas changer de classe sans changer d'identité ;
- une entité ayant différents types d'activité : une entité ne peut pas appartenir à plusieurs classes.

On utilise alors le concept de rôle, pour représenter une portion d'information qui peut être prise en charge ou abandonnée, et qui peut être superposée à d'autres portions d'information [Wieringa *et al.*, 1994, Gottlob *et al.*, 1996, Kniesel, 1996].

Les rôles pour représenter des modules de comportements [Lea and Marlowe, 1994, Fowler, 1997] introduisent le concept de rôle pour factoriser des comportements pouvant être communs à plusieurs types d'individus. La prise en charge d'un rôle permet alors d'acquérir ces comportements, et le concept de rôle permet donc d'augmenter la modularité et la réutilisation du code.

Les rôles pour représenter les caractères extrinsèques des individus Chez [Fan *et al.*, 2001] et [Kristensen and Osterbye, 1996], la classe porte les caractères intrinsèques des individus, soit ce qui qualifie l'individu lorsqu'il est isolé, alors que les rôles portent des caractères extrinsèques, qui qualifient les individus dans des relations ou des contextes particuliers. Ainsi, pour [Steinmann, 2000] :

- le rôle n'existe qu'en relation avec d'autres rôles, alors que l'individu existe de manière isolée ;
- le rôle ne définit pas l'identité de l'individu : l'individu peut changer de rôle sans changer d'identité.

Les rôles pour représenter des positions dans le système [Kendall, 1999, Wooldridge *et al.*, 2000, Hannoun *et al.*, 2000] utilisent le concept de rôle dans des méthodes organisationnelles de conception de systèmes multi-agents : le système est défini comme une organisation, et le rôle représente une position d'un agent dans l'organisation : responsabilité (comportement attendu dans l'organisation), permissions (droits d'accès aux ressources correspondant à la position) et activités (comportements élémentaires propres à la position).

1.2 Le rôle : un élément de comportement contextuel

Le concept de rôle tel qu'on projette de l'utiliser regroupe les différentes propriétés listées dans la section précédente :

- le rôle représente la position d'une entité dans un niveau d'organisation ;
- le rôle représentent les caractéristiques et comportements de l'entité vus depuis ce niveau d'organisation ;
- le rôle représente des comportements possibles dans un niveau d'organisation pouvant être communs à plusieurs entités ;
- un rôle peut être pris en charge ou abandonné par une entité durant sa vie, et une entité peut prendre en charge plusieurs rôles à la fois.

Par ailleurs, dans le cadre d'AGR, un rôle n'est pas défini de manière isolé, mais est toujours lié à une structure de groupe, qui représente le type de niveau d'organisation par rapport auquel le rôle est défini. De plus la prise en charge d'un rôle peut être régulée par des contraintes telles que :

- son **arité**, qui définit le nombre maximal de prises en charges simultanées de ce rôle dans le niveau d'organisation où il se situe ;
- ses **correspondances** [Ferber *et al.*, 2003] qui expriment que si un agent prend en charge ce rôle alors il lui est obligatoire, ou bien interdit, de prendre en charge le rôle correspondant.
-

On définira le rôle d'une entité dans une organisation en y représentant les éléments de comportements et caractéristiques qui sont nécessaires pour décrire la participation de l'entité au niveau d'organisation.

Les entités sociales prennent en charge des rôles sociaux, et les entités physiques prennent en charge des rôles physiques. Dans la plupart des cas, les rôles sociaux modélisent des **éléments de comportement dans le niveau d'organisation**, et les rôles physiques modélisent des **caractéristiques** d'un objet selon le **point de vue du niveau d'organisation**.

1.3 L'agent

Les agents sont les entités individuelles : acteurs, objets ou groupes qui se comportent comme des entités uniques.

Les agents **physiques** (pompe, parcelle, plante) implémentent les **caractéristiques internes objectives** (débit, capacité, remplissage du sol, coefficients cultureaux) des objets qu'ils modélisent. En effet, ces caractéristiques représentent des éléments constitutifs de ces objets, qui doivent être accessibles (et éventuellement subjectivés) via le filtre des leurs divers rôles.

Pour les agents **sociaux**, cette notion de caractéristique interne objective pourrait s'appliquer à des attributs « physiques » tels que l'âge ou le poids, mais elle est plus difficile à appliquer à des propriétés « mentales », forcément subjectives. On restreint donc la définition du comportement des **agents sociaux** à la **gestion de leurs rôles**, passage d'information et changement : la cognicité des agents se limite à la possibilité de choisir dans une situation donnée un « masque » parmi ceux dont ils disposent. Quand le masque est mis l'agent disparaît entièrement derrière : les rôles pris en charge deviennent entièrement responsables des éléments de comportements qu'ils définissent.

Toutefois, les agents peuvent définir des caractéristiques ou comportements intrinsèques auxquels les rôles peuvent faire appel et ainsi moduler leurs actions. Ces caractéristiques et comportements sont appelés **compétences**, suivant la terminologie introduite par [Amiguet, 2003].

L'agent définit d'une part des caractéristiques et comportements intrinsèques, qui lui sont propres indépendamment de l'implication dans tout niveau d'organisation.

En plus de cela, les agents sociaux sont responsables du choix de leurs rôles, c'est à dire du type de comportement qu'ils vont adopter dans un niveau d'organisation.

Une fois qu'un rôle est endossé, il dirige de manière autonome l'action de l'entité dans le niveau d'organisation.

2 Aspects opérationnels

Il s'agit maintenant de décrire comment on a implémenté le méta-modèle conceptuel défini dans la section précédente.

2.1 Plate-forme utilisée

L'architecture AGR a été implémentée par ses auteurs dans la plate-forme multi-agent Madkit[Ferber and Gutknecht, 1998]. Les rôles de Madkit sont toutefois de simples étiquettes et ne peuvent donc être utilisés pour représenter des éléments de comportement.

La plate-forme MOCA développée par [Amiguet, 2003] (voir section 3.2.2 du chapitre 2) propose une implémentation de rôles propre à représenter des comportements, ainsi que des solutions pour gérer la composition de rôles par des agents. MOCA est conçue pour des applications de génie logiciel et n'offre pas d'outils permettant de gérer des simulations.

Il a été jugé préférable d'utiliser une plate-forme offrant des outils permettant de gérer la construction de modèles et la mise en œuvre de simulations, et d'implémenter sur cette plate-forme une couche AGR correspondant à nos attentes. C'est la plate-forme **Cormas** [Bousquet et al., 1998] qui a été utilisée. Cormas est dédiée à la simulation pour la gestion de ressources naturelles et offre des outils facilitant le développement et la simulation des modèles (représentations spatiales, analyse de sensibilité...). Cormas propose des agents et des objets génériques que l'utilisateur peut spécialiser dans ses modèles.

Cormas utilise le langage orienté objet Smalltalk.

Définitions

Le paradigme objet fournit des abstractions utiles à la description des modèles. Les différents types d'entités d'un modèle sont décrits par des **classes**. Les entités d'une réalisation d'un modèle sont des **objets**.

Les classes définissent les propriétés (**attributs**), ainsi que les comportements (**méthodes**) d'un type d'entité.

La classe Pompe définit les attributs capacité et débit, ainsi que les comportements fermer et ouvrir(débit). La classe Irrigant définit l'attribut pompe et le comportement irriguer(débit)

Les objets sont des **instances** des classes qui évoluent au cours du temps : leur **état**, défini par la valeurs des attributs, évolue quand les objets exécutent leurs méthodes (actions et réactions). L'exécution de ces comportements a lieu soit parce qu'ils décrivent la dynamique individuelle de l'entité (comportements **proactifs**), soit en **réaction** aux sollicitations des comportements d'autres entités

Au temps $t = t1$: l'état de l'objet pompe_n°1 est : capacité = 100 l/s, débit = 0 l/s ; l'état de l'objet irrigant_n°1 est : pompe = pompe_n°1.

Le comportement proactif de l'irrigant est d'exécuter le comportement irriguer(50l/s) au temps $t1$. En réaction à sa sollicitation, la pompe exécute le comportement ouvrir(50 l/s), et son débit passe à 50 l/s.

Une **réalisation d'un modèle** s'initialise en créant le nombre voulu d'objets et en initialisant les attributs de ces objets.

Une réalisation du modèle est initialisée en créant 10 pompes ayant une capacité de 100 l/s et un débit de 0 l/s, et 10 irrigants liés à ces pompes.

2.2 Méta-modèle opérationnel

Les entités du méta-modèle AGR sont implémentées comme une couche supplémentaire sur la plate-forme Cormas. On appelle CormasAGR la plate-forme résultante.

Définitions

Conventions d'écriture :

On utilise une police différente pour nommer les éléments implémentés du modèle (agents, groupes, rôles, méthodes...) : **Agent**, **Group**, **Role**, **method**

2.2.1 Les classes de CormasAGR

Le diagramme des classes des entités AGR est donné sur la figure 13.

Toutes les entités AGR héritent de la classe **CormasAGREntity**, qui hérite elle-même de la classe **Entity**, qui est la classe racine des agents de Cormas.

Agents La classe **EntityWithRoles** définit les entités capables de prendre en charge des rôles. Les agents et objets définis par Cormas héritent de **EntityWithRoles**. **EntityWithRoles** définit des méthodes permettant de prendre en charge (**getRole :inGroup :**) et d'abandonner (**cancelRole :**) des rôles. Elle connaît les rôles qu'elle prend en charge par la variables **activeRole**.

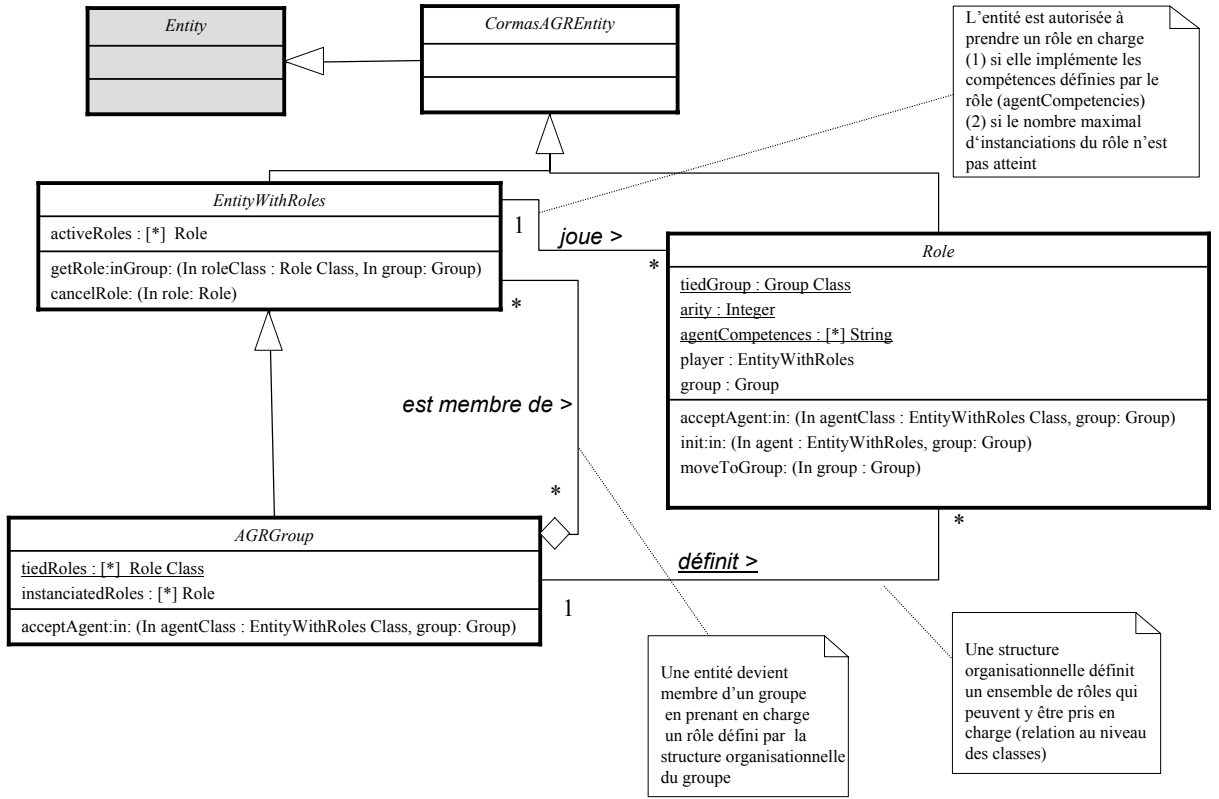


FIG. 13 – Diagramme des classes UML des classes principales de l'architecture AGR
 Les classes grisées sont des classes de Cormas

Un agent spécifique peut alors définir des attributs et méthodes déterminant sa dynamique propre, la gestion de ses rôles, ou bien encore ses compétences qui seront utilisées par les rôles qu'il prendra en charge.

Liens structurels et agents [Amiguët, 2003] et [Gutknecht, 2001] restreignent les interactions à l'intérieur des groupes. Toutefois, si l'on interprète les rôles comme traduisant des aspects fonctionnels des agents, il est des propriétés et des liens qui sont de l'ordre de la structure du système, et non de la fonction. On a choisi de descendre au niveau de l'agent ces liens de type structurels qui persistent à travers toute la simulation, et qui sous-tendent parfois les liens dynamiques créés par les groupes. Ces liens seront utilisés essentiellement pour initialiser des groupes, où se situe ensuite la dynamique.

Rôles La classe **Role** définit les rôles. Les rôles peuvent, comme des agents classiques, définir des attributs et des méthodes représentant des comportements. La différence vient du fait que ces comportements ne peuvent s'activer que lorsque le rôle est pris en charge par un agent dans un groupe.

La variable de classe `tiedGroup` de **Role** référence la structure de groupe (classe **AGRGroup**) dans laquelle le rôle est défini. La variable de classe `arity` fixe le nombre d'instances maximales du rôle qui peuvent être prises en charge simultanément (arité du rôle). La variable de classe `agentCompetencies` stocke la liste des compétences utilisées par le rôle. Enfin, l'instance d'un

rôle connaît l'entité qui la prend en charge, et le groupe où elle est prise en charge.

Il est à noter que la gestion des correspondances entre rôles n'a pas été implémentée. Les correspondances pourront donc être documentées dans les différents diagrammes décrivant un modèle mais CormasAGR ne prévoit pas de mécanisme pour les coder.

Nommage des rôles Le fait que les rôles soient locaux aux groupes permet de donner à des rôles définis dans des structures de groupe différentes des noms identiques s'ils représentent la même fonction symbolique. Cette uniformité des noms permet d'apporter plus de clarté à la description du modèle.

Groupes La classe `AGRGroup` définit les structures organisationnelle. Il est possible de définir des comportements au niveau d'une structure de groupe (qui seraient donc des comportements centralisés pour tout le niveau d'organisation représenté par la structure), mais cette possibilité ne sera pas explorée dans les modèles. De même, puisque `AGRGroup` hérite de `EntityWithRoles`, les groupes peuvent prendre en charge des rôles, mais cette possibilité ne sera pas explorée non plus.

La dynamique d'un groupe est donc essentiellement issue des comportements des rôles que sa structure de groupe définit. Une structure de groupe connaît les rôles qu'elle définit par la variable de classe `tiedRoles`, un groupe connaît les rôles qui y sont pris en charge par la variable `instanciatedRoles`.

Insertion dans Cormas La figure 14 présentent la hiérarchie des entités racines dans Cormas et dans CormasAGR.

Les classes définissant les entités AGR sont insérées dans la hiérarchie des classes de Cormas, de manière à ce que les différents types d'entités de Cormas puissent prendre en charge des rôles.

- les `SpatialEntity` sont des entités spatiales, qui définissent les cellules, ou des ensembles de cellules de la grille spatiale ;
- les `Agent` sont des entités actives, c'est-à-dire qui sont capables de lancer des dynamiques (voir gestion du temps section 2.3 ;
- les `PassiveObject` sont des entités passives, c'est-à-dire qui ne font que réagir aux sollicitations d'autres entités.

Parmi les entités actives et passives, certaines peuvent être situées, c'est-à-dire localisables sur une cellule de la grille spatiale. Cormas est décrit de manière plus complète dans [Bousquet et al., 1998].

On effectue aussi une distinction spatial/actif/passif dans les rôles pour la lisibilité de la modélisation : les rôles actifs sont portés par des entités actives, les rôles passifs par des entités passives et les rôles spatiaux par des entités spatiales. Il n'y a pas de différence entre les différents types de rôles sinon.

Extensions apportées à l'interface de Cormas Divers éléments ont été ajouté à l'interface de Cormas afin de faciliter la programmation avec des rôles (figure 15).

- Des listes rôles et groupes ont été ajoutées aux listes agents et objets. Il est possible de visualiser tous les rôles du modèle (bouton `All`), ou seulement les rôles locaux à une structure de groupe sélectionnée (bouton `selected group roles`) ;
- Une fenêtre permet de définir les compétences demandées par un rôle : noms des attributs et méthodes qu'un agent doit implémenter, et commentaires sur ce qu'ils représentent.

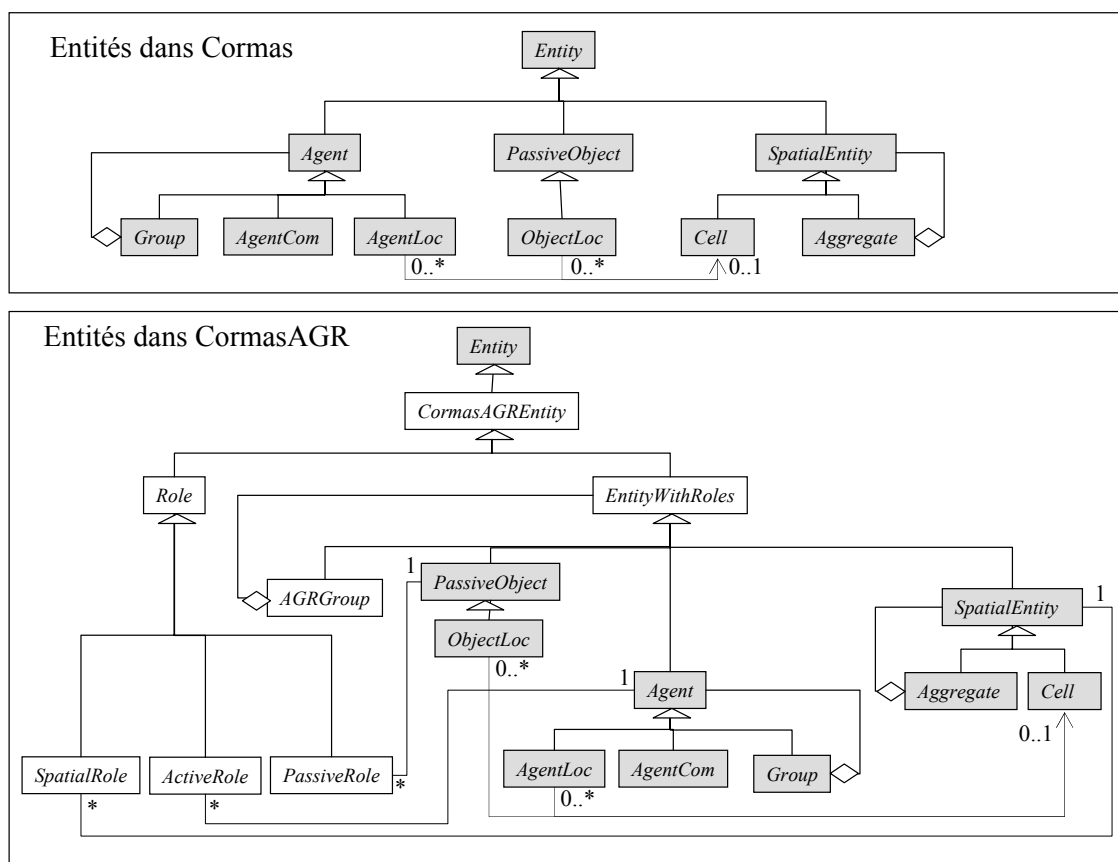


FIG. 14 – Diagramme des classes des entités dans Cormas et dans CormasAGR

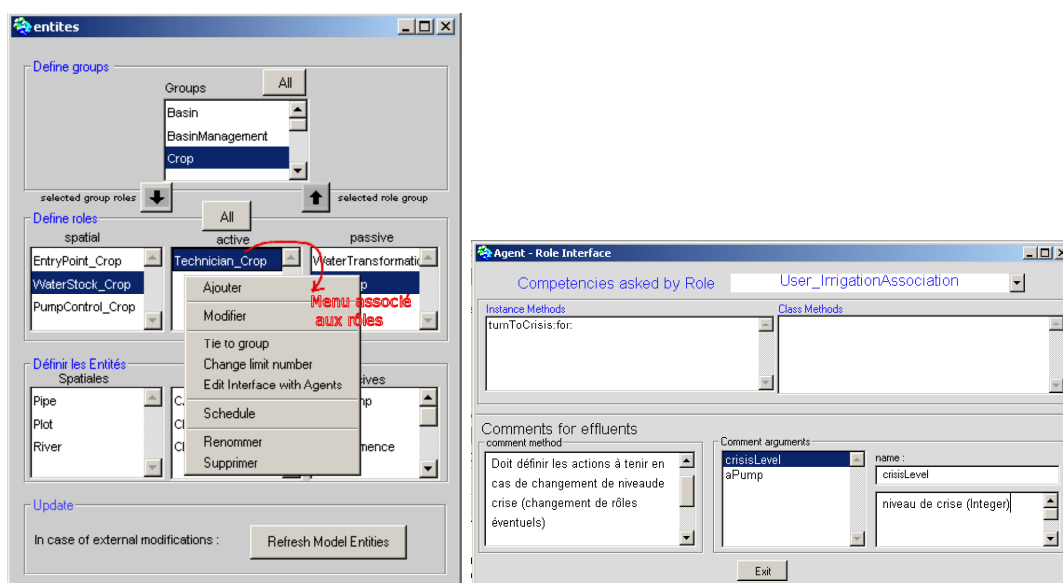


FIG. 15 – Éléments d'interface modifiés dans Cormas

Lorsqu'on veut rendre un agent capable de porter un rôle, il est possible de lui ajouter automatiquement les compétences requises, qu'il faut bien sûr renseigner par la suite, un peu à la manière des interfaces Java.

2.2.2 Prise en charge d'un rôle par un agent

Lorsqu'un agent demande à prendre en charge un rôle dans un groupe (méthode `getRole :in-Group :`), le rôle vérifie que l'agent définit les compétences nécessaires et qu'il n'a pas atteint le nombre maximal d'instance (méthode `acceptAgent :in :`). Il est possible de rajouter des conditions particulières au niveau du rôle ou au niveau du groupe (redéfinition des méthodes `acceptAgent :in :`).

Quand un rôle est pris en charge par un agent dans un groupe, l'agent devient membre du groupe, et les comportements du rôle deviennent actifs. Ces comportements peuvent faire appel aux compétences de l'agent. Si le rôle reçoit des messages qu'il ne comprend pas, il les transmet à l'agent qui le prend en charge.

Un rôle ne peut interagir qu'avec d'autres rôles pris en charge dans son groupe, et un agent ne peut interagir qu'avec les différents rôles qu'il prend en charge.

Appartenance à plusieurs instances d'une structure de groupe Un cas de figure particulier est celui où un agent doit prendre en charge un même type de rôle dans différentes instances d'une structure de groupe : cela revient à représenter une entité occupant la même position dans plusieurs niveaux d'organisation du même type.

Selon le statut de cette position par rapport à l'identité de l'entité, il y a 3 manières de mettre en œuvre ce cas de figure :

- *Alternance des instances du rôle* : les instances sont créées et détruites à chaque activation du rôle.

Cela signifie que les actions de l'entité dans un niveau d'organisation ne sont pas persistantes : la manière dont l'entité agit au temps $t+1$ ne dépend pas de la manière dont elle a agi au temps t , puisque l'information accumulée par le rôle ne peut être stockée de manière permanente.

On utilisera ce cas de figure pour représenter l'action d'une pompe dans une parcelle : quand la pompe irrigue une nouvelle parcelle de l'exploitation, elle abandonne son rôle dans le niveau d'organisation de la parcelle précédente, et en endosse une nouvelle instance dans la nouvelle parcelle.

- *Coexistence des instances du rôle* : l'agent prend en charge simultanément les différentes instances du rôle dans les différents groupes.

Cela signifie que les actions de l'entité dans les différents niveaux d'organisation peuvent être persistantes, mais qu'elles sont indépendantes les unes des autres.

On pourra utiliser ce cas de figure pour représenter un irrigant abonné à plusieurs réseaux d'irrigation : ses rôles de membre dans chacun des réseaux peuvent coexister indépendamment l'un de l'autre (même si de l'information peut transiter via l'irrigant), et chacun d'eux peut accumuler de l'information propre au réseau auquel il est lié.

- *Transfert d'une seule instance du rôle de groupe à groupe* : une seule instance du rôle est créée pour la simulation et « voyage » entre les groupes.

Cela signifie que l'action de l'entité présente une continuité, et ne peut être fractionnée entre les différents niveaux d'organisation.

On utilisera ce cas de figure pour représenter l'action d'un irrigant dans ses parcelles : lorsqu'un irrigant agit dans une parcelle puis dans une autre, on considérera qu'il transfère

son action d'une parcelle à l'autre, et que son rôle peut conserver une identité et accumuler de l'information.

Cette réflexion souligne que certains choix informatiques dépendent des hypothèses de modélisation. Elle montre aussi qu'en mettant du contenu dans les rôles, les rôles accèdent à un certain degré d'autonomie (stockage d'information et éventuellement apprentissage). La gestion de cette autonomie implique de devoir poser des hypothèses de modélisation claires par rapport à la signification de l'action des entités dans les niveaux d'organisation.

2.2.3 Composition des rôles

On ne propose pas de mécanisme générique de gestion de la composition de rôles. On verra dans la partie sur la gestion du temps que l'on limite les possibilités de conflit en interdisant qu'un même agent active plusieurs comportements à la même date.

Le mécanisme de gestion des conflits plus évolué qui est développé dans MOCA aurait pu nous être utile dans la gestion de la synchronisation de la circulation de l'eau entre les différents niveaux notamment, mais ne nous aurait été d'aucun secours dans la composition de rôles sociaux, où il s'agit de prendre en compte des informations issues de différentes sources. Ce type de composition ne peut se faire qu'au cas par cas, et ne sera d'ailleurs pas toujours effectuée par l'agent, celui-ci pouvant se contenter de transférer des informations vers un rôle spécialement dédié à la gestion de tel ou tel comportement.

Finalement, quand un agent reçoit une sollicitation d'un de ses rôles, il peut agir :

- en transférant la sollicitation à un autre rôle : l'agent doit savoir à qui transmettre la sollicitation pour préserver l'indépendance des groupes ;
- en modifiant une de ses variables et en notifiant éventuellement d'autres de ses rôles de ces changements. Là encore l'agent doit savoir qui notifier ;
- en lançant une dynamique organisationnelle : prise en charge / abandon de rôle ; création ou destruction d'un groupe ;
- en ayant une action plus cognitive (rafraîchissement de représentation, prise de décision...).

Les rôles modélisent des comportements et définissent des caractéristiques qui leurs sont propres. Dans certains cas de figure, il sera même judicieux de doter les rôles de capacités cognitives (prise en compte d'information, prise de décision, apprentissage). Ainsi, on pourra par exemple représenter les prises de décision concernant un comportement dans un niveau d'organisation par un rôle spécialisé. Ce choix a l'avantage de pouvoir représenter différents modes de prise de décision dans différents rôles, et donc de faire de ces modes de prise de décision des briques modulaires de construction des modèles.

2.2.4 Définition et initialisation d'un modèle

Sans entrer dans les détails de la méthodologie de modélisation, la construction d'un modèle peut alors se faire comme suit :

1. identification des niveaux d'organisation et définition de leurs dynamiques à travers la définition des comportements des différents rôles qu'ils définissent ;
2. définition des agents : compétences, traitement des informations des rôles susceptibles d'être pris en charge, choix des rôles à prendre en charge ;

3. définition de l'initialisation du modèle :

- (a) définition d'une méthode d'initialisation pour chaque structure de groupe : cette méthode définit une distribution des rôles des groupes en fonction des liens structurels qui existent entre les agents de la simulation, et de l'état de ces agents (attributs définissant le choix de leurs rôles).
Il est toujours possible de former des groupes sur des bases non structurelles, ou durant la simulation ;
- (b) définition d'une méthode d'initialisation globale : cette méthode définit les liens structurels des agents, et leur état initial, et appelle les méthodes d'initialisation des groupes. C'est en intervenant sur cette méthode d'initialisation globale que l'on définira différents scénarios de simulation d'un modèle.

Cette décomposition de la modélisation et de l'initialisation d'un modèle entre les agents d'une part, et les rôles et les structures de groupe d'autre part, représente un effort initial plus important que pour un SMA classique. Cet effort initial est le prix à payer pour améliorer l'expressivité et la modularité des modèles.

Si les rôles définissent les comportements et interactions au sein d'un niveau d'organisation, les agents définiront les liens structurels entre les entités du système. Chaque structure de groupe peut alors définir une méthode d'initialisation de ses rôles sur la base de ces liens structurels. Il est alors possible d'initialiser un modèle en définissant les liens structurels entre les différentes entités du système, puis en activant successivement les méthodes d'initialisation des structures de groupe.

2.3 Gestion du temps dans CormasAGR

La recherche d'une méthode de modélisation pour améliorer la représentation des différents niveaux d'organisation passe aussi par une remise en question de la gestion du temps : différents niveaux d'organisation peuvent fonctionner à des échelles de temps très différentes. Comment alors concilier ces différentes échelles de temps dans un modèle unique ?

Définitions

Il existe 3 types de temps dans une simulation [Fianyo and Boivin, 2000] :

- le **temps physique** qui est le temps du système observé : l'irrigant ouvre sa pompe tous les jours à 8h ;
- le **temps virtuel** qui correspond à la représentation du temps dans le modèle. Le temps virtuel est codé dans une forme compréhensible par la machine, nombre entier ou structure de donnée représentant une date : si le temps est représentée par 2 nombres entiers j et h codant respectivement le nombre de jours depuis le début de la simulation, et l'heure dans la journée, l'action d'ouverture d'une pompe par un irrigant a lieu quand $h=8$, quelque soit la valeur de j ;
- le **temps de calcul** qui correspond au temps « réel » , durant lequel les instructions de la simulation sont exécutées par la machine : entre deux actions d'ouverture d'une pompe, il s'est écoulé 2 ms en temps réel.

On définit alors :

- une **date** comme la valeur de temps virtuel représentée à un instant de la simulation ;
- un **cycle de simulation** comme la séquence d'instructions exécutées à une même date : durant un cycle de simulation, le temps de calcul avance pour chaque exécution d'une instruction de la simulation, mais le temps virtuel reste le même ;
- le **pas de temps** comme la durée virtuelle qui s'écoule entre 2 dates de la simulation : entre chaque cycle de simulation, le temps virtuel est incrémenté de la valeur d'un pas de temps.

Dans les simulations à **pas de temps fixe**, ou **dirigées par horloge**, une valeur fixe est attribuée au pas de temps, et à chaque cycle de simulation, les différentes entités d'un modèle sont activées et exécutent leurs comportements.

Dans les simulations à **pas de temps variable** ou **dirigées par événements**, le temps progresse au rythme des dates des comportements des entités du modèle. Le déroulement du temps est alors géré par un échéancier. L'échéancier est une liste de notices d'événements datées : chaque notice d'événement est constituée de la date à laquelle l'événement doit se produire et d'un pointeur vers l'objet et la méthode décrivant l'événement. Au début de chaque cycle de simulation, les notices ayant la date la plus petite sont sélectionnées et les comportements pointés exécutés.

2.3.1 Le choix de la gestion par événements

La gestion par événements est plus adaptée à la modélisation de différents niveaux d'organisation, avec leurs différentes échelles de temps : il n'est pas nécessaire de déterminer une valeur de plus petit pas de temps, et il est possible de gérer des pas de temps variables [Guessoum, 1996]. Les représentations des dynamiques gagnent ainsi en modularité et en souplesse. Les différents classes et attributs relatifs à la gestion du temps sont représentés sur la figure 16.

Date et échéancier Un échéancier a été inséré dans Cormas, puisque la plate-forme implémente une gestion du temps par horloge. Cet échéancier est représenté par la classe **Scheduler**, qui est une collection d'événements triés selon leurs dates.

C'est l'échéancier qui gère la progression du temps dans le modèle par son attribut **currentTime**, égal à la date des événements en cours d'exécution. Les dates sont représentées par un objet **TimeCounter**, permettant de spécifier l'année, le mois, le jours du mois, l'heure, la minute et la

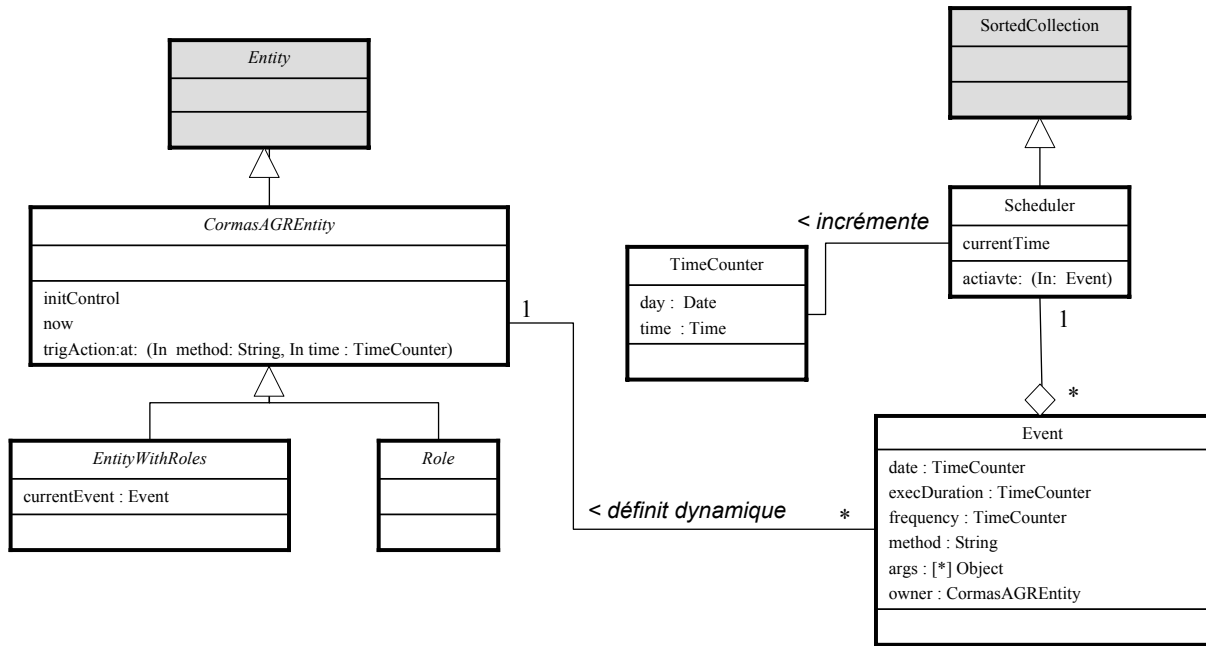


FIG. 16 – Diagramme des classes UML des classes et attributs relatifs à la gestion du temps dans CormasAGR.

seconde. Le **pas de temps minimal** des modèles, défini par la plus petite durée possible entre 2 événements est donc d'**1 seconde**.

Lorsqu'un modèle est initialisé, un échéancier vide est créé. Cet échéancier est une variable globale du modèle : il est accessible à toutes les entités initialisées dans le modèle.

Événements et comportements proactifs

Un événement décrit :

- la méthode définissant le comportement programmé, et l'entité ou le rôle ayant programmé le comportement ;
- la date à laquelle le comportement doit se produire ;
- la fréquence du comportement si celui-ci est périodique ;
- la durée du comportement, c'est à dire le temps durant lequel l'entité est considérée comme occupée. Une durée nulle signifie que le comportement est instantané (l'entité est libre dès la seconde suivante).

Les entités et les rôles actifs (ou spatiaux) doivent donc définir pour chacun de leurs comportements proactifs : une date initiale, une fréquence si le comportement est périodique, et une durée.

A l'initialisation, tous les événements ainsi définis sont stockés dans l'échéancier.

Gestion des événements simultanés Si plusieurs événements ont la même date, ils sont activés au cours du même cycle de simulation. Ils sont donc simultanés dans le temps virtuel, mais exécutés les uns après les autres dans le temps de calcul. Ce décalage entre temps virtuel et temps de calcul est un problème récurrent dans les simulation. Pour gérer les événements simultanés dans CormasAGR :

- les événements simultanés sont regroupés selon les entités qui les ont programmés (les événements programmés par un rôle sont associés à l'entité porteuse du rôle) ;
 - ces entités sont activées dans un ordre aléatoire comme il est d'usage lorsque le temps est géré de manière asynchrone³². Ceci permet de réduire les biais qui émergeraient si les entités étaient toujours activées selon l'ordre où elles ont programmé leurs événements. Ce choix doit être pris en compte dans la description des dynamiques d'un modèle. Par exemple, dans GibiDrome, les pompes sont activées successivement de l'amont vers l'aval à chaque cycle de simulation. Dans CormasAGR, il n'est pas possible de représenter ainsi la priorité de l'amont sur l'aval : à chaque fois qu'une pompe est activée, le débit doit être propagé à nouveau dans tout le système pour que toutes les demandes soient prise en compte de l'amont vers l'aval ;
 - une entité ne peut activer qu'un seul événement par cycle de simulation : elle doit choisir un comportement à activer, et remettre les autres dans l'échéancier. Les événements remis dans l'échéancier seront exécutés à la prochaine date où l'entité est libre. Le choix du comportement actif est fait aléatoirement.
- Cette restriction est mise afin de limiter les conflits de rôle et repose sur l'hypothèse qu'un même entité ne peut faire deux choses exactement au même moment.

2.3.2 Influences

Dans CormasAGR, la gestion du temps est donc complètement asynchrone, et l'activation d'un événement entraîne l'exécution de toute une séquence d'interactions entre des entités du système sans repasser par l'échéancier. Par exemple, quand une pompe d'un réseau d'irrigation est activée, une demande se propage instantanément jusqu'à l'entrée du réseau, et un débit est propagé en retour jusqu'à la pompe d'une part, et dans la rivière d'autre part. Il peut parfois être nécessaire que cette chaîne d'interactions repasse par l'échéancier pour qu'une synchronisation avec d'autres événements puisse avoir lieu. Il est alors possible d'utiliser des influences.

Les influences sont des messages envoyés d'une entité ou d'un rôle à un autre pour provoquer une réaction. Dans MOCA, toutes les interactions sont représentées par des envois d'influences : les agents n'effectuent pas directement des actions, mais produisent des influences, qui produisent éventuellement chez les agents récepteurs, combinées à d'autres influences reçues des changements d'état et des réactions.

Représentation des influences dans CormasAGR Dans CormasAGR, une influence est décrite par :

- les références de l'entité ou du rôle qui l'envoie, et de l'entité ou du rôle à qui elle est destinée ;
- un nom (**symbol**) spécifiant l'objet de l'influence ;
- un contenu (**content**) spécifiant d'éventuels arguments.

Quand une influence est envoyée, l'entité destinataire est prévenue et programme un événement consacré au traitement de l'influence reçue. Une entité ne peut donc réagir qu'à une seule influence à la fois.

On a introduit différents types d'influences afin de temporiser et de coordonner les processus.

³²La gestion asynchrone d'une simulation est une gestion où les événements situés à la même date sont traités séquentiellement : chaque événement agit sur le système tel que l'a laissé l'exécution de l'événement précédent. En gestion synchrone, la simultanéité des événements est simulée : tous les événements d'un cycle de simulation agissent sur le système tel qu'il était au début du cycle.

- **Influence synchrone simple** : Lorsqu'une entité reçoit une influence synchrone simple, elle programme sa réaction pour le prochain moment où elle est libre. Ce type d'influence peut servir notamment pour réguler l'accès à une variable, puisqu'une entité ne peut traiter qu'une influence à la fois.
- **Influence synchrone retardée** : La réaction à l'influence est alors programmée après le délai signalé dans l'envoi de l'influence. On utilise ce type d'influence pour temporiser des actions.
- **Influence anonyme** : Le récepteur ne programme qu'une seule réaction pour toutes les influences du même type (même `symbol`) reçues tant que la réaction n'a pas lieu. Les influences anonymes peuvent être retardées. Dans ce cas, c'est la première influence reçue qui fixe l'heure de la réaction. On utilise ce type d'influence pour synchroniser des sollicitations multiples en une seule réaction. Seule la première des influences anonymes est en fait traitée. On ne donne donc pas de `content` aux influences anonymes.
- **Influence asynchrone** : Le récepteur se contente de stocker l'influence reçue sans programmer de réaction. La lecture des influences asynchrones (qui sont accumulées dans la boîte à influences de l'entité) ne se fait donc que si l'entité a programmé une lecture de sa boîte de manière indépendante, de son propre chef. On peut utiliser ce type d'influence pour simuler des deadlines, ou traiter en une seule fois un ensemble de sollicitations étalées dans le temps. A la différence des influences anonymes, toutes les influences asynchrones envoyées sont différenciées et traitées lors de la réaction.

Les influences remplacent aussi les messages de Cormas. La variété des types d'influences permet de simuler différents modes de communication en jouant sur la rapidité de la réaction ou sur son caractère synchrone / asynchrone.

Utilisation des influences Dans MOCA, des influences sont utilisées systématiquement pour représenter les interactions entre les entités du système. Mais le recours systématique à des influences est problématique dans le cadre d'une application à la simulation, où un temps virtuel se superpose au temps de calcul.

En effet, une influence envoyée est traitée au cycle de simulation suivant : le traitement d'une chaîne d'interactions s'étale sur une durée non maîtrisée et sans relation avec le temps simulé. Même si le traitement de toutes les influences générées par un événement avait lieu dans le même cycle, les événements générant des cycles d'interactions courts seraient toujours plus « rapides » que des événements générant des cycles d'interactions longs.

De plus, l'envoi d'une influence ayant pour conséquence un retour à l'échéancier, la multiplication des influences augmente le temps de calcul.

On n'utilisera donc des influences que lorsqu'il sera nécessaire de maîtriser la synchronisation d'une interaction.

CormasAGR implémente une gestion du temps par événements. Le pas de temps minimal entre 2 événements est de 1 seconde.

Chaque événement est lié à un comportement proactif d'une entité ou d'un rôle. Afin de limiter les conflits, un seul comportement proactif peut être exécuté par cycle de simulation par une entité ou ses rôles.

L'utilisation d'influences de différents types permet de coordonner ou de temporiser les comportements.

2.3.3 Déroulement d'un cycle de simulation

Durant chaque cycle :

1. l'échéancier sélectionne les événements de plus petite date, et rafraîchit la date de la simulation à la valeur de cette plus petite date. Les entités pointées sont activées dans un ordre aléatoire, afin de limiter les biais. Si l'événement a été créé par un rôle, c'est l'entité porteuse du rôle qui est prévenue ;
2. chaque entité activée reçoit les notifications des événements qui sont programmés à cette date. Elle choisit un des événements et renvoie les autres dans l'échéancier.
Le comportement pointé par l'événement choisi est activé. Durant les actions/réactions déclenchées par l'événement, de nouveaux événements peuvent être programmés, ou des événements futurs modifiés ou annulés.
Si l'événement a une durée non nulle, l'entité reste active pour toute la durée de l'événement : elle renvoie toutes les notifications d'événements reçues à l'échéancier ;
3. l'échéancier reprogramme les événements rejetés. Les événements qui ont été activés sont retirés et reprogrammés selon leur fréquence.

2.3.4 Ajouts à l'interface de programmation

Divers éléments ont été ajoutés à l'interface de Cormas afin de faciliter la programmation avec une gestion du temps par événements (figure 17) :

- Une fenêtre permet de rentrer de manière transparente les caractéristiques (date, durée, méthode..) des événements attribués aux entités.
Cependant, la plupart des événements sont programmés pendant la simulation, ou dépendent de la valeur de variables du modèle. On peut toujours fixer dans cette fenêtre durée et fréquence des événements qui sont en général fixes ;
- des éléments ont été rajoutés dans la fenêtre de simulation de Cormas afin que l'on puisse voir quelle est la date simulée, quels sont les événements classés dans l'échéancier, et quels sont les événements actifs. Il est possible d'accéder au contenu des événements, et de n'observer que les événements correspondant à une entité.

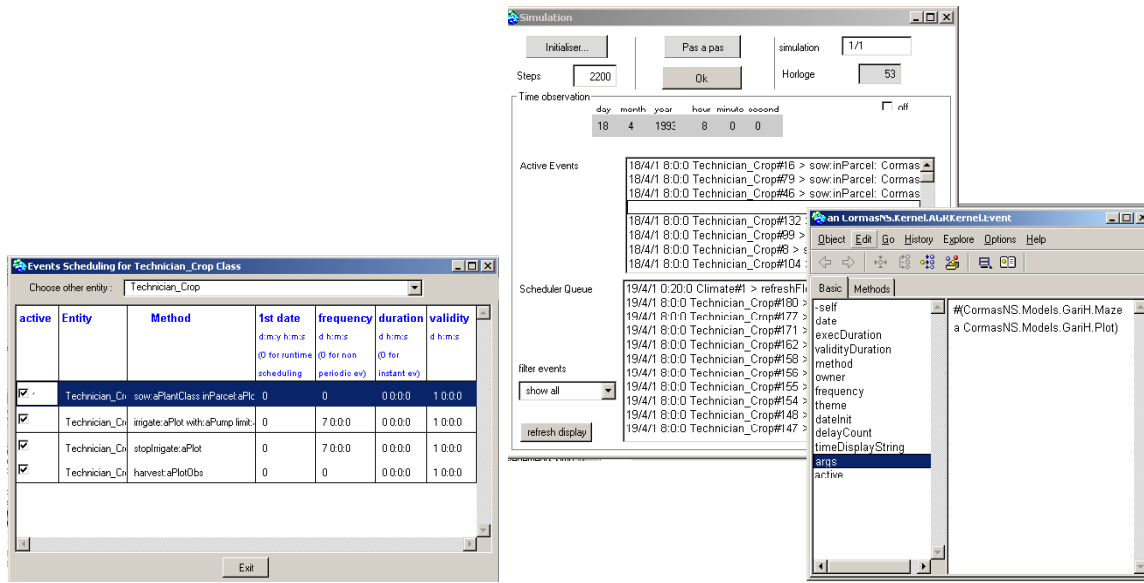


FIG. 17 – Éléments d'interface modifiés dans Cormas pour la gestion du temps par événements

3 Aspects méthodologique : ORIGAMI

La finalisation de la définition des concepts AGR ne donne par pour autant les clés de leur utilisation. Sans avoir de contraintes aussi fortes que dans des projets industriels ou du génie logiciel (traçabilité, vérification formelle, maintenance), l'éclatement du système dans les concepts A,G et R introduit une complexité constitutive qui appelle à des outils et un fil méthodologique dédié. La méthode ORIGAMI (Original Roles Identification, Groups and Agents Modelling Itinerary) s'est bâtie au fil des expérimentations sur le modèle-jouet.

[Edmonds, 2001] distingue 5 phases dans la réalisation d'un modèle multi-agent : abstraction (analyse du système résultant en la spécification d'un modèle du domaine), conception (choix d'un type de représentation et implémentation du modèle), simulation, analyse des résultats et interprétation. Nous prenons comme point de départ un modèle du domaine existant et nous avons déjà fait le choix d'un mode de représentation. ORIGAMI ne couvre donc qu'une partie de la phase de conception, en apportant les moyens de structurer dans un méta-modèle AGR la description d'un modèle abstrait et de spécifier certains aspects de sa mise en œuvre, grâce à un ensemble de diagrammes et des indications pour les utiliser.

3.1 Recommandations méthodologiques autour d'AGR

Durand [Durand, 1996] fournit une panoplie de schémas qui ne sont pas réutilisables parce que trop liés à son implémentation.

Nous suivrons par contre ses recommandations sur l'identification des groupes et des rôles :

1. définir quelles sont les entités du système ;
2. identifier les différents points de vue que l'on souhaite décrire. Chacun de ces points de vue constitue un schéma organisationnel ;
3. identifier les rôles comme les comportements possibles pour un type d'entité dans un schéma organisationnel.

Ferber et Gutknecht Dans une perspective de construction d'un système informatique, [Gutknecht and Ferber, 1999] recommandent de commencer par identifier les groupes d'un système. Un groupe doit nécessairement adopter une forme de communication commune. Un autre critère peut être de factoriser une propriété ou une activité. Il faut ensuite identifier les rôles dans les groupes, spécifier leurs dépendances et protocoles d'interaction, et enfin construire les architectures individuelles des rôles et des agents.

Dans le cadre d'applications à la modélisation, [Ferber *et al.*, 2003] recommandent d'identifier les groupes comme des sous-systèmes d'entités, soit similaires, soit participant à une même fonction du système. Les structures de groupe (rôles et relations entre les rôles) et leurs dynamiques (création et entrées dans les groupes) peuvent alors être décrites en utilisant éventuellement des motifs organisationnels recensés dans la littérature. La définition fonctionnelle des rôles peut alors se faire en utilisant des méthodologies existantes comme Gaïa ([Wooldridge *et al.*, 2000]).

3.2 Les exemples

Pour dérouler la méthode ORIGAMI, on utilise deux exemples qui reviennent dans les travaux concernant AGR : l'épizootie de Durand [Durand, 1996] et le processus de reviewing de Ferber [Ferber *et al.*, 2003]. On a choisi ces 2 exemples parce que leur modélisation AGR avait déjà été effectuée dans les travaux sus-cités, ce qui permet une illustration directe de la méthode ORIGAMI, sans interférence de considérations liées à des choix de modélisation. L'épizootie permet d'illustrer la modélisation d'un système comprenant à la fois des dynamiques sociales et des dynamiques naturelles, et faisant donc appel aux points de vue de disciplines différentes. Le reviewing permet d'illustrer la modélisation d'un système entièrement social, mais dont l'organisation est dynamique, et donc la flexibilité d'AGR.

L'épizootie Le système est composé d'un troupeau et d'un éleveur. Le troupeau est soumis aux mouvements suivants : vèlage en janvier, transfert en herbagerie en avril, transfert à l'étable en octobre, vente des veaux en novembre. La maladie simulée se propage par l'environnement : la contagion n'est possible qu'à l'étable (probabilité caractéristique de la maladie). Les animaux ne meurent pas et guérissent au bout d'un temps aléatoire (probabilité caractéristique de la maladie). Les symptômes sont visibles avec une probabilité caractéristique de la maladie. Si les symptômes sont visibles, le cheptel est traité : les animaux infectés ne guérissent pas mais la contamination n'est plus possible durant 3 mois.

Le processus de reviewing L'exemple est la simulation du processus de reviewing d'un papier à une conférence : les auteurs soumettent leur papier à un correspondant. Celui-ci distribue les papiers reçus à des comités de lecture. Quand les évaluations des comités reviennent, elles sont renégociées au niveau global. Enfin l'évaluation définitive est renvoyée à l'auteur

3.3 Les diagrammes de conception

ORIGAMI guide la conception du modèle à travers 5 étapes :

1. Identification des structures de groupe : les structures de groupe représentent les types de niveaux d'organisation du système. Les niveaux d'organisation sont identifiés en croisant les fonctions du système que l'on souhaite représenter, et les unités structurelles que l'on prend en considération. On utilise pour cela un **tableau structures/fonctions** où les sous-systèmes constitués par les types de niveaux d'organisation sont brièvement décrits et les structures de groupe correspondantes nommées.

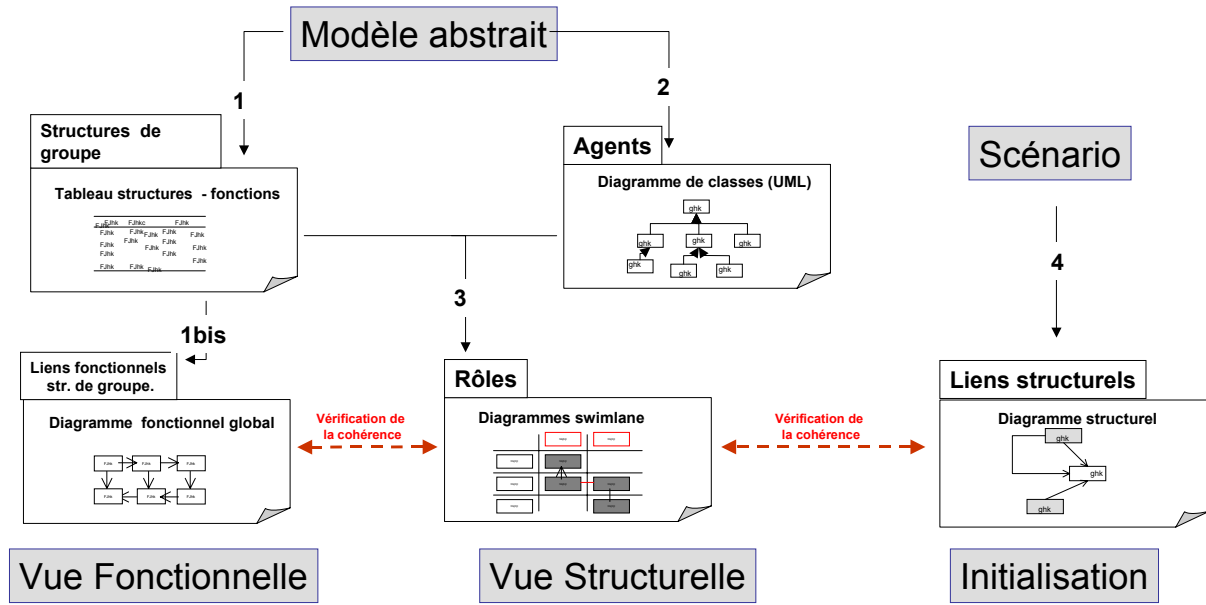


FIG. 18 – ORIGAMI, vue globale (1) : établissement de la structure AGR du modèle

Une fois les structures de groupe identifiées et nommées, on peut établir le **diagramme fonctionnel global**, qui pose les relations fonctionnelles entre les structures de groupe (quelle structure contraint quelle autre...).

2. Identification des agents : les agents représentent les entités individuelles du système. Ces entités peuvent être actives ou passives, dotées ou non de propriétés spatiales. A cette étape, on se contente de lister les différents types d'entités individuelles du système, et de représenter les agents résultant sur un **diagramme des classes**.

3. Identification des rôles : les rôles représentent la participation d'une entité à un niveau d'organisation. On peut donc identifier et nommer les rôles en croisant agents et structures de groupe et en répondant à la question « comment qualifier la participation de ce type d'entité à ce type de niveau d'organisation ? » .

On utilise pour cela les **diagrammes swimlane**, où les structures organisationnelles apparaissent en colonnes, les agents en ligne, et les rôles à la croisée des agents et des structures de groupe. On y représente aussi les liens de communication entre les rôles (qui communique avec qui pour accomplir la fonction du niveau d'organisation).

Ces trois premières étapes résultent donc en l'établissement de la structure du modèle, matérialisée par le diagramme swimlane (voir fig. 18).

4. Définition de l'initialisation du modèle : à l'issue des 3 premières étapes, la structure du modèle est établie. Le diagramme structurel définit la structure d'une instance du modèle : nombre des agents instanciés et liens structurels entre ces instances.

La définition de ce diagramme structurel permet de définir les paramètres d'un scénario de réalisation du modèle, mais aussi de vérifier que son initialisation est possible : tous les rôles et liens entre les rôles du diagramme swimlane doivent pouvoir être reconstruits à partir des liens structurels du diagramme structurel.

5. Définition des dynamiques : après avoir établi la structure du modèle, il faut définir sa dynamique, c'est à dire arriver à une spécification des actions des rôles et de la manière

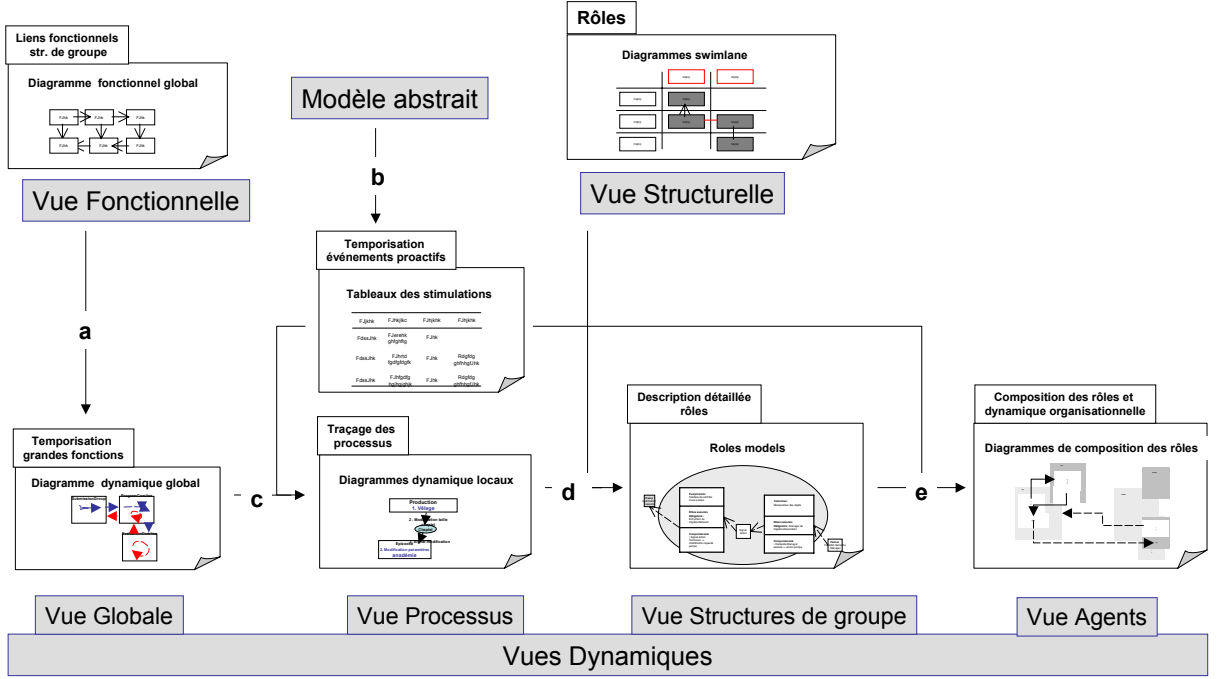


FIG. 19 – ORIGAMI, vue globale (2) : Raffinement de la description des éléments du modèle

dont ils sont pris en charge par les agents. On définit pour cela 5 nouvelles étapes (voir fig. 19) :

- temporisation des grands processus du modèle : en partant du diagramme fonctionnel global, on établit le **diagramme dynamique global** où les processus en cours dans les niveaux d'organisation sont spécifiés avec leur inscription dans le temps (liens de causalité, aspects périodiques, ponctuels ou continus) ;
- identification et temporisation des événements proactifs et des dynamiques organisationnelles : On utilise à cette étape des **tableaux** pour lister quels sont les événements déclenchant les processus qui font la dynamique du système. On y définit quel est l'agent ou le rôle qui déclenche l'événement, la temporalité de l'événement (date de première occurrence, fréquence), et quelles en sont les conséquences. Si des rôles sont pris en charge ou abandonnés dynamiquement au cours de la simulation, on liste également dans un tableau les événements déclenchant ces dynamiques organisationnelles ;
- traçage des processus correspondant à chacun des événements proactifs : on établit pour chacun des événements proactifs un **diagramme dynamique local**, où est représenté l'enchaînement des actions déclenchées par un événement à travers les agents et les groupes concernés. Les diagrammes dynamiques locaux constituent une *vue sur les processus* du système ;
- description détaillée des rôles structure de groupe par structure de groupe : les diagrammes swimlane décrivent la structure du modèle. Les diagrammes dynamiques locaux en décrivent les différents processus. Des **role models** sont utilisés pour représenter de manière synthétique toutes les interactions auxquelles un rôle est susceptible de participer. Un **role model** représente tous les rôles définis dans une structure de

groupe par un cartouche contenant : le nom du rôle et les classes des agents susceptibles de le prendre en charge, une brève description de la fonction accomplie par le rôle, la liste des correspondances associées au rôle, et la liste des comportements que le rôle est susceptible de mettre en œuvre pour prendre part aux différents processus dans lesquels il est sollicité.

Les role models constituent une *vue dynamique sur les structures de groupe et rôles* du système. Ils sont un aboutissement du processus de définition de la dynamique du modèle ;

- (e) description des dynamiques organisationnelles au niveau des agents : la dernière articulation de la dynamique à décrire au niveau de la conception du modèle se situe au niveau des agents. On utilise des **diagrammes de composition des rôles** pour décrire la manière dont les agents gèrent alternance et composition de rôles. Ces diagrammes représentent les différentes compositions de rôles possibles pour un agent, les transitions entre ces compositions (changements de rôles), ainsi que les communications entre rôles et agents, afin de dépister d'éventuels problèmes de coordination. Les diagrammes de composition des rôles constituent une *vue dynamique sur les agents* du système. Ils sont le second aboutissement du processus de définition de la dynamique du modèle.

Le déroulement des diagrammes conceptuels d'ORIGAMI résulte donc en une spécification « conceptuelle » du modèle. « Conceptuelle » parce que, même si les contraintes liées à l'architecture utilisée sont bien prises en compte (rôles, gestion du temps par événement), les aspects proprement opérationnels sont pas abordés. On recommande à cet effet un second jeu de diagrammes qui sera présenté au 3.4.

On trouvera tout d'abord ci-dessous une description détaillées des diagrammes conceptuels d'ORIGAMI à travers leur application aux deux exemples d'épizootie et de reviewing.

3.3.1 Identification des structures de groupe

Tableau structures/fonctions Cette première étape a pour but d'identifier les types de niveaux d'organisation du système et de nommer les structures de groupe correspondantes.

Un niveau d'organisation étant défini comme un point de vue sur une fonction du système dans une unité structurelle pertinente, il faut donc lister les unités structurelles auxquelles on veut se placer, et les fonctions que l'on souhaite modéliser.

Dans l'exemple de l'épizootie, on identifie 2 grandes fonctions : la gestion du troupeau (point de vue économique), et la dynamique de la maladie (point de vue épidémiologique). D'un point de vue structurel, un tel système pourrait se voir au niveau d'un animal, au niveau du troupeau, ou au niveau d'un territoire, mais on ne s'intéresse qu'à la propagation de la maladie au sein d'un troupeau, d'où une seule unité structurelle. Les niveaux d'organisation et les structures de groupe résultants sont identifiés sur le tableau 15.

Structures	Fonctions	
	Élevage	Épizootie
Troupeau	Gestion du troupeau : vèlage, vente, transhumance (Production)	Dynamique de l'épizootie : contaminations, guérisons (Épizootie)

TAB. 15 – Niveaux d'organisation de l'épizootie

Dans l'exemple du reviewing, les 2 grandes fonctions sont la soumission et l'évaluation, et on distingue 2 niveaux structurels : un niveau global, concernant tous les auteurs, et un

niveau restreint où sont distribuées les décisions (niveau des comités de lecture). Les niveaux d'organisation et les structures de groupe résultants sont identifiés sur le tableau 16.

	Fonctions	Évaluation	Soumission
Structures			
Global		Comité d'organisation : répartition des papiers, négociation des évaluations (ProgramComitee)	Espace de soumission : centralisation des papiers (SubmissionGroup)
Restreint		Comité de lecture : lecture et évaluation (EvaluationGroup)	

TAB. 16 – Niveaux d'organisation du reviewing

Diagramme fonctionnel global Une fois les structures de groupe identifiées et nommées, on peut d'ores et déjà établir quelles sont leurs relations fonctionnelles. Le diagramme fonctionnel global représente les structures de groupe du système et les relie par des flèches pointillées représentant contraintes, échanges d'information, ou contrôles de groupe à groupe.

Une relation fonctionnelle entre deux groupes étant nécessairement portée par un agent prenant en charge un rôle dans chacun des groupes, ce diagramme pourra être utilisé par la suite pour vérifier la cohérence des diagrammes swimlane.

Dans l'exemple de l'épizootie, les conséquences de la gestion du troupeau (emplacement et nombre des animaux) contraignent la propagation de la maladie (fig. 20).

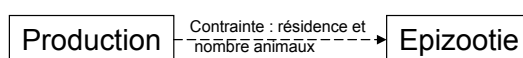


FIG. 20 – Diagramme fonctionnel global de l'épizootie

Dans l'exemple du reviewing, le groupe de soumission contraint l'action du comité d'organisation, qui contraint à son tour l'action des comités de lecture par la fourniture de papiers. En retour les comités de lecture fournissent l'information de leurs évaluations au comité d'évaluation, qui compile et transmet cette information au groupe de soumission (fig. 21).

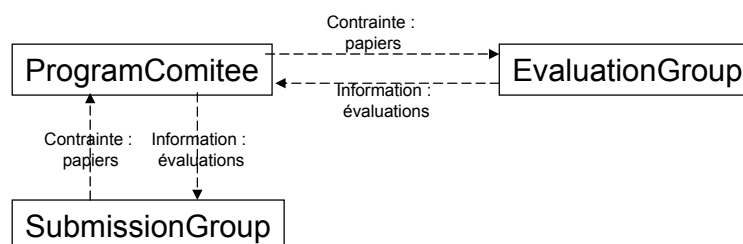


FIG. 21 – Diagramme fonctionnel global du reviewing

3.3.2 Identification des agents

Les agents sont les entités individuelles du système. On entend par « individuel » un acteur, un objet ou un groupe que l'on considère se comporter comme une entité unique.

Entités individuelles dans les exemples L'objectif de cette étape est simplement de lister les entités individuelles. On peut commencer à en définir des caractéristiques constitutives, mais la véritable définition des actions des agents ne peut se faire qu'un fois les rôles identifiés.

Dans nos 2 exemples, toutes les entités sont actives.

Pour l'épizootie, il y a 3 entités, représentée sur le diagramme des classes 22 :

- **Eleveur**, qui a un cheptel ;
- **Cheptel**, qui est caractérisé par sa population et sa localisation ;
- **Maladie**, qui est agentifiée et caractérisée par ses coefficients de contamination, de déclaration et de guérison, ainsi que par le nombre d'animaux infectés.

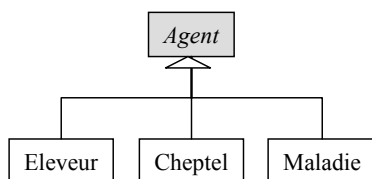


FIG. 22 – Diagramme de classes des entités de l'épizootie

Pour le reviewing, il n'y a qu'un seul type d'entité, que l'on appellera **Agent**.

3.3.3 Identification des rôles

L'outil utilisé lors de cette étape est le diagramme « swimlane », introduit par [Parunak and Odell, 2002]. Toutefois, [Parunak and Odell, 2002] utilisent les diagrammes swimlane pour décrire des organisations concrètes, alors que nous l'utilisons pour décrire les structures de groupe de nos modèles.

Les diagrammes swimlane Le principe du diagramme « swimlane » est de croiser agents et structures de groupe pour nommer les rôles que les agents doivent occuper dans les groupes : au croisement d'un processus et d'une entité, on trouve le rôle, qui est la fonction de l'entité vue sous l'angle du processus. On nomme les rôles en répondant à la question « comment qualifier la participation de ce type d'entité à ce type de niveau d'organisation ? » .

Une fois les rôles nommés, on peut tracer leurs relations de communication. Les relations verticales représentent les communications entre les différents rôles définies dans une structure de groupe : elles définissent la topologie des groupes et donnent une ébauche de leur fonctionnement ; les relations horizontales représentent la circulation de l'information entre les différents rôles d'un même agent. La lecture verticale d'un diagramme swimlane permet d'accéder à la structure de chacun des niveaux d'organisation du système ; sa lecture horizontale permet d'en visualiser la superposition.

Les arités portées sur les liens horizontaux (pas d'arité signifie 1) sont très significatives : elles expriment les correspondances entre les différents rôles portables par un même agent, ce qui reflète les différentes configurations permises par la souplesse d'AGR. Ainsi, un lien 1 à 1 signifie que les 2 rôles doivent être simultanément pris en charge par le même agent, alors qu'un lien 1 à 0..* signifie qu'un des rôles peut être pris en charge seul, mais que la prise en charge de l'autre dépend de celle du premier.

Des correspondances peuvent aussi exister au niveau des structures de groupe. On définit donc aussi des liens porteurs d'arités entre les structures de groupe.

Quand les modèles sont complexes, on établit les diagrammes swimlane fonction par fonction. Le tracé d'un diagramme swimlane complet permet de revenir sur le découpage du système en niveaux d'organisation : les liens entre rôles peuvent faire apparaître des regroupements poussant à scinder une structure de groupe en plusieurs, ou au contraire à faire de 2 structures de groupe une seule (quand trop de liens horizontaux relient les 2 structures). Les diagrammes swimlane sont des représentations synthétiques de la structure des systèmes. Ils constituent donc de bonnes bases pour affiner la dénomination et la répartition des différents éléments du système.

Classes et instances dans les diagrammes swimlane Les diagrammes swimlane sont des diagrammes au niveau des classes : il représentent les relations possibles entre les objets du système. Cependant la dimension descriptive supplémentaire apportée par la notion de structure de groupe crée des difficultés de représentation, que nous listons ici et tentons de résoudre :

- contrainte sur le nombre d'instances d'un rôle dans un groupe : si une contrainte forte sur le nombre d'instances d'un rôle dans un groupe existe, elle est représentée dans un encart dans le coin du rôle ;
- contraintes supplémentaires entre des rôles en correspondance : on peut utiliser les contraintes UML (trait pointillé). Ainsi un ou exclusif est représenté par un trait pointillé barré ;
- correspondances entre instances d'une même structure de groupe : pour différencier les liens représentant les communications entre rôles à l'intérieur d'un groupe et les liens représentant des correspondances entre des rôles définis dans des instances différentes d'une même structure de groupe, le seul moyen est de représenter la structure de groupe 2 fois dans le swimlane.

Ces différents éléments apparaissent sur le diagramme 24.

Diagrammes swimlane des exemples Dans l'exemple de l'épizootie, seul l'éleveur, en tant que gestionnaire, et son cheptel, en tant qu'objet de la gestion sont concernés par la fonction de production. Tous les agents sont concernés par la fonction d'épizootie : le cheptel en tant que site de propagation, l'éleveur en tant qu'agent traitant agissant sur le site, et la maladie en tant qu'anadémie agissant sur ce même site. Le diagramme swimlane résultant est donné fig. 23.

Il y a une correspondance de 1 à 0..* entre le rôle **Produit** et le rôle **Site** de l'agent **Cheptel** : le troupeau accomplit toujours sa fonction de production, mais peut être le site de 0, 1 ou plusieurs maladies. Il y a par contre une correspondance de 1 à 0..1 entre les 2 rôles de l'éleveur. Cela signifie qu'en cas de plusieurs maladies, le rôle **Traitant** voyagera de groupe en groupe.

Par contre il y a un seul type de chaque rôle par groupe (il suffit de noter la contrainte sur un seul des rôles défini dans la structure de groupe puisqu'ils sont tous liés par des relations de 1 à 1). Enfin, l'orientation des communications traduit le fait que c'est le groupe **Production** qui contraint le groupe **Épizootie**.

Dans l'exemple du reviewing, il y a un seul type d'agent, qui participe donc à tous les groupes. Chacune des structures de groupe définit deux types de rôles : **SubmissionGroup** est constitué d'un seul **Receiver** et de plusieurs **Author**, **ProgramComitee** d'un seul **Chairman** et de plusieurs **Member**, et **EvaluationGroup** d'un seul **Manager** et de plusieurs **Reviewer** (voir fig. 24).

Les correspondances sont dans cet exemple particulièrement significatives puisqu'elles définissent quelles sont les « cumuls de mandats » autorisés dans l'organisation de la conférence : le **Chairman** du **ProgramComitee** est nécessairement le **Receiver** des articles, les **Manager** de groupes d'évaluation sont nécessairement des **Member** du **ProgramComitee**, et enfin les **Reviewer** peuvent être des auteurs d'articles. Inversement les auteurs d'articles peuvent être **Reviewer** ou **Member** du **ProgramComitee** mais pas les 2 en même temps. Enfin, Un **Manager** d'un groupe

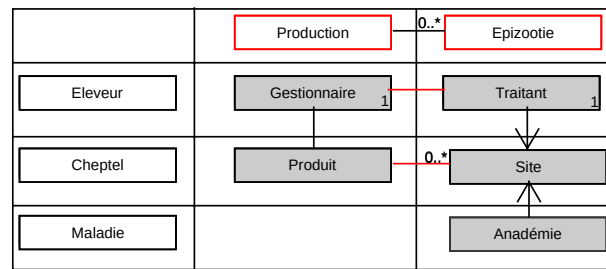


FIG. 23 – Diagramme swimlane de l'épizootie

d'évaluation peut être **Reviewer** dans un autre groupe d'évaluation.

Ces correspondances sous-tendent les transferts d'articles ou d'évaluation entre les différents rôles de **Agent**. Au niveau des structures de groupe, on spécifie que la conférence est composée d'un groupe de soumission, d'un **ProgramComitee** et de un ou plusieurs groupes d'évaluation.

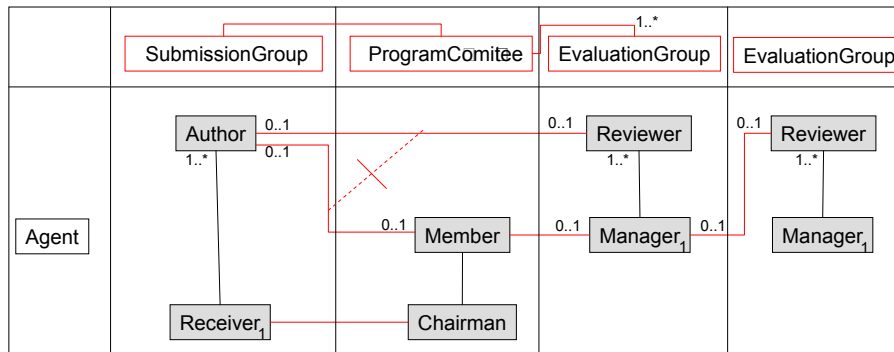


FIG. 24 – Diagramme swimlane du processus de reviewing

3.3.4 Initialisation des modèles : diagramme structurel

Diagramme structurel Le diagramme structurel représente les liens structurels entre les entités et les groupes dans une instance du modèle.

Le diagramme de la figure 25 représente une réalisation possible du modèle de reviewing : le système comprend 31 **Agent** en tout. 1 d'entre eux est le **Chairman** du **ProgramComitee**, et les 30 autres sont des auteurs d'un **SubmissionGroup**. 5 agents parmi les auteurs sont membres du **ProgramComitee** et gestionnaires d'un **EvaluationGroup**, et 10 autres sont reviewers dans les 5 **EvaluationGroup**.

Vérification : mise en parallèle des diagrammes « swimlane » et structurels Pour vérifier que tous les liens structurels nécessaires à l'instanciation des différentes structures de groupe du modèle ont bien été spécifiés, on peut reprendre les diagrammes swimlane et vérifier structure de groupe par structure de groupe que tous les rôles peuvent bien être instanciés à partir des spécifications du diagramme structurel.

Ainsi, dans le cas du reviewing, on vérifie que (1) la prise en charge du rôle **Author** de **SubmissionGroup** est définie à partir des liens **authors** entre le **SubmissionGroup** et les **Agent** (2) la

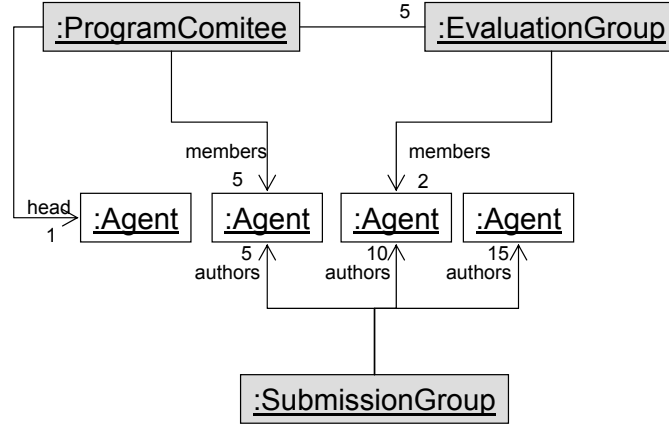


FIG. 25 – Diagramme structurel du processus de reviewing

prise en charge du rôle *Receiver* de *SubmissionGroup* est définie à partir du lien *head* entre le *ProgramComitee* et les *Agent* et que (3) la prise en charge du rôle *Chairman* de *ProgramComitee* en découle (correspondance 1-1 entre les rôles *Receiver* et *Chairman*) (4) la prise en charge des rôles *Member* de *ProgramComitee* est définie par les liens *members* entre le *ProgramComitee* et les *Agent*, et que (5) la prise en charge du rôle *Manager* de *EvaluationGroup* en découle (correspondance 1-1 entre les rôles *Member* et *Manager*) (6) la prise en charge des rôle *Reviewer* de *EvaluationGroup* est définie par les liens *members* entre les *EvaluationGroup* et les *Agent*.

3.3.5 Définition des dynamiques

Temporisation des grands processus : diagramme dynamique global Le diagramme dynamique global découle du diagramme fonctionnel global produit lors de la première étape d'ORIGAMI en explicitant les processus sous-tendant les liens fonctionnels et leur inscription dans le temps. L'objectif de ce diagramme est de donner une vue globale de l'agencement des dynamiques dans le système. Le codage est le suivant :

- les dynamiques représentant des processus continus sont notées par des flèches pleines, celles représentant des processus discrets sont notées par des flèches pointillées. On peut annoter les flèches pour préciser le pas de temps utilisé pour représenter les processus continus, ou la périodicité pour les processus discrets ;
- les dynamiques occasionnelles, activées suivant des circonstances sont notés par des onduations pointillées. On peut annoter la circonstance provoquant la dynamique. Si la dynamique a pour conséquence une perturbation du rythme des processus réguliers, on peut également annoter cette perturbation ;
- selon la séquence d'interactions engendrée par un dynamique, les flèches prennent différentes formes (voir figure 26) ;

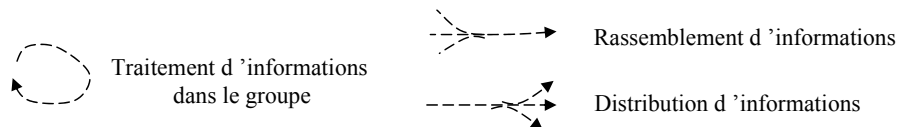


FIG. 26 – Diagramme dynamique global de l'épizootie

- On utilise des couleurs pour coder les différentes dynamiques.

Dans l'exemple de l'épizootie (diagramme fig. 27), les fonctions liées à la production et provoquant des mouvements d'animaux (vêlage, transhumance, vente) ont lieu à un rythme annuel. Chacun de ces mouvements d'animaux est transmis au groupe **Épizootie**. La propagation de la maladie est une fonction continue, qui est modélisée avec un pas de temps de 1 mois.

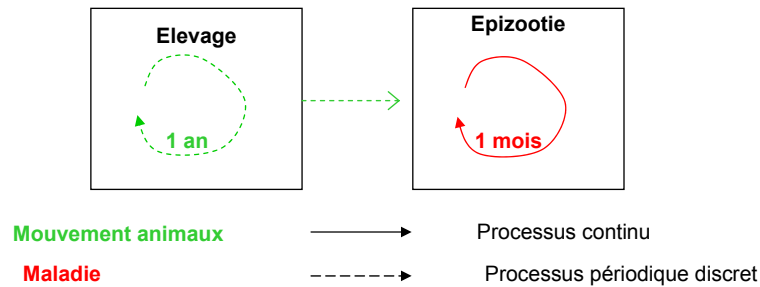


FIG. 27 – Diagramme dynamique global de l'épizootie

Dans l'exemple du reviewing (diagramme fig. 28), tous les processus sont ponctuels : envoi d'articles dans le **SubmissionGroup** (les auteurs envoient tous leurs article au **ProgramComitee**) ; distribution des articles aux **EvaluationComitee** dans le groupe **ProgramComitee** ; processus d'évaluation dans les **EvaluationComitee**, et retour de ces évaluation, d'abord vers le **ProgramComitee** où elles sont renégociées, puis vers les auteurs dans le **SubmissionGroup**.

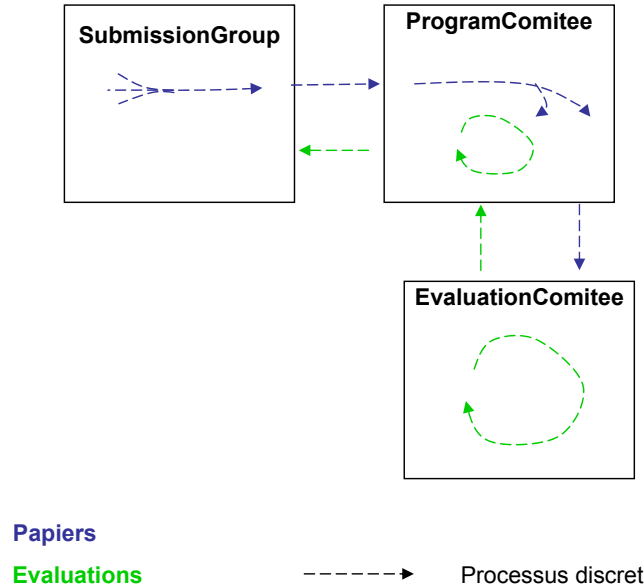


FIG. 28 – Diagramme dynamique global du reviewing

Identification et temporisation des événements proactifs : tableaux Cette étape a pour but de préciser le séquençement des processus qui apparaissent sur le diagramme dynamique global en listant dans un tableau :

- le rôle (ou l’agent) déclenchant le processus ;
- l’événement déclenchant le processus. Cet événement sera matérialisé par une méthode proactive du rôle (ou de l’agent) déclencheur ;
- la temporalité de l’événement : cette information sera utilisée pour placer l’événement dans le scheduler ;
- une brève description du processus conséquent.

Chacun des événement est étiqueté afin de pouvoir être retrouvé dans les diagrammes suivants.

Les tableaux des événements déclencheurs de nos deux exemples sont donnés les tableaux 17 et 18.

Événement déclencheur Evi : étiquette pour le ième événement	Ordonnancement	Déclencheur	Conséquences
Ev1 Vêlage	tous les ans en janvier	Troupeau	Modification nombre animaux
Ev2 Transhumance	tous les ans en avril et en octobre	Gestionnaire	Déplacement animaux
Ev3 Vente	tous les ans en novembre	Gestionnaire	Modification nombre animaux
Ev4 Dynamique maladie	tous les mois	Anadémie	Modification animaux infectés
Ev5 Suivi maladie	tous les mois	Traitant	Traitement éventuel

TAB. 17 – Les stimuli des processus de l’épizootie

Événement déclencheur Evi : étiquette pour le ième événement	Ordonnancement	Déclencheur	Conséquences
Ev1 Soumission papier	initialisation	Author	
Ev2 Formation comités de lecture	deadline call for papers	Chairman	Création groupes Submission-Group et reviewing
Ev3 Négociation reviews dans EvaluationGroup	retour de toutes les reviews	Manager	transmission reviews au Program-Comitee et fin du groupe
Ev4 Négociation reviews dans ProgramComitee	Retour de toutes les reviews	Chairman	Notification d’acceptation aux auteurs

TAB. 18 – Les stimuli des processus du reviewing

Déclenchement des dynamiques organisationnelles : tableau des rôles transitoires

Si des changements de rôles doivent avoir lieu au cours de la simulation (rôles transitoires), c’est également à cette étape que l’on précise les conditions de ces changements.

On utilise également pour cela des tableaux où l’on liste les événements menant à la prise en charge et à l’abandon des différents rôles transitoires. C’est toujours l’agent concerné qui décide de la prise en charge ou de l’abandon d’un rôle. Les événements de ce tableau correspondent donc à des signaux reçus ou perçus par l’agent. On peut rajouter entre crochets une condition de garde, qui correspond au libre choix de l’agent.

Seul l’exemple du reviewing comporte des rôles transitoires. Ce sont les rôles des **Evaluation-Group**, qui n’existent que le temps des évaluations. Le tableau 19 traduit le fait que le groupe est formé à partir de son rôle **Manager** lorsque celui-ci reçoit les papiers qui lui sont assignés

(au niveau du **ProgramComitee**), puis que celui-ci recrute des **Reviewer**. Le groupe est dissous quand le **Manager** conclut la négociation sur les évaluations.

Rôle	Prise en charge (ERi+ : étiquette pour l'événement entraînant la prise en charge du ième rôle)	Abandon (ERi- : étiquette pour l'événement entraînant l'abandon du ième rôle)
Manager	ER1+ Réception papiers (formation groupe)	ER1- Conclusion négociation intra-groupe d'évaluation (fin groupe)
Reviewer	ER2+ Réception demande groupe d'évaluation	ER2- Dissolution du groupe d'évaluation

TAB. 19 – Prise en charge et abandon des rôles de reviewing

Traçage des processus : diagrammes dynamiques locaux On peut maintenant expliciter chacun des processus déclenchés par les événements proactifs précédemment listés. Les diagrammes dynamiques locaux donnent une vue conceptuelle sur l'enchaînement des actions déclenchées par un événement proactif. Ils représentent actions, groupes et agents concernés, sans rentrer dans le détail de la mise en œuvre des actions dans les groupes. D'autres diagrammes plus proches de l'implémentation permettent de rentrer dans le détail de ces mises en œuvre. On trace un diagramme dynamique local pour chacun des événements proactifs des tableaux. Chacun des diagrammes dynamiques locaux se voit attribuer une lettre servant à référencer les actions qui y sont répertoriées. Les groupes sont représentés par des rectangles, et les agents par des ellipses. L'événement proactif est répertorié dans l'entité (groupe ou agent) le déclenchant et se voit attribuer le numéro 1. A partir de là, le processus conséquent est tracé en notant et numérotant les actions des agents et groupes traversés. Les envois de messages entre agents et groupes sont représentés par des flèches pointillées annotées avec le contenu du message. Les étiquettes des actions des diagrammes dynamiques locaux sont reportées dans les role models (étape suivante).

Pour l'exemple de l'épizootie, on ne fournit qu'un seul diagramme, pour le vêlage (fig. 29). En effet, le processus suit le même circuit pour la transhumance et la vente. Les deux autres processus sont entièrement contenus dans le groupe **Épizootie**.

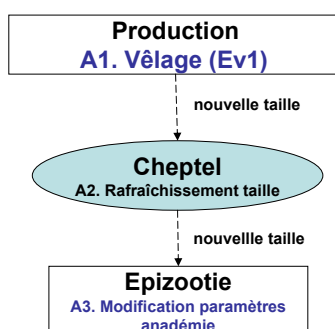


FIG. 29 – Diagramme dynamique local « A » du processus de vêlage dans l'épizootie

Pour l'exemple du reviewing, on fournit les 4 diagrammes dynamiques locaux. La soumission de papier aboutit au stockage des papiers au niveau du groupe **ProgramComitee**

(diagramme A, fig. 30).

La formation de comités de lecture (diagramme B, fig. 30) est amorcée par l'envoi des papiers que doit traiter le comité, ainsi que de la liste de l'ensemble des auteurs (parmi lesquels doivent être choisis les reviewers du comité) à chacun des membres concerné du **ProgramComitee**. Celui-ci crée un comité de lecture (B2) et lance le processus de recrutement de ses reviewer (B3) en renvoyant la liste des auteurs qu'il sollicite vers le **ProgramComitee** (B4). Les auteurs sont alors contactés (B5-B6-B7) et peuvent rejoindre le comité de lecture auquel ils sont invités (B8).

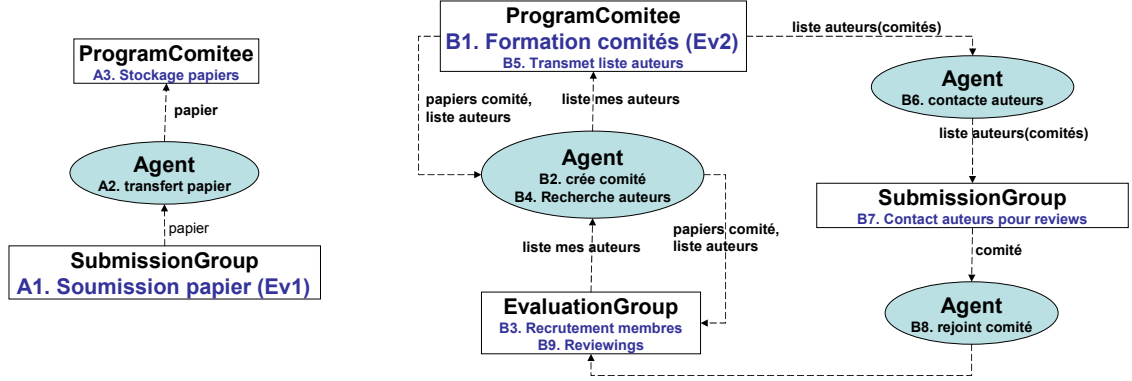


FIG. 30 – Diagrammes dynamiques locaux « A » et « B » du processus de reviewing : soumission des papiers et formation des comités de lecture

La négociation des évaluations au niveau des **EvaluationGroup** aboutit à la dissolution des groupes et au stockage de ces évaluations au niveau du **ProgramComitee** (diagramme C, fig. 31). Enfin, la négociation des évaluations au niveau du **ProgramComitee** aboutit à la réception des avis définitifs sur leurs papiers par les auteurs (diagramme D, fig. 31).

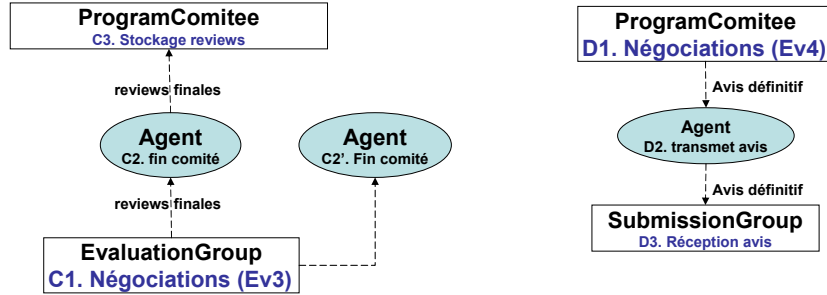


FIG. 31 – Diagrammes dynamiques locaux « C » et « D » du processus de reviewing : négociation des évaluations dans les comités de lecture, et dans le **ProgramComitee**

Description détaillée des rôles groupe par groupe : Role models On dispose maintenant d'une description globale de tous les processus représentés dans les modèles. Pour passer à l'implémentation, qui se fait en langage objet, il faut retourner à des vues plus centrées sur les entités. On utilise pour cela en premier lieu les role models.

On trace un role model pour chaque structure de groupe. Chacun des rôles défini par la structure de groupe y est représenté dans un cartouche contenant les informations suivantes :

- nom du rôle et des types d'agents pouvant le prendre en charge ;
 - brève description de la fonction accomplie par le rôle ;
 - liste des correspondances associées au rôle (données avec leurs arités comme dans les diagrammes swimlane : 1 pour une correspondance obligatoire, 0..1 pour une correspondance possible...) ;
 - liste des comportements que le rôle doit mettre en œuvre. Pour dresser cette liste, on utilise les diagrammes dynamiques locaux et, le cas échéant, les tableaux d'événements proactifs : on trace la circulation de chacun des processus à travers le groupe. La contribution du rôle est notée synthétiquement sous la forme **action déclenchante** $\Rightarrow$ **conséquence**, les conséquences étant essentiellement des envois de message.
- L'étiquette liée au processus dans le diagramme dynamique local est reportée. Si le comportement est proactif, il est noté en gras. L'étiquette du tableau des événements proactifs est reportée.

On introduit également dans les role models des cartouches pour les agents articulant les processus entre les groupes. On y liste les comportements de ces agents sous la même forme que pour les rôles. Les comportements listés dans les cartouches sont reliés par des flèches pointillées représentant les envois de messages, et où l'on fait figurer le contenu du message.

Les cartouches de nos role models reprennent, de manière simplifiée et moins formalisée, les role models de la méthode Gaïa ([Wooldridge *et al.*, 2000]) dont ils constituent la première vue résultant du travail d'analyse. Les role models donnent une spécification des éléments du modèle mais ne peuvent capturer les dynamiques organisationnelles.

Un role model est donné pour chacun des exemples à titre d'illustration : role model du groupe **Production** pour l'épizootie (fig. 32), role model du groupe **ProgramComitee** pour le reviewing (fig. 33).

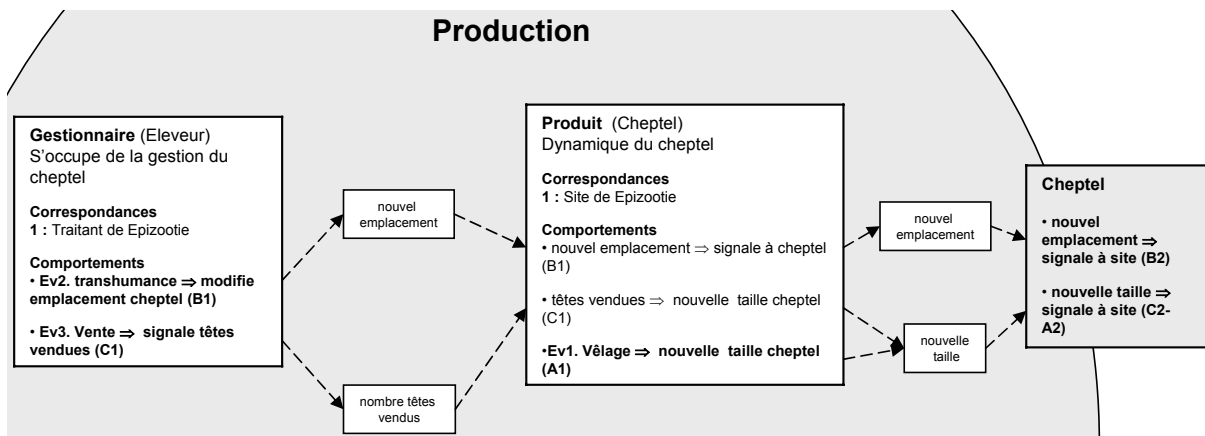
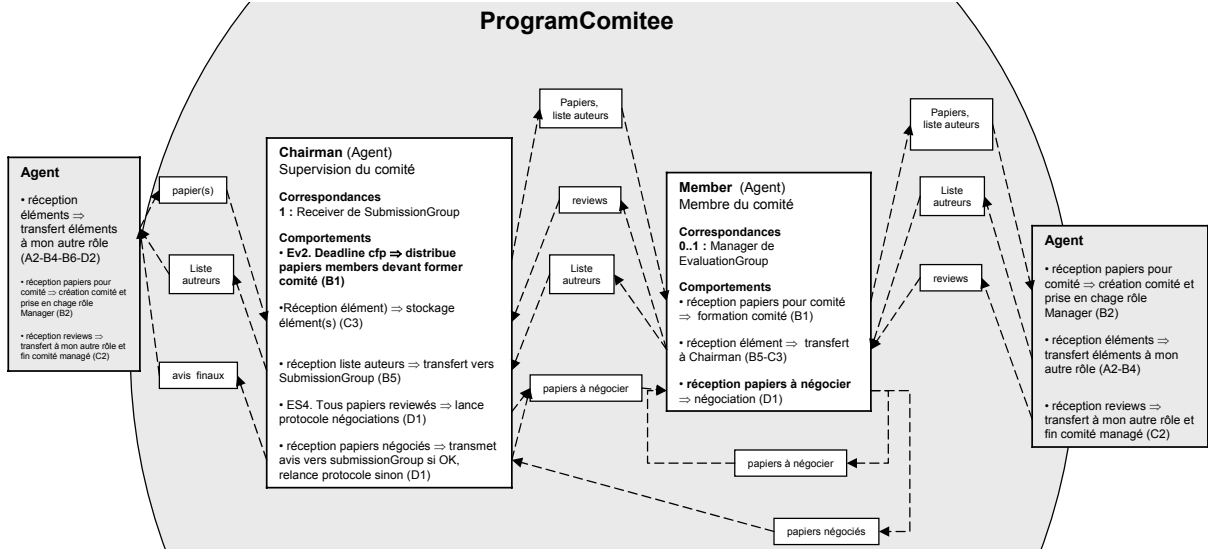


FIG. 32 – Role model du groupe **Production** (exemple de l'épizootie)

Dynamiques organisationnelles au niveau des agents : diagrammes de composition des rôles La dernière étape du processus de conception est de décrire la manière dont les agents gèrent dynamiques organisationnelles et compositions de rôles. On peut pour cela tracer un diagramme de composition des rôles pour chacun des types d'agents du modèle.

On y représente les différents états organisationnels possibles de l'agent, c'est-à-dire les différentes possibilités de prise en charge de rôles qu'il peut rencontrer durant la simulation.

FIG. 33 – Role model du groupe **ProgramComitee** (exemple du reviewing)

Pour chacun des états organisationnels, on représente les communications possibles entre l'agent et ses rôles, ainsi que les transitions d'un état à un autre. Les états initiaux sont fléchés depuis un rond plein représentant l'initialisation de la simulation.

Pour représenter les communications, on écrit au niveau des rôles un cartouche pour chacun des messages envoyé aux agents. Les actions des agents sont aussi décrites dans des cartouches, et peuvent être de type :

- transfert à : transfert du message au rôle concerné ;
- modification et notification : modification d'une variable de l'agent et transfert aux rôles devant être notifiés ;
- dynamique organisationnelle : la conséquence est alors une transition d'état organisationnel, représentée par une flèche en pointillé ;
- pour des actions plus cognitives, le cartouche doit expliquer la décision de l'agent.

Chacune des actions est référencée avec les étiquettes des diagrammes dynamiques locaux.

En construisant ce type de diagramme, on peut identifier les informations dont doit disposer l'agent pour effectuer correctement ses compositions de rôles et les éventuelles contradictions auxquelles il doit faire face. C'est donc ce type de diagramme sur lequel il faudra tout particulièrement se concentrer lorsque l'on voudra faire évoluer le modèle par ajout de nouveaux groupes.

Le diagramme de composition des rôles de l'agent **Agent** du processus de reviewing est donné pour l'exemple (fig. 34). On voit que **Agent** est essentiellement chargé de transférer des informations, et qu'il doit donc être capable d'effectuer le routage correspondant aux informations qu'il reçoit.

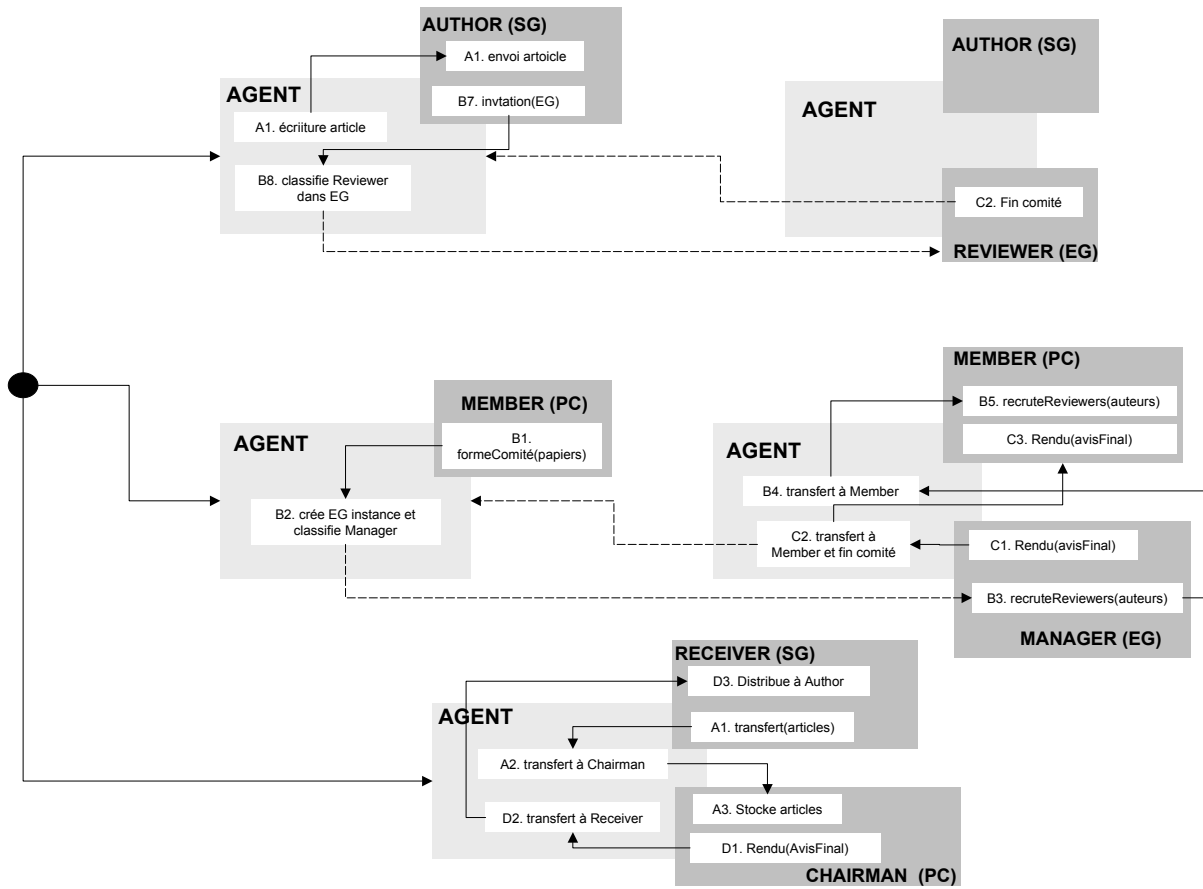


FIG. 34 – Diagramme de composition des rôles de **Agent** (exemple du reviewing)

3.3.6 Conclusion

Les diagrammes de conception d'ORIGAMI se répondent l'un l'autre et le déroulement de la méthode renforce la cohérence du système.

Par exemple :

- les correspondances entre rôles sont concrétisées sur les diagrammes de composition de rôles et peuvent être modifiées en retour ;
- les étiquetages sur les derniers diagrammes qui se font de plus en précis, et offrent 3 vues complémentaires sur le modèle, permettent de maintenir la cohérence. Des ajustements sur des diagrammes déjà tracés peuvent donc intervenir ;
- et bien sûr la précision progressive des dynamiques peut mener à revenir sur le diagramme swimlane.

Seuls les 2 derniers types de diagrammes (role models et diagrammes de composition des rôles) permettent réellement de passer au codage puisqu'il représentent des actions des entités. Certains diagrammes sont plus appropriés à la communication (swimlane, dynamiques globaux et locaux), alors que d'autres n'ont d'autres objectifs que de passer au codage (roles models et composition de rôles).

3.4 Les diagrammes de mise en œuvre

En plus des diagrammes de conception qui forment une méthodologie pour passer de modèles du domaine à un modèle conceptuel, ORIGAMI propose aussi une série de diagrammes pouvant être utilisés ponctuellement pour éclaircir des points de mise en œuvre.

3.4.1 Séquencement des dynamiques

Les diagrammes de conception fournissent différentes vues dynamiques mais ne permettent pas de rentrer dans des détails tels que l'envoi d'influences ou de visualiser le séquencement de plusieurs dynamiques, ce qui peut être utile pour régler ou documenter certains points d'implémentation.

Diagrammes de séquence organisationnels Les diagrammes de séquence organisationnels sont des représentations inspirées des diagrammes de séquences UML et introduites par [Ferber *et al.*, 2003] afin de pouvoir représenter les dynamiques organisationnelles. Les diagrammes de séquence organisationnels que nous présentons ont été adaptés de [Ferber *et al.*, 2003].

Un diagramme de séquence organisationnel décrit une séquence d'une simulation. Les groupes sont représentés par des boîtes contenant les rôles qui sont pris en charge durant la séquence. Chaque rôle est représenté par une « ligne de vie », épaissie quand le rôle est activé. Les rôles pris en charge par un même agent sont reliés par une ligne épaisse au niveau de la tête de la ligne de vie. Les lignes de vie débutant ou finissant dans le diagramme représentent la prise en charge ou l'abandon du rôle pendant la séquence.

On représente systématiquement le **Scheduler** sur un diagramme de séquence organisationnel car c'est lui qui lance les processus. Les agents ne sont représentés que si leur action ne peut être éludée : si l'agent ne fait que transférer des messages entre ses rôles, ou prendre en charge ou abandonner un rôle, on ne le représente pas afin de ne pas alourdir inutilement le diagramme.

Chaque phase d'activation du **Scheduler** correspond à un cycle de simulation. La date du cycle est écrite en italique au niveau du Scheduler. Si la date n'est pas absolue, mais relative à une entité, l'entité est aussi écrite. La programmation d'événements est représentée par l'envoi d'un message contenant l'événement au **Scheduler**. Les actions de durée non nulle se prolongent sur la ligne de vie des entités concernées entre 2 dates.

La séquence comprenant la soumission d'un article et son évaluation par un comité de lecture dans l'exemple du reviewing est montrée sur le diagramme de séquence organisationnel fig. 35.

Dans l'exemple, le premier processus est l'envoi d'un papier depuis un **SubmissionGroup**. Les messages envoyés de rôle à rôle contiennent le papier envoyé : le contenu des messages peut être précisé au-dessus des flèches les représentant.

Le second processus, déclenché à la deadline (paramètre du rôle **Chairman**) débouche sur la formation des **EvaluationGroup**. A la fin du processus, les **Reviewer** entament leur action d'évaluation. Cette action a une durée dépendant du reviewer. Celui-ci communique donc au **Scheduler** la date à laquelle son évaluation sera terminée. Quand toutes les évaluations sont reçues par le **Manager**, celui lance le protocole de négociation. On ne détaille pas le protocole de négociation, qui peut correspondre à n'importe quel protocole de négociation standard largement décrit dans la littérature, et déjà documenté en terme de rôles dans des diagrammes de séquence.

Ces diagrammes représentent une implémentation possible des diagrammes conceptuels et peuvent être plus ou moins détaillés. Ils permettent de bien visualiser le séquencement et les différentes dates d'activation des événements, ainsi que les dynamiques organisationnelles mais

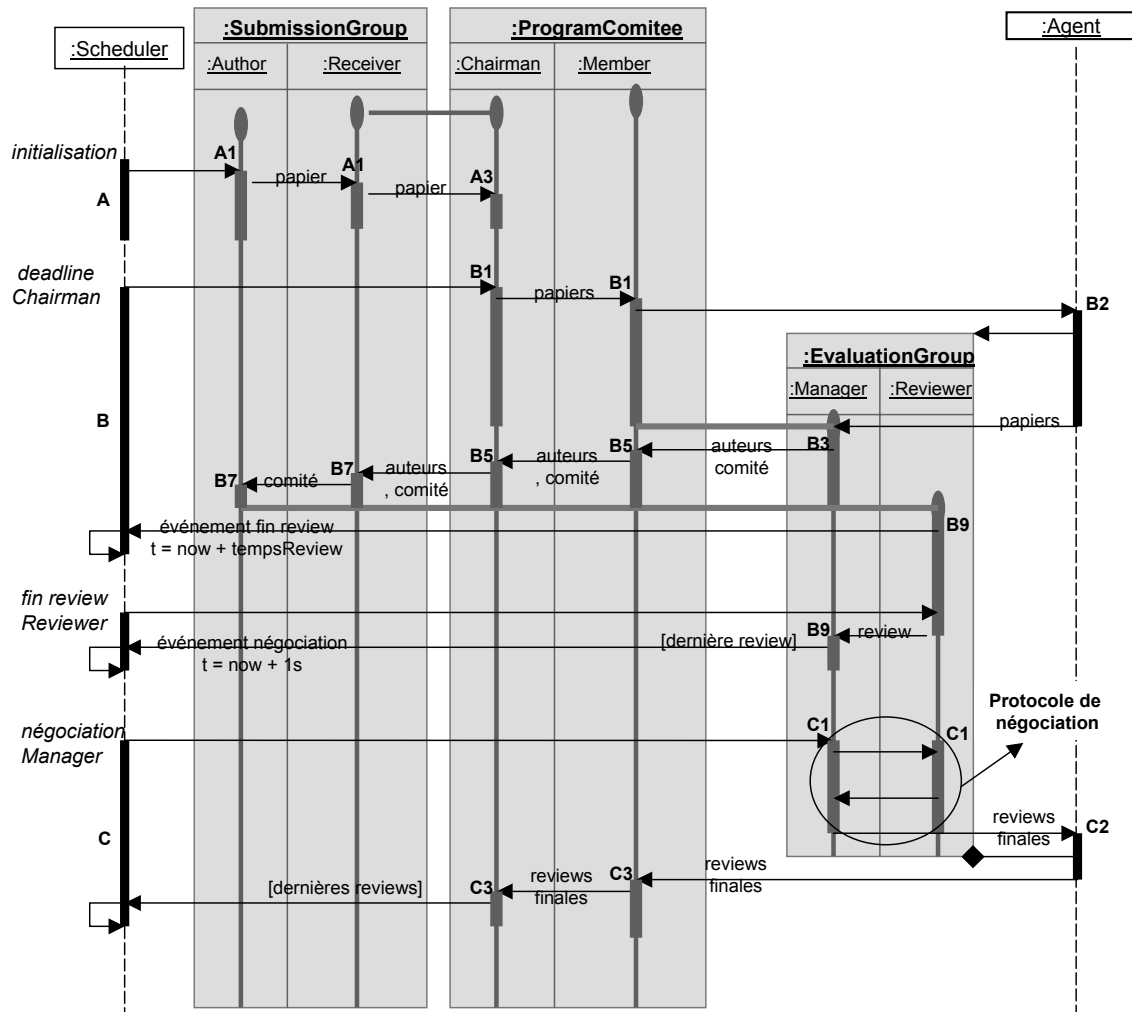


FIG. 35 – Exemple de diagramme de séquences organisationnel pour le reviewing (d'après [Ferber et al., 2003])

la représentation est fortement contrainte par la flèche du temps dirigée vers le bas, et peut rapidement devenir lourde si trop de détails sont inclus.

Diagrammes d'activité organisationnel Les diagrammes d'activité organisationnels offrent une vue de même ordre, mais plus détaillée, que les diagrammes dynamiques locaux : on y représente la séquence d'actions déclenchée par l'activation d'un ou plusieurs événements en rentrant dans le détail des groupes. Les événements y sont datés, on peut y inclure des envois d'influence et des bifurcations ou des gardes sur les transitions entre les actions. La représentation de plusieurs séquences d'action susceptibles d'être déclenchées simultanément permet de repérer d'éventuels conflits d'accès à des variables.

Les diagrammes d'activité organisationnels sont des représentations personnalisées inspirées des diagrammes d'activité UML. Les groupes sont représentés par des rectangles compartimentés en rôles, les agents par des ellipses attenantes aux rôles pris en charge, et les actions par des rectangle arrondis situés dans le rôle ou l'agent concerné. La manière de représenter événements

et influences est explicitée sur la figure 36.

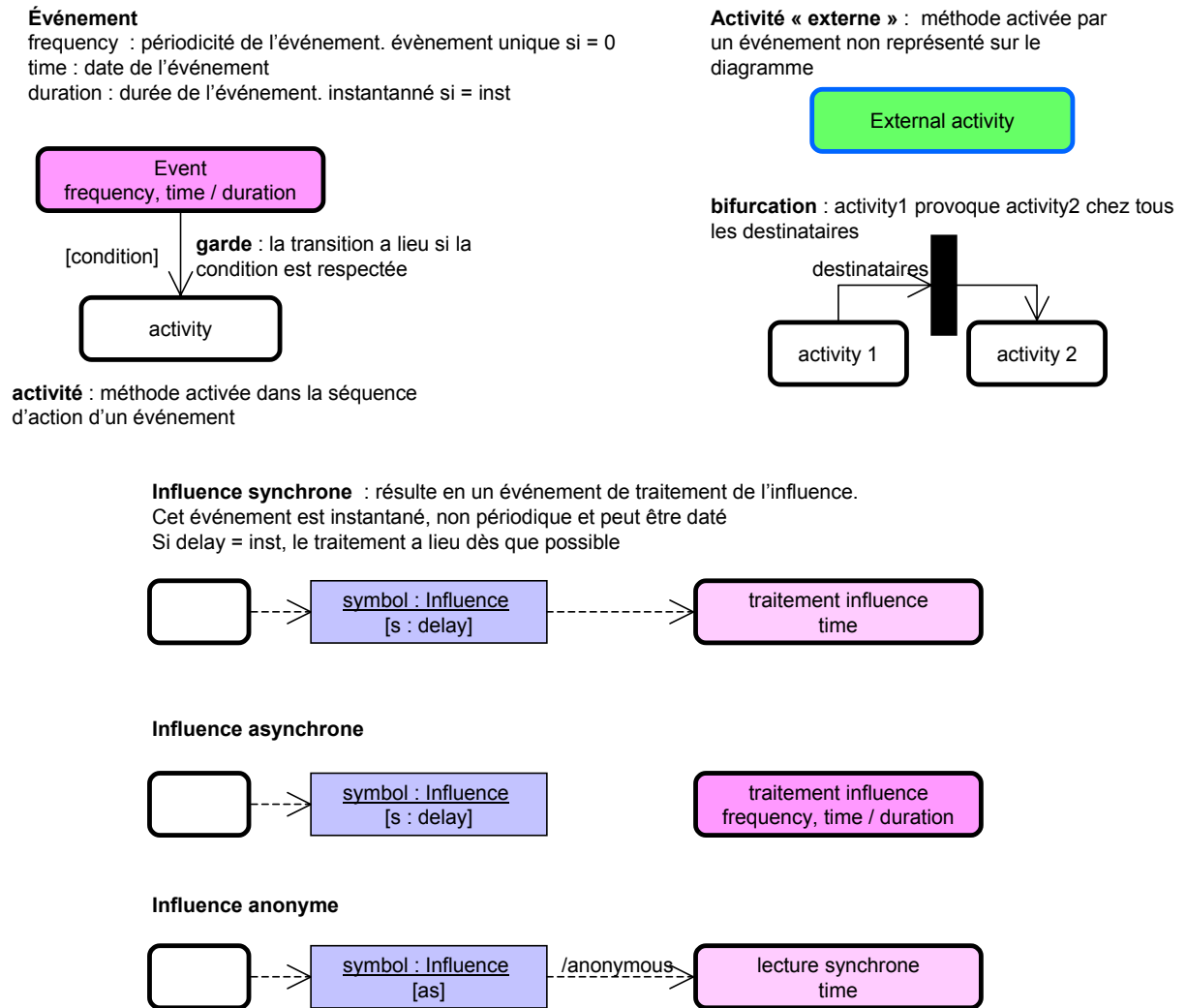


FIG. 36 – Représentation des événements et des influences dans les diagrammes d'activité organisationnels

Par rapport aux role models, les diagrammes dynamiques locaux sont plus explicites quant à la gestion des processus puisqu'ils sont centrés sur les processus et qu'on peut y représenter plusieurs groupes.

Le diagramme d'activité organisationnel pour le processus de soumission de papiers dans l'exemple du reviewing est représenté figure 37. Les papiers sont envoyés dans des influences asynchrones au **Chairman**, qui les stocke jusqu'à la deadline.

Là encore, le diagramme décrit une implémentation possible de ce qui apparaît dans les diagrammes conceptuels. On représente sur les diagrammes d'activité organisationnels des détails d'implémentation plus fins que sur les diagrammes de séquence organisationnels (influences), mais on ne peut y représenter des dynamiques organisationnelles.

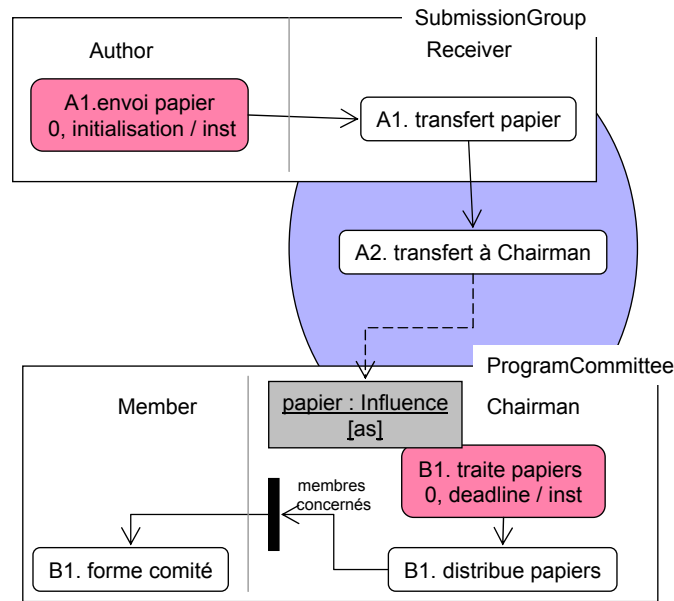


FIG. 37 – Exemple de diagramme d'activité organisationnel pour l'épizootie

3.4.2 Dynamiques et états

Diagrammes d'état Il est possible d'utiliser des diagrammes d'état UML pour décrire les transitions entre différents états d'une entité. Ils peuvent permettre :

- de se placer à un niveau plus abstrait que celui de l'implémentation pour décrire toutes les possibilités d'action d'un agent pendant la simulation (en vue de faire du transfert de modèle par exemple) ;
- ou bien de rentrer dans des détails cachés derrière le polymorphisme (une action d'un agent dans un diagramme de séquence ou d'activité peut être différente suivant l'état de l'agent).

Le diagramme d'état pour le rôle **Site** de l'épizootie donné figure 38 illustre le fait que le rôle agit différemment selon qu'il soit dans un état contaminant ou pas.

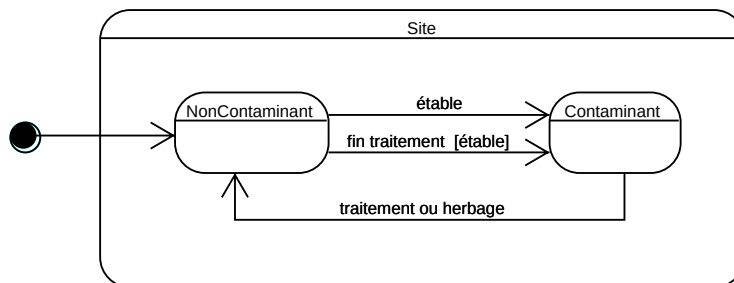


FIG. 38 – Exemple de diagramme d'état pour l'épizootie

3.4.3 Bilan

Chaque type de diagramme offre donc un niveau de détail différent (dans le temps de la simulation et la précision par rapport à l'implémentation) :

- le diagramme d'état, utilisation « hors contexte » couvre tout le temps de la simulation, mais un seul agent. Il est très éloigné de l'implémentation ;
- le diagramme de séquences couvre tout le temps et tous les agents. Il est spécifique à une implémentation AGR ;
- le diagramme d'activité couvre la séquence d'actions résultant de l'activation d'un événement et tous les agents concernés ;
- le diagramme d'état, utilisation « microscopique » couvre éventuellement tout le temps, mais une action bien précise d'un seul agent. Il est proche de l'implémentation.

On ne donne pas de recommandation sur l'ordre dans lequel utiliser ces diagrammes, leur utilisation se faisant quand le besoin de décrire certains aspects dynamiques des modèles se fait sentir.

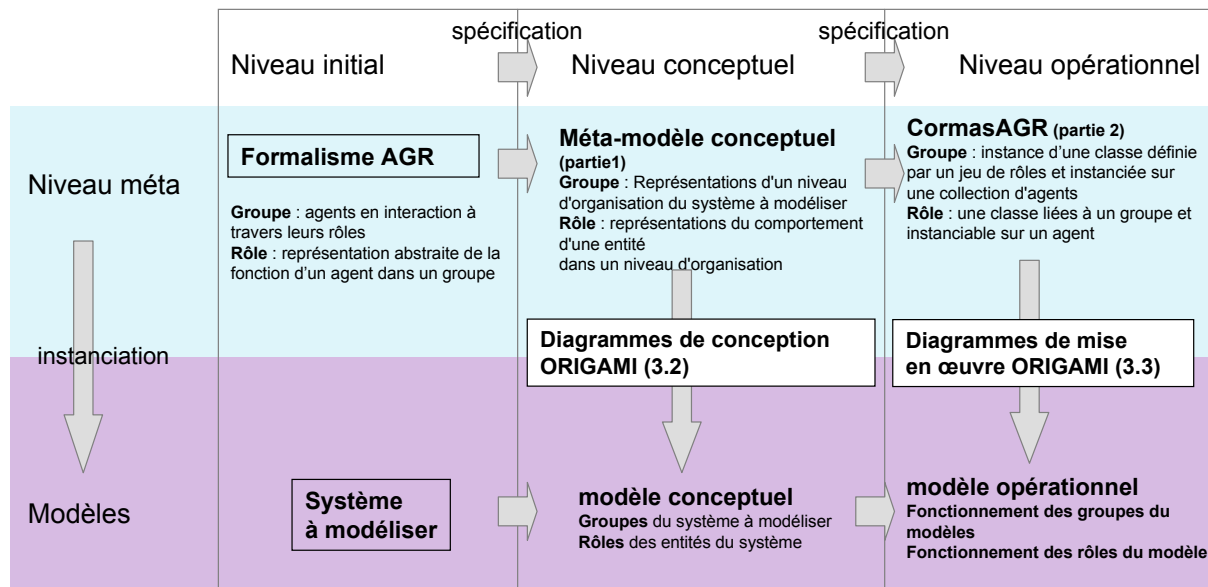


FIG. 39 – Éléments développés dans le chapitre : instanciation et spécification du formalisme AGR

CONCLUSION DU CHAPITRE

La figure 39 fournit une vue synthétique des éléments développés dans le chapitre, et de la démarche générale de la thèse.

Le formalisme AGR est spécifié successivement

- en un méta-modèle conceptuel qui redéfinit les objets représentés par les agents, les groupes et les rôles dans le cadre d'une application à la modélisation ;
- en un méta-modèle opérationnel, qui propose une implémentation appropriée des groupes et des rôles dans CormasAGR

La méthodologie ORIGAMI définit un jeu de diagrammes permettant de définir les modèles conceptuels et opérationnels d'un système cible instanciant les méta-modèles.

Il s'agit maintenant de s'occuper d'un système concret, celui de la mise en œuvre des règles collectives de gestion de l'eau dans la Drôme, et de mettre en œuvre et de tester ces différents développements sur des modèles de ce système. La construction d'un modèle-jouet aura pour but de mettre concepts, implémentation et méthodologie à l'épreuve. Puis le développement de modèles plus complexes permettra d'en explorer plus avant la souplesse et l'expressivité.

Chapitre 5

Un modèle-jouet pour expliciter concepts et méthodologie

CONTENU DU CHAPITRE

Le chapitre précédent pose les bases conceptuelles, opérationnelles et méthodologiques d'une interprétation d'AGR pour une application à la modélisation. Le développement d'un premier modèle a pour objet d'éprouver et renforcer ces différents développements par des allers-retours entre hypothèses de modélisation, diagrammes et implémentation, l'implémentation révélant des problèmes non perçus lors de la conceptualisation du modèle et la construction des diagrammes, et les diagrammes d'ORIGAMI formalisant les problèmes soulevés lors des implémentations.

Afin de ne pas rajouter à la complexité des concepts une complexité propre à l'objet modélisé, ce travail s'effectue autour d'une situation jouet. Cette situation jouet se veut différente des exemples déjà pris pour expliciter AGR (épizootie et gestion d'un porte-monnaie dans [Amiguet, 2003], comité de lecture d'un article dans [Ferber *et al.*, 2003]), et approchante de notre application (gestion de l'eau dans la Drôme). Nous avons donc encore simplifié la situation modélisée par GibiDrome, un prototype multi-agent déjà réalisé sur la Drôme [Barreteau *et al.*, 2003].

Après avoir exposé les différents éléments de la situation jouet (1), nous déroulerons les diagrammes de conception d'ORIGAMI pour définir les composants AGR du modèle jouet et leur comportement (2). Nous reviendrons ensuite sur quelques questions liées à la mise en œuvre du modèle (3). Enfin nous définirons comment le modèle peut s'initialiser et se paramétrer (4).

Sommaire

1	De GibiDrome à la situation jouet	148
1.1	Le modèle-jouet : une version simplifiée de GibiDrome	151
1.2	La situation-jouet	153
1.2.1	Description	153
1.2.2	Hypothèses de modélisation	154
2	Conception du modèle-jouet	157
2.1	Quelles structures de groupe : structures et fonctions	157
2.2	Quels agents : lister les entités individuelles du système	158
2.3	Quels rôles : fonction des agents dans les groupes	159
2.3.1	Fonctions naturelles du système : circulation et transformation de l'eau	159
2.3.2	Fonctions d'usage de la ressource : allocation de l'eau	161
2.3.3	Vue d'ensemble : rôles et liens entre les groupes	163
2.4	Aspects dynamiques	166
2.4.1	Vue d'ensemble	166
2.4.2	Processus physiques	167
2.4.3	Processus sociaux	170
3	Quelques points de mise en œuvre du modèle	172
3.1	Règles collectives et règles individuelles	172
3.2	Gestion des rôles : cas où un agent prend part à plusieurs instances d'un même groupe	175
3.3	Gestion du temps : événements et influences	176
4	Initialisation et paramétrage	178
4.1	Initialisation	178
4.2	Paramétrage	180

1 De GibiDrome à la situation jouet

L'historique et les enjeux de la gestion de l'eau d'irrigation dans le SAGE Drôme, ainsi que l'histoire et le rôle du modèle GibiDrome ont été présentés dans la section 2 du chapitre 3. Pour se concentrer sur les questions d'architecture et de méthodologie de modélisation, le choix a été fait de s'abstraire des questions de terrain. La gestion de l'eau dans la Drôme n'est plus qu'un fil conducteur, et le modèle GibiDrome est utilisé comme un point de départ pour tester les développements effectués autour d'AGR.

La figure 40 représente les simplifications qui avaient été opérées pour passer de la situation réelle à GibiDrome, puis celles qui ont été faites pour passer de GibiDrome à la situation-jouet.

GibiDrome est ici présenté globalement. Il est décrit plus en détail dans l'annexe D. Dans GibiDrome, 3 *niveaux de gestion* sont représentés :

- **niveau du bassin** : l'agent gestionnaire est la CLE, l'instance de concertation du bassin. Elle centralise les modalités de gestion (définies au niveau du SAGE) que les usagers doivent appliquer, ainsi que les règles de déclenchement des restrictions.

Les objets sont la Rivière, ainsi que le **ScenarioClimatique**, qui déroule des séries historiques pour les pluies, le débit entrant, et l'évapotranspiration. Cette entité est placée au niveau du bassin car ces différentes grandeurs y sont uniformes ;

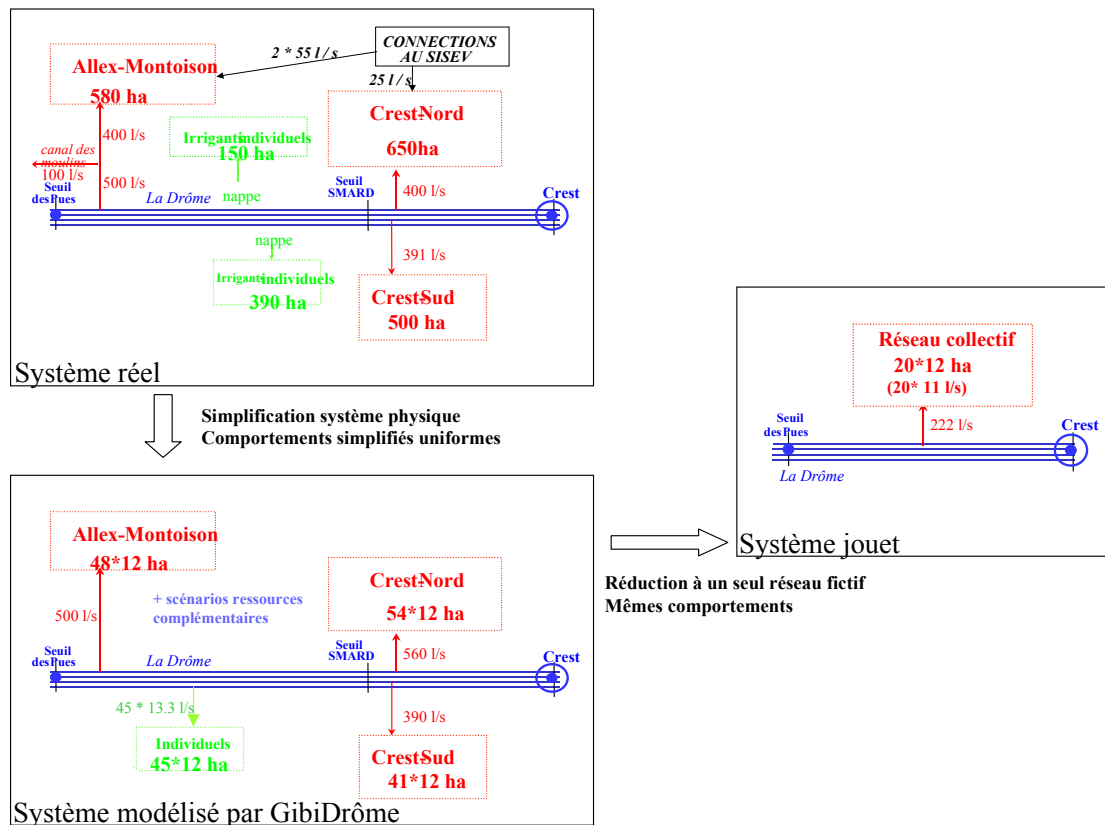


FIG. 40 – Simplifications du système étudié : du cas réel à GibiDrome, puis de GibiDrome à la situation jouet (d’après SICB)

- **niveau des réseaux d’irrigation collectifs** : l’agent gestionnaire est le **Reseau**. Il distribue l’eau aux usagers en fonction de leur demande et de la quantité d’eau disponible. En cas de crise, il peut déclencher l’usage de nouvelles ressources, et applique les modalités de gestion définies par la CLE.
L’objet est la **Pompe** caractérisée par sa capacité maximale. Les bornes des irrigants ne sont pas représentées : la quantité d’eau nécessaire à l’irrigation du jour est prélevée directement à la borne d’entrée du réseau, et attribuée proportionnellement à la demande si la quantité d’eau disponible n’est pas suffisante. Sur le terrain, des disparités assez contraignantes dues à des effets de perte de charge sont observées sur les lignes à l’intérieur des réseaux. Ces éléments n’étant pas rentrés en discussion, ils ne sont pas représentés ;
- **niveau des irrigants** : l’agent gestionnaire est le **Paysan**. Chaque paysan dispose de 6 parcelles emblavées en maïs, et d’un accès à l’eau, individuel ou collectif. Ceci permet de représenter facilement une rotation hebdomadaire de l’irrigation, qui correspond à la pratique majoritaire dans la Drôme. Un paysan fait chaque jour une demande d’eau et irrigue la parcelle concernée. Il n’y a pas de modification de comportement si il n’obtient pas l’eau qu’il avait demandé ou si il pleut.
Les objets sont la **Pompe**, pour les irrigants individuels, la **Parcelle** et la **Culture**. La culture actualise chaque jour sa croissance en fonction de l’évapotranspiration et de l’eau présente dans le sol de la parcelle. Chacune des parcelles peut avoir une profondeur de

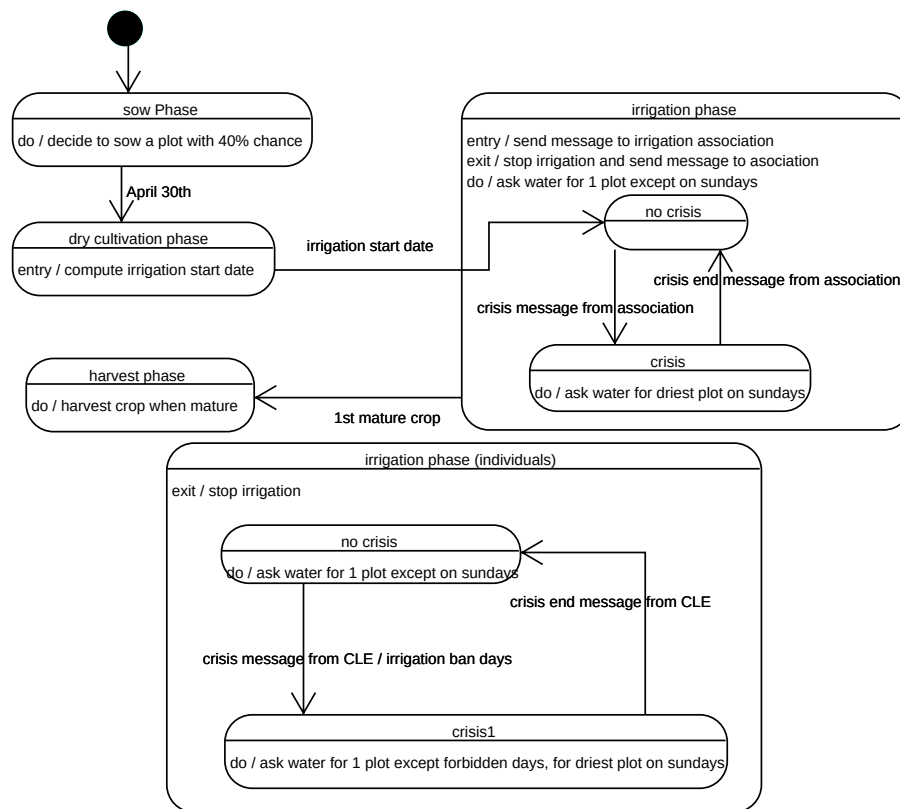


FIG. 41 – Diagramme d'état UML du comportement des irrigants dans GibiDrome. Pour les irrigants individuels, seul le comportement en phase d'irrigation change

sol variable (3 types de profondeurs de sols correspondant à une classification issue de l'expertise de [Camacho, 2002]).

L'assolement tout maïs a été retenu dans un premier temps parce que cette culture est très majoritaire en période d'étiage et très consommatrice en eau. Ce choix a satisfait les acteurs puisqu'il n'implique pas une mise en discussion de leurs choix d'assolement et conduit à une surestimation de leur consommation, ce qui est avantageux pour eux.

L'unicité de l'accès à l'eau constitue également une simplification du modèle, nombre d'irrigants de la Drôme disposant d'accès à l'eau multiples (souvent des bornes dans un ou plusieurs réseaux, et une ressource individuelle pour ceux qui irriguent non loin du lit de la Drôme).

Les irrigants ont 4 phases de comportements :

- **semis** : chaque jour entre le 1er et le 30 avril, l'irrigant a 40% de chance de choisir de semer une de ses 6 parcelles parmi celles qui ne le sont pas encore. Ceci permet d'étaler les dates de semis et d'ajouter un petit aléa qui fait que parfois une parcelle n'est pas semée ;
- **lancement de l'irrigation** : il y a 3 règles possibles de lancement de l'irrigation :
 - à date fixe : départ de l'irrigation le 15 juin ;
 - selon la teneur en eau du sol : quand la réserve facilement utilisable du sol d'une des parcelles atteint 5% de la RFU maximale ;
 - selon un bulletin central : quand, dans un échantillon de 10 parcelles la RU moyenne

atteint 60% de la RU maximale moyenne ;

- **irrigation** : Chaque jour dans la semaine, une des parcelles de l'irrigant est irriguée et il n'y a pas d'irrigation le dimanche sauf en période de restriction. Du 10 juin au 15 juillet et après le 15 août l'apport est de 30 mm chaque jour, et de 40 mm du 10 juillet au 15 août.

En période de restriction, la parcelle dont les réserves hydriques sont les plus basses est irriguée le dimanche avec la même quantité.

Les irrigants individuels doivent de plus respecter 1,5 (resp. 3) jours d'arrêt hebdomadaires consécutifs en crise 1 (resp. 2). Ces jours sont attribués de manière aléatoire et restent les mêmes pour toute la saison pour chaque irrigant ;

- **récolte** : les parcelles sont récoltées quand elles arrivent à maturité (date de semis + nombre de jours propre à l'espèce).

Les diagrammes de la figure 41 décrivent complètement ce comportement.

Quelques hypothèses sous-jacentes à GibiDrome importantes pour la suite :

- **propagation du débit et temps** : le pas de temps d'une journée et la taille réduite du bassin simulé permettent d'appuyer l'hypothèse d'un temps de propagation de l'eau nul dans le système ;
- **gestion de la demande** : dans GibiDrome, la modulation de la demande s'effectue par rapport aux débits. Cela correspond à la réalité de la gestion collective, où les objectifs sont fixés en terme de débit objectif et de réduction de débit de prélèvement, alors que dans la réalité de la gestion individuelle, la modulation de la demande se fait par rapport à la durée de l'irrigation, les débits restant constants ;
- **respect des restrictions** : tous les agents sont « honnêtes » ; ils respectent les restrictions qui leurs sont imposées ;
- **distribution du manque d'eau** : dans les réseaux collectifs de GibiDrome, l'eau est distribuée proportionnellement à la demande. Cependant, on observe sur le terrain des effets de pertes de charge durant les périodes de pointe (les bornes en bout de ligne ou situées sur des hauteurs subissent des pertes de débit).

1.1 Le modèle-jouet : une version simplifiée de GibiDrome

Simplifications Dans la situation jouet, un seul réseau avec 20 irrigants pompe dans la rivière. Comme dans GibiDrome, chaque irrigant possède 6 parcelles en maïs.

Les règles de comportement, décrites dans le tableau 20 sont les mêmes que dans GibiDrome. Cependant,

- on ne modélise qu'une seule règle de lancement de l'irrigation (date fixe) ;
- on ne modélise pas de ressources complémentaires ; les règles y faisant référence ne sont donc pas modélisées non plus.

Agent	Règle	Description - modalités
Bassin	Déclenchement crise 1	crise 1 quand débit aval $< 2.4 \text{ m}^3/\text{s}$ (débit objectif fixé par le Sage)
	Restrictions crise 1	réduction de 20% des prélèvements dans la rivière
	Déclenchement crise 2	crise 2 quand débit aval $< 2.4 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 7 jours consécutifs
	Restrictions crise 2	réduction de 40% des prélèvements dans la rivière
	Retour situation normale (crise 0)	retour normale quand débit aval $> 3 \text{ m}^3/\text{s}$
	Situation normale	Pas de restrictions
Association d'irrigants	Calcul réductions ^a : niveau de référence	capacite : capacité maximale de la prise sur la rivière 10Maïs : quantité d'eau consommée si tout le réseau était planté en maïs (surface totale réseau * besoin de référence du maïs à la date du passage en crise) 08Maïs : quantité d'eau consommée si 80 % du réseau était planté en maïs ^b ($0.8 * \text{surface totale réseau} * \text{besoin de référence du maïs à la date du passage en crise}$)
	Calcul réductions ^c mode de partage	tourPrélèvement : La restriction s'applique aux prélèvements dans la rivière ^d tourApports : La restriction s'applique à l'ensemble des prélèvements du réseau (total des apports)
	Répartition de l'eau entre les irrigants	proportionnel à la quantité d'eau disponible et aux demandes
Irrigant	Semis	tirage d'une parcelle non semée par jour entre le 1er et le 30 avril ; probabilité d'effectuer le tirage de 40%
	Lancement de l'irrigation	dateFixe : lancement de l'irrigation au 15 juin
	Irrigation normale	demande de 30 mm le jour i de la semaine pour la parcelle i , $i \in [1,6]$ (pas d'irrigation le dimanche). Entre le 15 juillet et le 15 août, la demande passe à 40 mm
	Irrigation collective en cas de crise	même demande pour les jours 1 à 6 de la semaine. Le jour 0, demande de la quantité d'eau appropriée (30 ou 40 mm) pour la parcelle la plus sèche
	Irrigation individuelle en cas de crise	idem irrigation collective + 1.5 jour d'arrêt en crise 1, 3 jours d'arrêt en crise 2
	Arrêt de l'irrigation	après le 1er septembre, arrêt de l'irrigation pour toutes les parcelles quand l'une d'elle est arrivée à maturité (date maturité = date semis + durée maturation caractéristique de la plante)
	Récolte	récolte le jour de la date de maturité. Le rendement actualisé est noté, et la parcelle remise à l'état pré-semis

TAB. 20 – Principales règles de comportement des agents de GibiDrome. Seules celles en gras sont véritablement implémentées sous forme de règles. Les autres sont implicitement incluses dans les comportements des agents

^avoir tableau 1 de l'annexe D pour l'explicitation des calculs

^bc'est le coefficient de correction effectivement retenu pour les calculs dans la réalité

^cid. a

^dc'est le calcul qui est effectué sur le terrain. Il tient compte de l'effort financier effectué par les réseaux ayant acquis des ressources complémentaires. L'autre mode de calcul revient à une mutualisation des ressources complémentaires sur l'ensemble du bassin

Ajouts La situation jouet a été construite dans l'idée d'aller plus loin que GibiDrome. Quelques ajouts ont donc été faits en vue de ces extensions :

- les prises des irrigants collectifs sont matérialisées, ceci afin de pouvoir s'intéresser à d'éventuels effets amont-aval dans les réseaux, et de pouvoir gérer plus facilement des situations où les irrigants ont des prises de natures différentes ;
- ces prises sont placées en ligne à partir de la rivière. On pourra ainsi prendre en compte des effets de perte de charge, qui sont une contrainte importante dans la réalité.

Ajustements Dans GibiDrome, la disponibilité individuelle en eau varie suivant le type d'accès : $3.11 \text{ m}^3/\text{h/ha}$ pour Crest-Nord, $3.125 \text{ m}^3/\text{h/ha}$ pour Allex-Montoison, $2.85 \text{ m}^3/\text{h/ha}$ pour Crest-Sud (rapport entre capacité des réseaux et surfaces souscrites), $3.99 \text{ m}^3/\text{h/ha}$ pour les irrigants individuels. Cela donne une disponibilité individuelle moyenne de $3.26 \text{ m}^3/\text{h/ha}$. Pour retrouver cet ordre de grandeur dans le modèle-jouet :

- on donne à chaque irrigant une borne de $40 \text{ m}^3/\text{h}$ pour ses 6 parcelles de 2 hectares. L'irrigant aura la possibilité de moduler le débit de sa pompe afin d'agir sur les demandes en débit, comme dans GibiDrome.
- on met une prise de réseau de $800 \text{ m}^3/\text{h}$ pour les 20 irrigants. Ainsi, à moins d'une crise, les irrigants ont toujours l'eau dont ils ont besoin, ce qui est le cas dans GibiDrome.

Les prélèvements en rivière sont environ 9 fois moins importants dans le modèle-jouet que dans GibiDrome. Afin de retrouver des situations de crise similaires, on ramène aussi le débit entrant dans le système (série climatique) à $1/9^{\text{ème}}$ de sa valeur dans GibiDrome.

On ne cherchera pas à affiner les calages entre le modèle-jouet et GibiDrome. En effet, les ordres de grandeurs ne sont conservés que pour retrouver des situations de crises similaires et tester que le modèle-jouet fonctionne correctement (fonctionnement global cohérent). Le but de l'exercice est de mettre à l'épreuve la méthodologie et les concepts AGR. Des tests de sensibilité et des comparaisons ne seront pratiqués qu'une fois le modèle-jouet étendu à une reproduction de GibiDrome.

1.2 La situation-jouet

1.2.1 Description

L'utilisation d'AGR est basée sur une analyse des niveaux d'organisation. On s'est efforcé de souligner sur le schéma 42 de la situation jouet la coexistence de 3 niveaux de gestion : bassin, réseau et exploitation.

La situation jouet est donc constituée de :

- un réseau d'irrigation qui pompe dans une rivière. A ce niveau, un responsable de bassin, la CLE, fixe les règles de répartition de l'eau entre usagers en cas de crise, ainsi que les règles de déclenchement des crises ;
- ce réseau d'irrigation est physiquement composé d'une conduite qui alimente 20 bornes identiques en série. Il possède un président et 20 abonnés (1 pour chacune des bornes). A ce niveau les comportements définissent la circulation de l'eau dans le réseau, ainsi que la mise en œuvre des règles de répartition de l'eau ;
- chaque borne dessert un ensemble de six parcelles qui appartiennent à un agriculteur. A ce niveau, les comportements définissent : le type de culture, le comportement individuel en cas de manque d'eau et la règle générale de répartition de l'eau entre les parcelles.

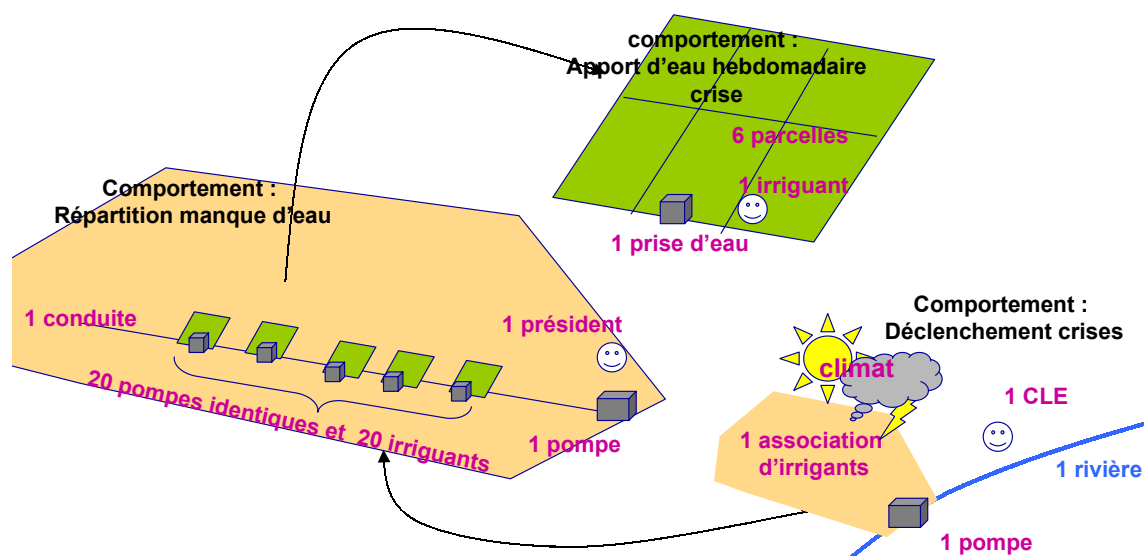


FIG. 42 – Représentation schématique de la situation jouet

Les règles de comportement sont les mêmes que dans GibiDrome. Cependant, alors que dans GibiDrome l'accent est mis sur la définition des règles collectives, le fait d'utiliser des rôles et de prendre une situation avec un seul type d'utilisateurs amène à se concentrer sur la mise en œuvre de ces règles au niveau individuel.

1.2.2 Hypothèses de modélisation

L'utilisation d'AGR et d'une gestion du temps par événements amène à préciser certaines hypothèses de modélisation.

Propagation de l'eau et pas de temps La gestion du temps par événements fait que le pas de temps implicite dans le modèle est de 1 seconde (temps minimum entre 2 événements). L'hypothèse du temps de propagation nul n'est donc plus justifiable comme dans GibiDrome, où le pas de temps est d'une journée. On considérera cependant que tous les événements hydrauliques ont un temps de propagation instantané. C'est une hypothèse très forte qui limite grandement la portée du modèle, mais dont nous nous contenterons, l'objectif de ce travail ne résidant pas dans la finesse du modèle physique.

Par ailleurs, la gestion asynchrone des événements impose que pour chaque événement modifiant une demande ou un débit dans le système, le débit soit propagé à nouveau dans tout le système, ou au moins dans tous ses éléments susceptibles d'être affectés par cette modification (voir section 2.3.1 sur la gestion du temps dans le chapitre 4).

Autre problème temporel : les données climatiques dont on dispose sont journalières. La circulation de l'eau reçoit donc une fonction créneau en entrée, alors que les demandes constituent des impulsions réparties sur la journée. Il y a donc un problème de cohérence entre l'unité de calcul et l'unité de gestion qui n'existait pas dans GibiDrome. On se contentera de cette approximation dans les modèles de la thèse.

Les chronogrammes de la figure 43 illustrent cette situation. Dans GibiDrome, le pas de temps est fixe, et il n'y a qu'un seul cycle de simulation par jour, durant lequel les valeurs

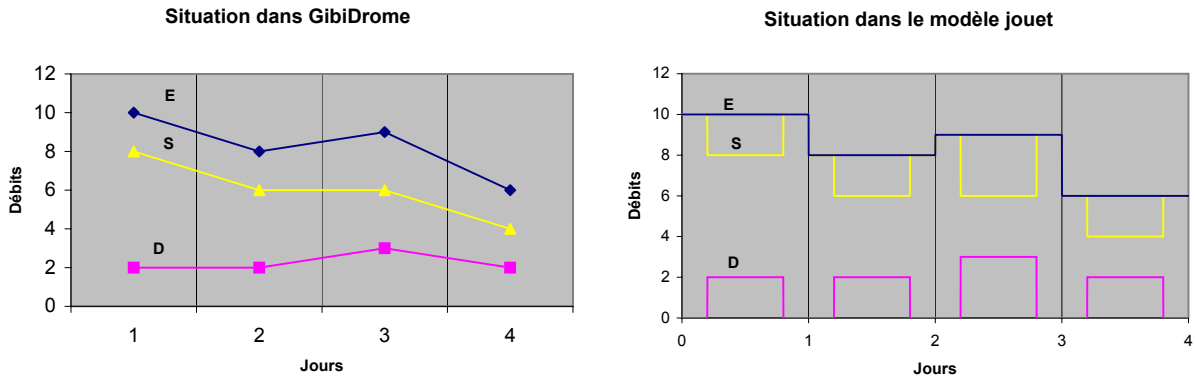


FIG. 43 – Chronogrammes illustrant la simulation du temps dans GibiDrome et dans le modèle jouet.

E représente le débit entrant, **S** le débit sortant, et **D** le total des demandes sur la rivière.

journalières de toutes les grandeurs hydrauliques sont rafraîchies. Dans le modèle jouet, les grandeurs hydrauliques sont rafraîchies dans des cycles de simulation indépendants, relatifs au niveau d'organisation dont elles dépendent. Ainsi, le débit entrant est rafraîchi une fois par jour, alors que l'ouverture et la fermeture des pompes peut avoir lieu à tout moment dans la journée : la demande totale peut être maximale à certains moments de la journée et nulle à d'autres. Il en résulte des variations infra-quotidiennes exagérées dans le débit sortant.

Modélisation de la pluie Comme dans GibiDrome, l'effet de la pluie est modélisé par un apport d'eau direct aux stocks des sols (pas de ruissellement, pas d'effet pluie-débit). Cependant là encore le mode de gestion du temps, qui hétérogénéise les unités de calculs, amène à faire de nouvelles hypothèses. Le choix a été fait de réaliser l'apport d'eau dû à la pluie de manière instantanée. Cet apport se fait à un moment aléatoire de la journée afin que, quand une réaction à la pluie des irrigants sera implémentée, il ne pleuve pas toujours au même moment. Ces hypothèses sont illustrées par les chronogrammes de la figure 44.

Séquençement des processus Dans GibiDrome, les calculs sont effectués à chaque date dans l'ordre suivant (voir fig. 4 dans l'annexe D) :

- rafraîchissement du débit entrant ;
- diffusion de l'eau dans le système (et donc irrigation). C'est à ce moment là que d'éventuelles restrictions sont mises en place ;
- pluie et bilan hydrique ;
- surveillance du niveau de la rivière et envoi des éventuels messages de restriction ;
- éventuels changements de comportement (lancement ou arrêt de l'irrigation...).

Dans le modèle jouet, la circulation de l'eau et les actions d'irrigation sont des processus indépendants qu'il faudra dater :

- le rafraîchissement du débit entrant se fait en début de journée (et le débit rafraîchi est diffusé dans tout le système) ;
- les irrigations se font tout au long de la journée selon les calendriers des irrigants. Dans le cas précis de reproduction de GibiDrome, les irrigations commencent au début de la journée et s'arrêtent à la fin (simulation d'une irrigation continue) ;
- la pluie se fait à un moment aléatoire de la journée ;

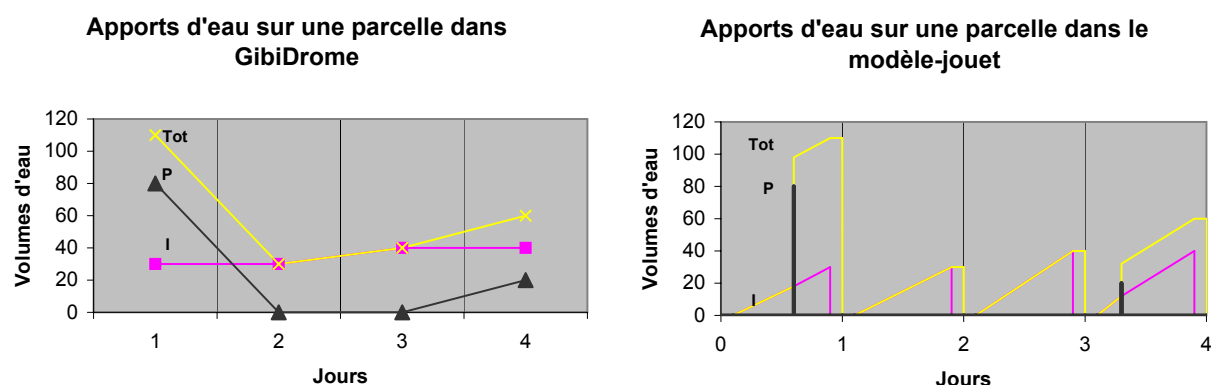


FIG. 44 – Chronogrammes illustrant la gestion des stocks d’eau à la parcelle dans GibiDrome et dans le modèle jouet, ainsi que les améliorations envisagées.

Tot représente le stock d’eau total de la parcelle, **P** représente la pluie, **I** représente l’apport d’eau dû à l’irrigation. L’apport d’eau total est remis à 0 à chaque bilan hydrique (en fin de journée).

- le bilan hydrique se fait à la toute fin de la journée ;
- la rivière est surveillée en milieu de journée (pendant que les irrigations sont en cours). De même que dans GibiDrome, les restrictions éventuelles sont mises en place le jour suivant.

Gestion de l’irrigation Au niveau de l’exploitation, les agriculteurs décident d’un calendrier d’irrigation en fonction des contraintes collectives, de la configuration de l’exploitation et des règles de comportement représentées dans GibiDrome

En résumé, les hypothèses de modélisation propres au modèle-jouet sont surtout liées au passage à une gestion par événements :

- hypothèse de propagation instantanée des événements hydrauliques reformulée ;
- pluie instantanée ;
- matérialisation d’un calendrier d’irrigation pour chacun des agriculteurs.

2 Conception du modèle-jouet

La modélisation AGR de la situation-jouet se fait en déroulant les différents tableaux et diagrammes conceptuels d'ORIGAMI. Les conventions utilisées dans les diagrammes, leur signification et leur construction sont exposées dans la section 3 du chapitre 4.

2.1 Quelles structures de groupe : structures et fonctions

La première étape du processus de transformation de la situation-jouet en modèle AGR consiste à repérer les différents types de niveaux d'organisation, qui formeront ensuite les structures de groupe du modèle.

Il faut pour cela lister structures et fonctions présentes dans la situation jouet. Les 4 structures sont celles qui apparaissent dans le schéma 40, auxquelles s'ajoute l'échelle de la parcelle, où s'effectue le bilan hydrique des cultures. On distingue par ailleurs 2 types de fonctions dans la situation jouet :

- la circulation de l'eau : propagation de débit de l'entrée du bassin à travers la rivière, puis de la prise d'eau du réseau aux bornes individuelles des irrigants, et enfin de la borne à la parcelle, où se déroule le bilan hydrique ;
- l'allocation de l'eau : mise en œuvre des règles de gestion individuelles et collectives par les différents acteurs.

Structures	Fonctions	
	Circulation de l'eau	Allocation de l'eau
Bassin	Circulation de l'eau dans la rivière (Basin)	Observation de la rivière et déclenchement des restrictions par la CLE (BasinManagement)
Réseau	Circulation de l'eau dans le réseau (IrrigationNetwork)	Exécution des restrictions, répartition de l'eau entre les irrigants (IrrigationAssociation)
Exploitation		Allocation de l'eau entre les parcelles (Farm)
Parcelle	Stockage de l'eau par le sol et bilan hydrique (Crop)	

TAB. 21 – Niveaux d'organisation de la situation-jouet. Les structures de groupe correspondantes sont entre parenthèses

Le tableau structure/fonction 21 présente les différents types de niveaux d'organisation ainsi retenus pour la situation-jouet, ainsi que les noms des structures de groupe correspondantes.

Les structures de groupe issues des processus d'allocation de l'eau décrivent des fonctions d'usage de la ressource. Les groupes correspondants sont reliés par des relations d'ordre sociales, chaque groupe étant contraint par des règles issues d'un groupe d'un niveau plus agrégé.

Les structures de groupe issues des processus de circulation de l'eau décrivent des fonctions naturelles du système. Les groupes correspondants sont reliés par des relations d'ordre hydraulique, chaque groupe recevant de l'eau d'un groupe de niveau plus agrégé.

Enfin, à chaque échelle, un groupe issu d'une structure de groupe « sociale » contrôle les objets hydrauliques d'un groupe issu de la structure de groupe « hydraulique » correspondante (relation d'usage).

Les structures de groupe ainsi déterminées présentent les relations fonctionnelles résumées sur le diagramme 45.

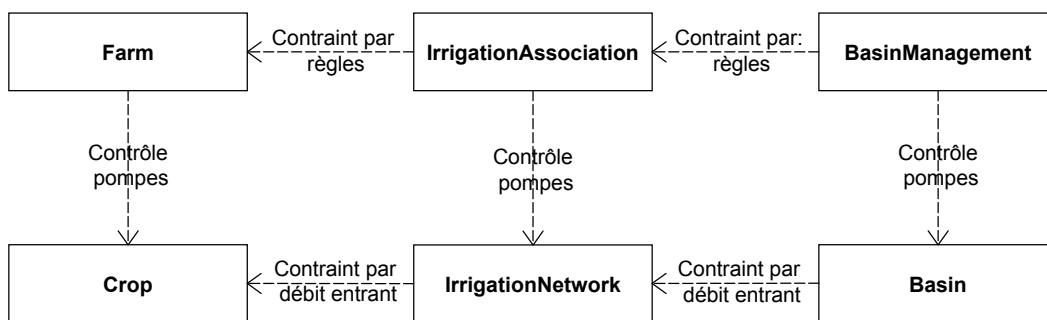


FIG. 45 – Diagramme fonctionnel global du modèle jouet.

Ce diagramme n'est pas temporel, il représente les relations fonctionnelles entre les structures de groupe

Une classification des structures de groupe (et donc des fonctions) du système apparaît : structures de gestion d'une unité fonctionnelle d'un côté, structures représentant les unités fonctionnelles gérées de l'autre.

2.2 Quels agents : lister les entités individuelles du système

L'étape suivante d'ORIGAMI est de lister les entités individuelles actives et passives du système, et de distinguer celles qui présentent un aspect spatial.

Entités individuelles actives Ce sont d'abord les entités sociales : les *agriculteurs* (agent **Farmer**) et la *CLE* (agent **CLE**). La *CLE* n'est pas un individu, mais puisque qu'on ne la considère qu'en tant qu'instance de gestion du bassin (on ne modélise pas la concertation), on peut la décrire comme une entité individuelle. L'association d'irrigants est par contre vue comme un groupe où ont lieu des communications, avec un président et des membres. Président et membre sont en fait des rôles du groupe association d'irrigants pris en charge par des agriculteurs. Ces agents sont essentiellement caractérisés par les séries de rôles qu'ils prendront en charge. On modélise le rafraîchissement des *séries climatiques* (débit entrant, pluie et évapotranspiration journalières) avec une entité **Climate**, qui est active, mais non spatiale (le système est suffisamment petit pour que le climat soit le même partout).

Entités individuelles passives Ce sont les *cultures* (agents **Plant** et **Maze**), ainsi que les *pompes* (agents **Pump**), les *parcelles* (agent **Plot**), la *rivière* (agent **River**) et la *conduite du réseau* (agent **Pipe**).

Les pompes des objets situés. Elles sont caractérisées par leur capacité et leur débit, et savent s'ouvrir et se fermer. Les **TerminalPump** sont les bornes des irrigants ; elles desservent un ensemble de parcelles. Les **HeadPump** sont les prises du réseau ; elles desservent une conduite.

Une plante est caractérisée par divers coefficients cultureux.

Les parcelles sont des agrégats composés d'une cellule³³. Elles sont caractérisées par leur position, la profondeur leur sol, ainsi que par leur réserve en eau.

Rivière et conduite sont des agrégats. Elles sont caractérisées par leurs connections et leur position. Elles savent accéder à leur débit en un point donné.

³³choix d'implémentation lié à l'architecture de Cormas permettant de ne pas typer les cellule

Le diagramme de classes 46 résume la hiérarchie des entités du modèle-jouet.

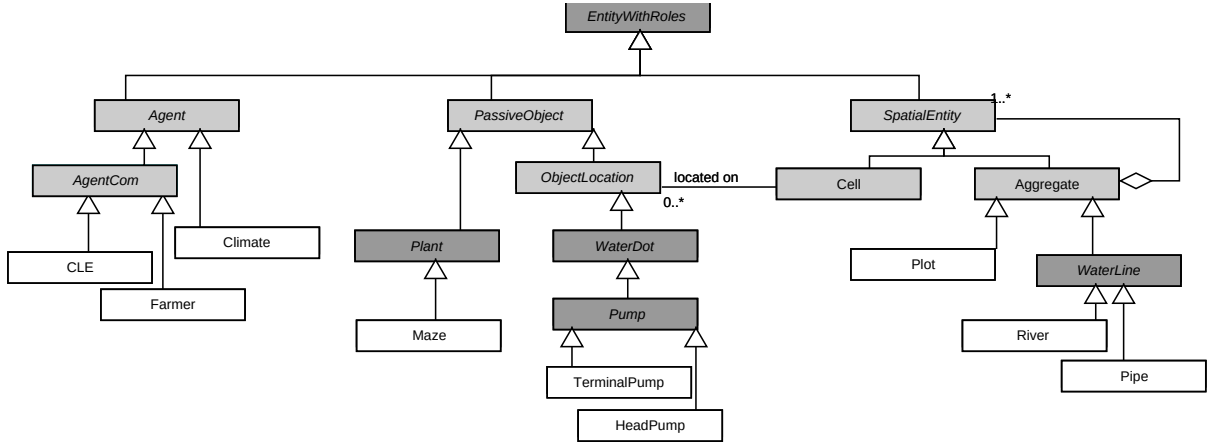


FIG. 46 – Diagramme des classes des entités individuelles du système. En gris, les entités génériques

2.3 Quels rôles : fonction des agents dans les groupes

La troisième étape du processus de modélisation consiste à nommer et caractériser les différents rôles qui définissent le comportement du modèle en croisant structures de groupe et agents précédemment déterminés dans les diagrammes « swimlane » d'ORIGAMI. On établit les diagrammes swimlane processus par processus.

2.3.1 Fonctions naturelles du système : circulation et transformation de l'eau

Circulation de l'eau Trois structures de groupe sont concernées par la propagation du débit dans le système (voir tableau 21) : **Basin**, **IrrigationNetwork** et **Crop**. Les agents prenant part au processus sont les entités passives et spatiales où passe de l'eau : **Climate** comme générateur de débit et de pluie, **River** et **Pipe** comme propagateurs de débit, **Pump** comme point de transfert de débit, et **Plot** comme réservoir d'eau. Groupes et entités constituent respectivement les colonnes et les lignes du diagramme swimlane 47.

Il faut maintenant déterminer quels sont les rôles définis dans chacune des structures de groupe. Ces rôles apparaîtront sur le diagramme 47 comme étiquettes au croisement des agents et des structures de groupe concernées.

On représente la circulation de l'eau dans le système comme la propagation instantanée d'un flux à travers un système d'arcs et de nœuds. Cette propagation arcs-nœuds est modélisée par les rôles, qui offrent ainsi un point de vue topologique sur le système. Les agents localisent eux les informations d'ordre géométrique.

Dans chacune des structures, le débit se propage à partir d'un rôle **EntryPoint** (pris en charge par le climat qui donne le débit entrant pour le groupe **Basin**) à travers des rôles **WaterBranch** (pris en charge par les entités linéaires **River** et **Pipe**), jusqu'à des rôles **ExitPoint** (pris en charge par les pompes). Chaque point de sortie d'un groupe d'un niveau agrégé est le point d'entrée du groupe d'un niveau plus élémentaire ³⁴. Dans les groupes **Crop**, le débit entrant est

³⁴on pourra aussi qualifier de niveau inférieur le niveau représentant les éléments les plus élémentaires, et de

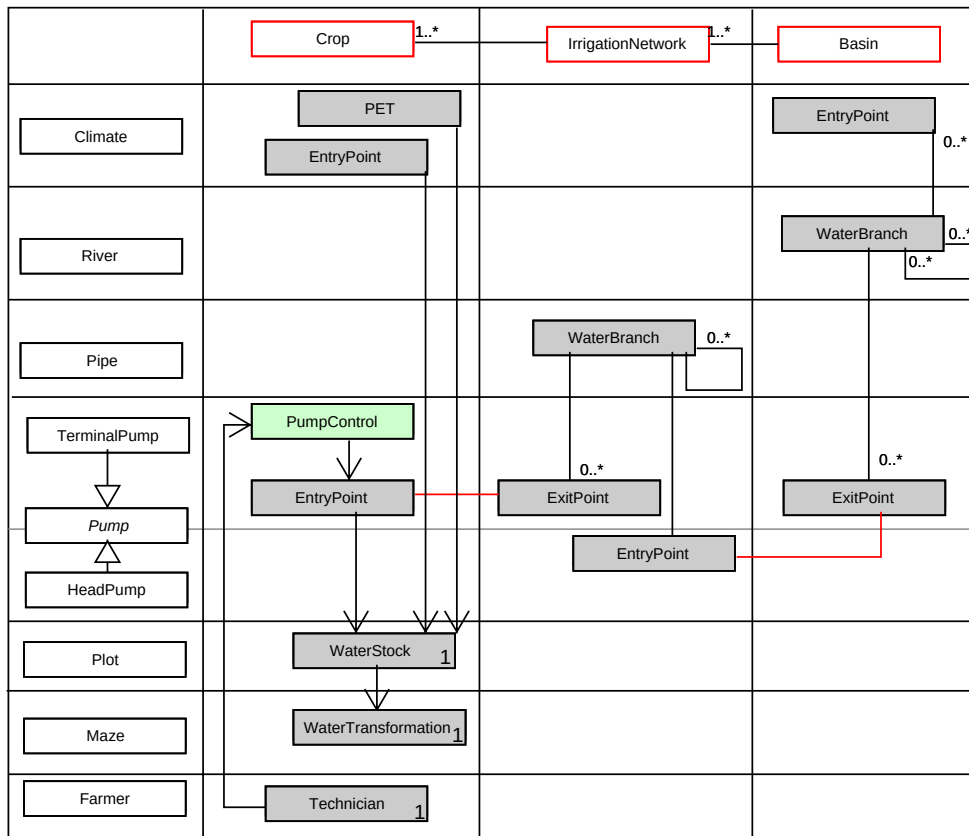


FIG. 47 – Diagramme swimlane des processus physique du modèle jouet

transformé en quantité d'eau et stocké par le rôle **WaterStock**, pris en charge par la parcelle. La quantité d'eau stockée est limitée par les caractéristiques de profondeur de sol de **Plot**. Tous les jours, l'évapotranspiration, représentée par le rôle **ETP** de **Climate** agit et déclenche le bilan hydrique de **WaterStock** (consommation d'une partie du stock) et le rafraîchissement du rendement de la plante par **WaterTransformation**, en fonction de l'eau disponible et des coefficients culturaux de la plante.

Les rôles sont locaux aux groupes. Par commodité de représentation, on pourra donc nommer de la même manière des rôles remplissant la même fonction symbolique dans des groupes différents, même si ces rôles sont différents.

Le processus de propagation de débit peut être déclenché par le rafraîchissement du débit entrant dans le système, mais aussi par l'ouverture ou la fermeture d'une pompe par un irrigant. On localise l'action d'irrigation dans les groupes **Crop**, où un agent **Farmer** prend en charge un rôle **Technician**. Le rôle **Technician** ne sait qu'actionner une pompe, la prise de décision est

supérieure celui qui représente les éléments plus agrégés : la parcelle est un niveau inférieur au réseau, qui est un niveau inférieur au bassin.

faite par un autre rôle de **Farmer**. Cette pompe est encapsulée dans les groupes **Crop** par un rôle **PumpControl**, qui modélise une interface permettant de contrôler la pompe.

Les rôles **Control** modélisent l'interface par laquelle un agent modifie les caractéristiques d'un objet. Ils encapsulent donc les paramètres contrôlables d'un objet dans le niveau concerné.

La pompe propage alors la demande de débit résultante à son rôle **ExitPoint** qui fait remonter cette demande jusqu'à la rivière par le circuit inverse de celui où le débit se propage.

La pompe joue un rôle central dans les processus physiques en faisant le lien entre les différentes échelles, tour à tour entrée, sortie ou objet contrôlé d'un niveau.

2.3.2 Fonctions d'usage de la ressource : allocation de l'eau

On commencera par décrire l'allocation de l'eau au niveau de l'exploitation pour montrer comment les différents niveaux de gestion sont gérés avec AGR.

Allocation de l'eau au niveau de l'exploitation Le rôle **Manager** pris en charge par **Farmer** encapsule les règles de décision concernant la gestion de l'irrigation.

Manager a accès aux caractéristiques des différents objets de son exploitation à travers les rôles **PlantObservation**, **PlotObservation** et **PumpObservation**, qui fonctionnent à la manière d'instruments de mesure sur les objets par lesquels ils sont pris en charge. Ils donnent dans cette version du modèle une information exacte sur ces objets.

Les rôles **Observation** modélisent les caractéristiques « visibles » d'une entité. L'information qu'ils donnent peut être exacte ou erronée. Si plusieurs types d'observation sont possibles, il peut y avoir plusieurs rôles observation pour l'entité observée.

Quand le rôle **Manager** a pris les décisions concernant l'allocation de l'eau (établissement ou rafraîchissement d'un calendrier d'irrigation), le rôle **Technician** est chargé de mettre en œuvre ces décisions en programmant les actions d'irrigation.

Le diagramme swimlane de ce processus est donnée figure 48.

Les différentes phases de comportement des agriculteurs Le diagramme d'état 41 révélait 4 phases successives durant une simulation de GibiDrome : une *phase de semis* durant laquelle sont mis en œuvre les choix d'assolement, une *phase de culture sèche* durant laquelle se décide la date de lancement de la saison d'irrigation, une *phase d'irrigation*, où alternent éventuellement des périodes de crise, et enfin une *phase de récolte*, où l'irrigation est arrêtée et les parcelles à maturité récoltées. Chacune de ces phases correspond à un type de comportement particulier de l'agriculteur. Ces différentes phases seront modélisées par différents rôles.

Ces différents rôles sont présentés sur le diagramme des classes 49 : le rôle **Manager**, apparu dans les diagrammes swimlane, se spécialise en différents rôles potentiels dont la prise en charge dépend du moment de la simulation.

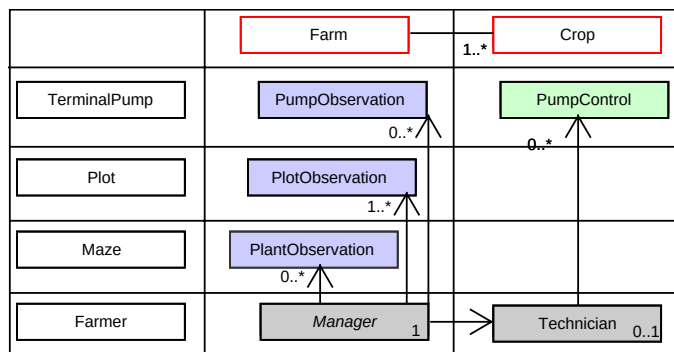


FIG. 48 – Diagramme swimlane de l'allocation de l'eau dans les exploitations

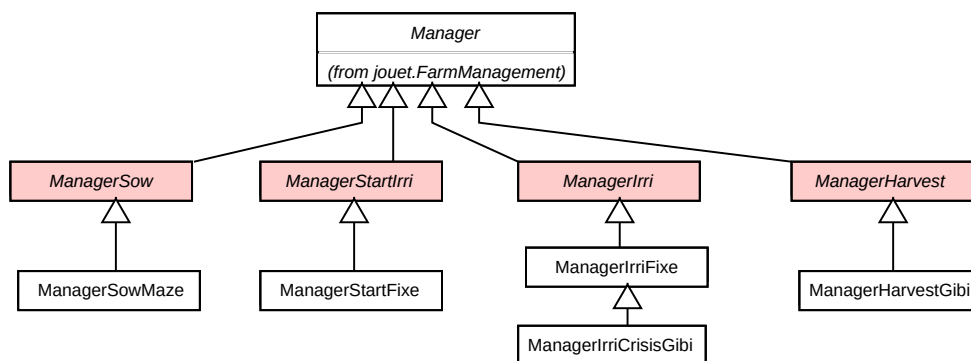


FIG. 49 – Diagramme des classes du rôle **Manager**. Les rôles grisés sont les rôles génériques pour chaque type de comportement.

Pour chacun des types de comportement, un rôle générique a été créé, et les comportements particuliers propres à GibiDrome constituent des sous-classes de ces rôles génériques. Les différents types de rôles **Manager** pourront par la suite être encore spécialisés pour représenter différentes modalités pour un type de comportement. La prise en charge de tel ou tel rôle potentiel ne dépendra alors plus seulement du moment de la simulation, mais aussi du « caractère » de l'agent.

Utilisation des rôles sociaux : les rôles permettent de modéliser un élément de comportement. Dans le modèle jouet, les rôles sont utilisés pour modéliser les différentes phases de prise de décision de l'agriculteur. Dans des modèles ultérieurs, différentes modalités d'un même type de rôle pourront être utilisées pour représenter des comportements hétérogènes ou changeants au cours de la simulation.

Les niveaux de gestion collectifs Les deux autres niveaux de gestion (réseau d'irrigation, représenté par la structure de groupe **IrrigationAssociation**, et bassin, représenté par la structure de groupe **BasinManagement**) fonctionnent de manière similaire, avec un rôle **Manager**

et des rôles **Observation** qui fournissent les indicateurs des objets du niveau et des rôles **Control** qui permettent de modifier des paramètres contrôlables de ces objets.

Le caractère collectif de ces niveaux de gestion se traduit par l'apparition de rôles représentant les usagers :

- au niveau de l'association d'irrigants, le rôle **Manager** représente le président du réseau, qui est responsable de la gestion de la prise d'entrée du réseau (rôle **PumpObservation**). Les usagers desservis par cette prise sont représentés par des rôles **User**. Ils doivent respecter les règles collectives émises par le président ;
- au niveau du bassin, le rôle **Manager**, tenu par la CLE, représente le gestionnaire du bassin. La rivière apparaît à travers le rôle **RiverObservation**, qui modélise une station d'observation. Il y a un usager (rôle **User**) desservi par la rivière. C'est le président de réseau. Il doit respecter les règles collectives émises par la CLE.

Les prises d'eau des usagers des niveaux de gestion collectifs sont visibles depuis ces niveaux à travers des rôles **PumpObservationMember**.

Les objets observés depuis un niveau de gestion collectif sont les objets gérés par le gestionnaire de ce niveau, mais aussi les objets gérés par ses usagers. Les premiers sont représentés par des rôles de type **ObservationManagerRole**, les seconds par des rôles de type **ObservationMemberRole**. Ces deux types de rôles encapsulent les propriétés des objets observables par le **Manager** du niveau de gestion.

Les **User** d'un niveau de gestion collectif sont toujours **Manager** d'un niveau de gestion plus élémentaire.

Interactions entre les différents niveaux de gestion La communication à l'intérieur d'un groupe se fait par envoi d'influences. Chaque groupe d'un niveau agrégé définit des règles collectives, qu'il transmet en début de simulation à ses usagers (hypothèse que les règles ont été négociées, et que les gestionnaires peuvent planifier leur gestion en fonction du risque). Quand il y a passage en crise, l'information descend les niveaux, passant des gestionnaires aux usagers. Quand il reçoit l'information de crise, chaque gestionnaire peut alors mettre en œuvre les règles collectives qu'il avait reçues des niveaux plus agrégés.

Le diagramme swimlane 50 représente l'ensemble des niveaux de gestion du modèle-jouet.

2.3.3 Vue d'ensemble : rôles et liens entre les groupes

La figure 51 présente dans son entier le diagramme swimlane du modèle-jouet.

La vision globale de la structure AGR du modèle permet de revenir sur la manière dont s'expriment les liens entre les structures de groupe. On peut vérifier que ces liens entre structures de groupe qui apparaissent sur le diagramme fonctionnel global 45 s'expriment tous dans le diagramme swimlane 51, où ils apparaissent sous la forme de relations horizontales entre les rôles :

- les liens entre les structures de groupe représentant les niveaux de gestion du système (liens « contrainte : règles » du diagramme 45) sont portés par les agents **Farmer**, qui transmettent les information concernant les règles de gestion collective de leur rôle **User** à leur rôle **Manager** ;

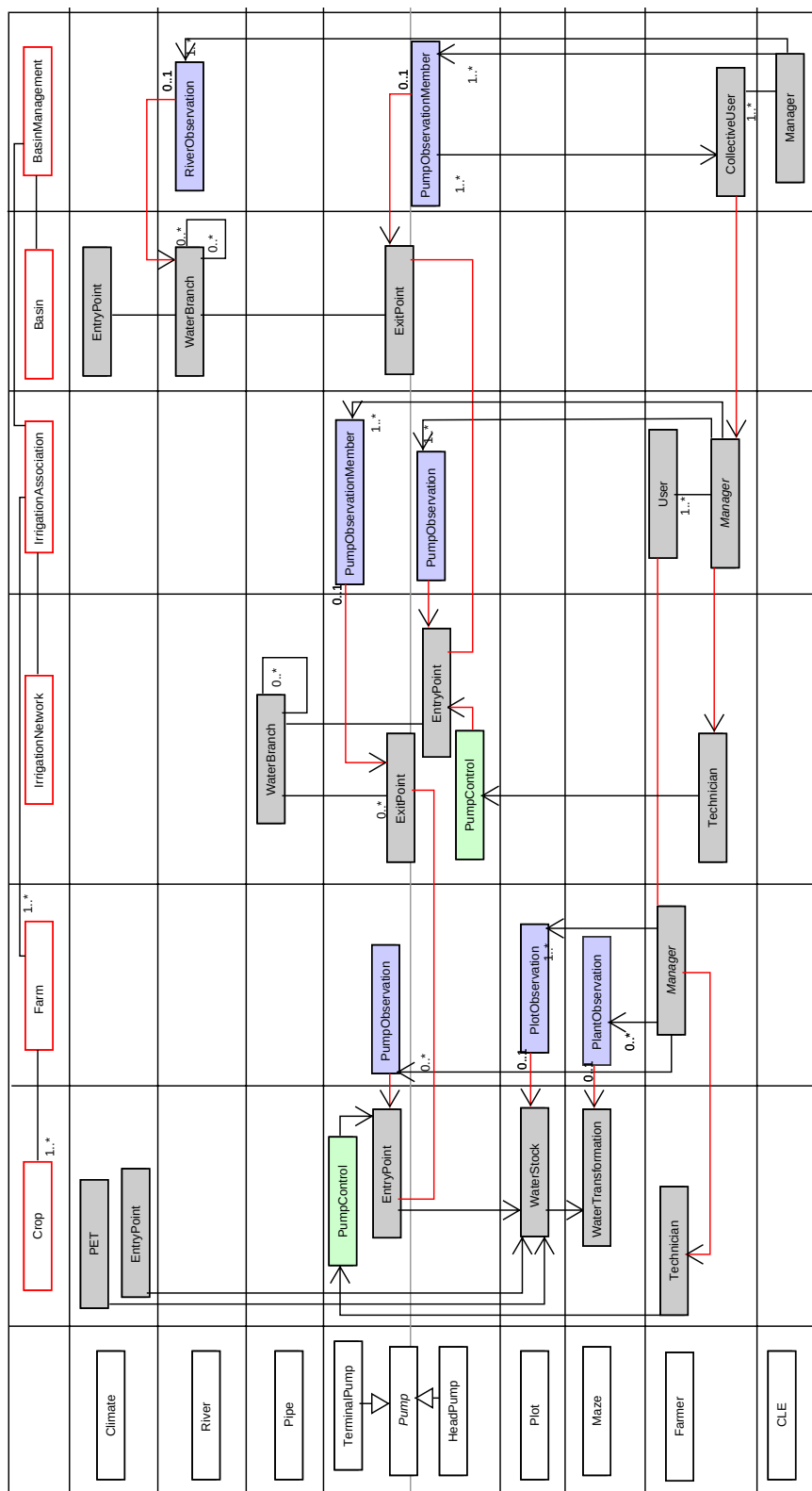


FIG. 51 – Diagramme swimlane du modèle jouet

2.4 Aspects dynamiques

2.4.1 Vue d'ensemble

Le diagramme 52 est le pendant dynamique du diagramme 45 : il donne une vue d'ensemble des différents processus qui font la dynamique du système.

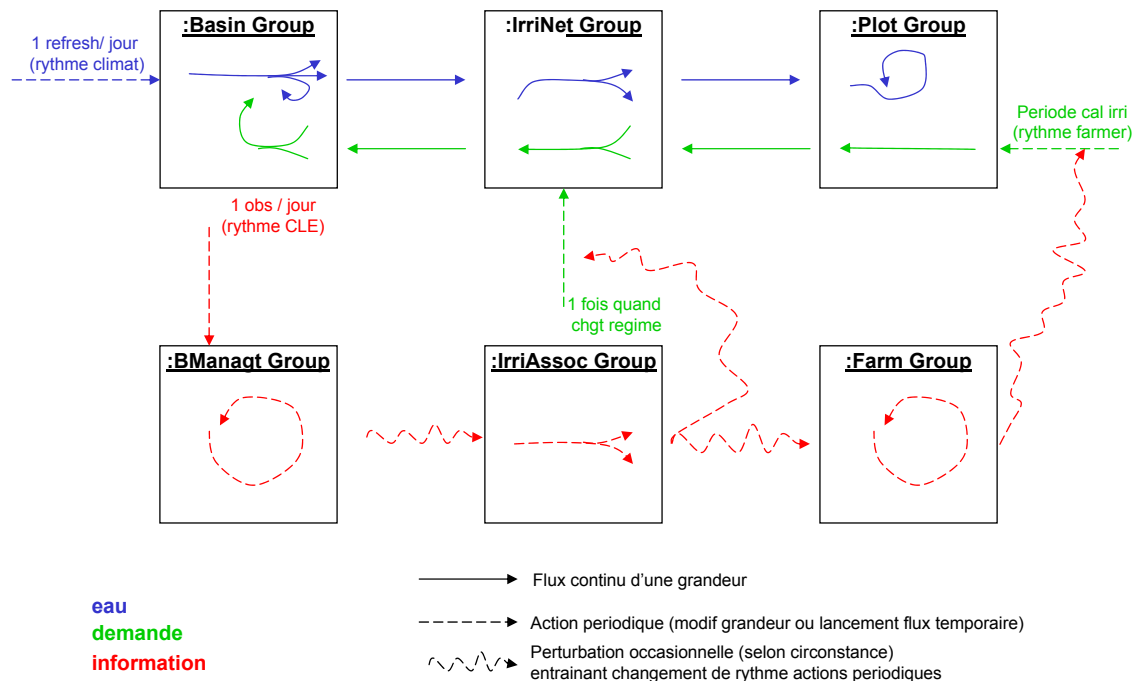


FIG. 52 – Diagramme dynamique global des différents flux du modèle

Les processus physiques sont définis dans les structures de groupe décrivant les dynamiques hydrauliques, en haut du diagramme : d'une part, chaque jour un nouveau débit entrant est envoyé dans le système et propagé de l'amont vers l'aval à travers les réseaux modélisés par chacune des structures (de gauche à droite sur le diagramme) ; d'autre part, quand une pompe est actionnée dans une parcelle, une nouvelle demande est envoyée dans le système et propagée de l'aval vers l'amont, jusqu'à la rivière (de droite à gauche sur le diagramme), et le débit correspondant est pris à la rivière et renvoyé vers la pompe (boucle dans le groupe **Basin**) (voir 2.4.2).

Les processus sociaux sont définis dans les structures de groupe de gestion, en bas du diagramme : chaque jour, la CLE observe le débit de la rivière et signale aux usagers les passages en état de crise ; si ces usagers sont collectifs, ils signalent à leur tour à leurs propres usagers ces passages en état de crise (de gauche à droite sur le diagramme). D'autre part, chaque agriculteur doit décider en début de période d'irrigation, ainsi qu'à chaque passage en état de crise d'un calendrier d'irrigation qui sera appliqué aux parcelles (ouverture et fermeture des pompes des groupes **Crop**). Enfin, durant la saison, chaque agriculteur doit décider successivement de son semis, du lancement et du déroulement de son irrigation, et de sa récolte (voir 2.4.3).

2.4.2 Processus physiques

Vues sur les processus Le but est de tracer le déroulement des différents processus physiques du modèle. On commence par lister dans le tableau 22 les différents événements déclencheurs des processus physiques du modèle-jouet.

Événement déclencheur Evi : étiquette pour le ième événement	Ordonnancement	Déclencheur	Conséquences
Ev1. Rafraîchissement du débit entrant dans le bassin	tous les jours, début de journée	Climate	Propagation du nouveau débit à travers les différents groupes physiques
Ev2. Rafraîchissement de la pluie	tous les jours, heure aléatoire	Climate	Ajout dans le stock d'eau des parcelles
Ev3. Rafraîchissement de l'ETP	tous les jours, fin de journée	Climate	Bilan hydrique des parcelles
Ev4. Actionnement d'une pompe	selon calendriers d'irrigation	Technician	Propagation d'un appel d'eau vers le bassin, retour d'un débit

TAB. 22 – Déclenchement des processus physiques du modèle jouet.

Afin de préfigurer la mise en œuvre de ces processus, on dessine un diagramme dynamique local qui représente les agents et les structures de groupe concernés pour chacun de ces processus. On y retrouve les événements déclencheurs du tableau 22.

Ainsi, le diagramme 53 montre comment le débit entrant se propage en descendant les niveaux spatiaux à travers les pompes qui font le lien (sortie d'un niveau et entrée du niveau suivant).

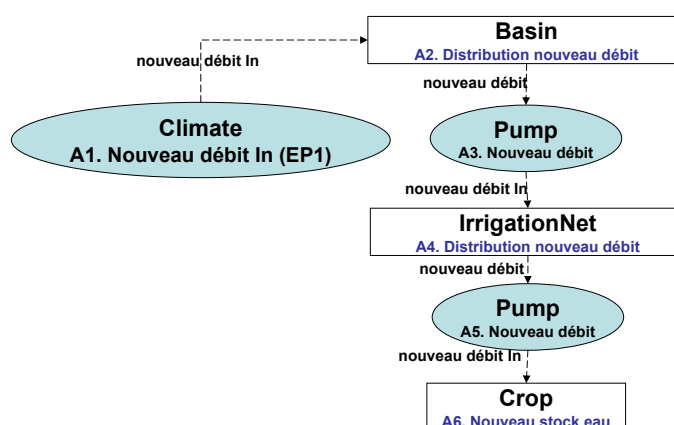


FIG. 53 – Diagramme dynamique local : rafraîchissement du débit entrant dans le bassin.

Les diagrammes 54 montrent comment la pluie et l'évapotranspiration vont agir directement au niveau de la parcelle.

Enfin, le diagramme 55 montre comment l'ouverture ou la fermeture d'une pompe provoque la remontée d'un appel d'eau jusqu'au niveau du bassin. Le bassin répond à cet appel d'eau en rafraîchissant la propagation de son débit conformément aux nouvelles demandes.

Cette étape constitue une base pour l'établissement de diagrammes dynamiques plus proches de l'implémentation (diagrammes de séquence et d'activité).

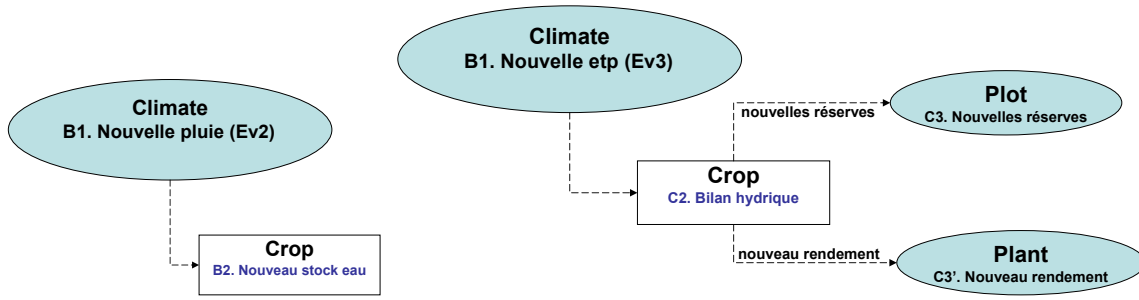


FIG. 54 – Diagramme dynamique local : rafraîchissement de la pluie et de l'évapotranspiration.

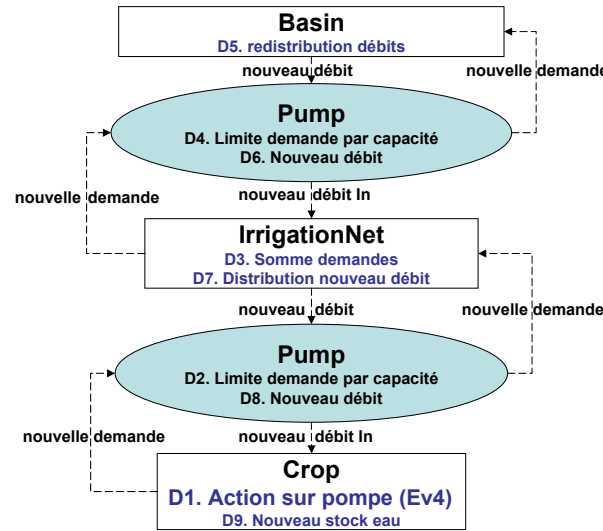


FIG. 55 – Diagramme dynamique local : actionnement d'une pompe.

Vues centrées sur les structures de groupe Les role models replacent l'ensemble des processus d'un modèle dans une structure de groupe dont ils explicitent le contenu des différents rôles. Ils offrent une description du squelette des différents éléments du modèle avant l'implémentation.

Le role model du groupe **IrrigationNetwork** est donné ici pour l'exemple (figure 56). On peut y suivre les propagations de débits et de demandes évoquées au 2.3.1 lors de la description des diagrammes swimlane, ainsi que les relations entre rôles qui y apparaissent. On y retrouve les éléments numérotés des diagrammes dynamiques locaux. Ainsi, on peut tracer les conséquences du message D12 du diagramme 55 : la modification du débit de la pompe entraîne la diffusion de la modification de sorties en sorties jusqu'à parvenir à l'ExitPoint qui va modifier le débit de sa pompe (message D15 du diagramme 55).

Il est à noter que les demandes ne sont pas forcément égales du côté **EntryPoint** d'une pompe et de son côté **ExitPoint** : du côté **EntryPoint**, la demande est égale à la demande accumulée du réseau alimenté par la pompe. Du côté **ExitPoint**, la demande est la demande visible depuis le réseau où s'alimente la pompe. Elle est donc limitée par la capacité de celle-ci.

Les autres role models du modèle-jouet figurent dans l'annexe E.

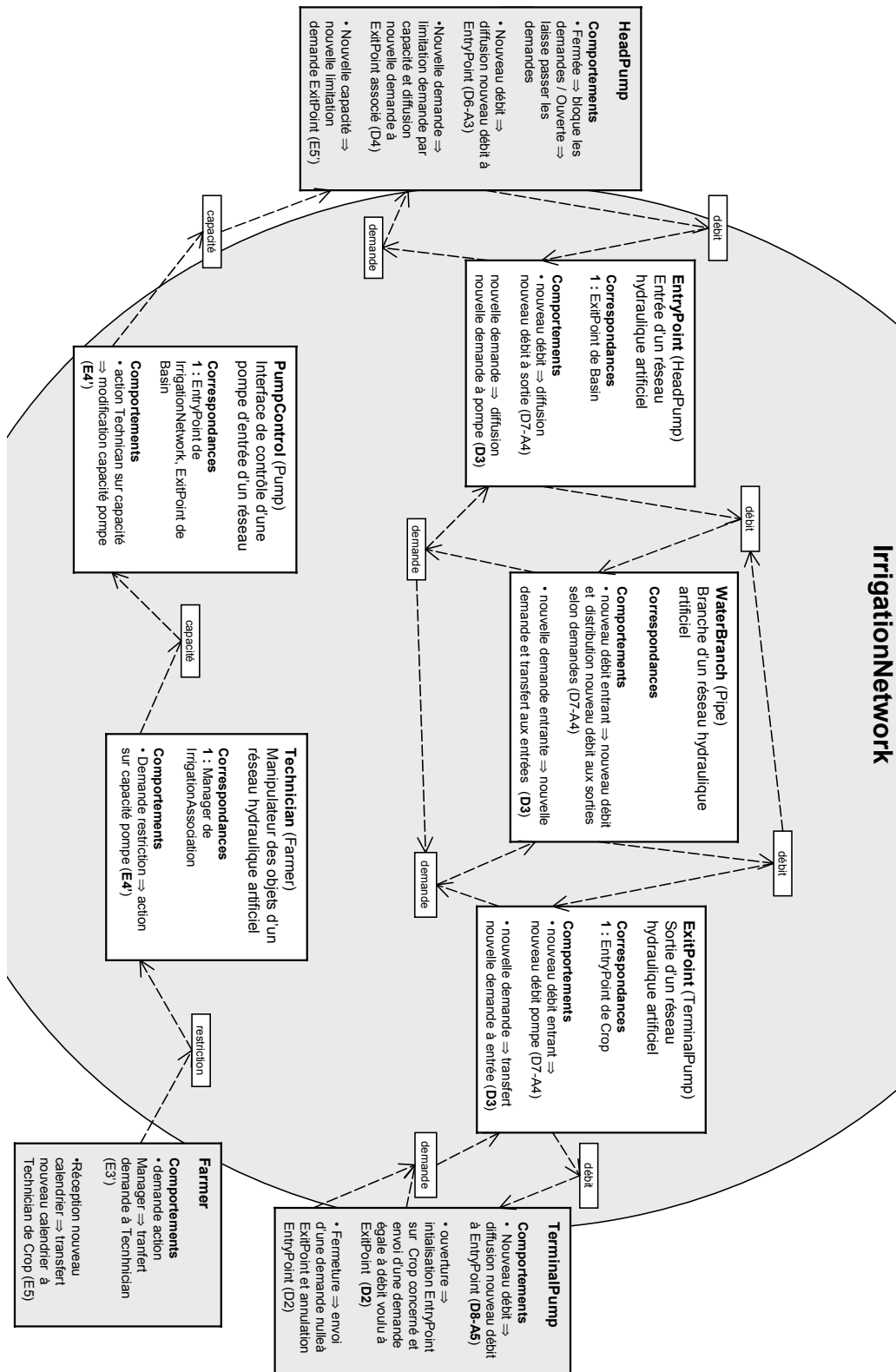


FIG. 56 – Role model du groupe IrrigationNetwork. Les numéros dans les rôles et les agents référencent les activités qu'on pourra retrouver sur les diagrammes d'activité

2.4.3 Processus sociaux

Les différentes phases de la simulation Jusqu'à présent, seuls des rôles « statiques », pris en charge durant toute la simulation, ont été introduits. Les différents rôles **Manager** ne sont eux pris en charge que de manière transitoire. Les événements menant à la prise en charge ou à l'abandon des rôles **Manager** sont décrits dans le tableau 23. Les événements sont des signaux reçus ou perçus par l'agent **Farmer**, les conditions de garde (entre crochets) traduisent les vérifications menées par l'agent avant de décider du changement de rôle.

Rôle	Prise en charge (ERi+ : étiquette pour l'événement entraînant la prise en charge du ième rôle)	Abandon (ERi- : étiquette pour l'événement entraînant l'abandon du ième rôle)
ManagerSow : assolement et programmation des semis	ER1+. Initialisation de la simulation	ER1-. Toutes parcelles semées
ManagerStartIrri : programmation du lancement de l'irrigation	ER2+. Semis de la 1ère parcelle	ER2-. Lancement d'une irrigation
ManagerIrriGibi : programmation de l'irrigation	ER3+. Lancement d'une irrigation ou fin d'une crise	ER3-. Fin de l'irrigation ou début de la crise
ManagerIrriCrisisGibi : programmation de l'irrigation en période de crise	ER4+. début d'une crise	ER4-. Fin d'une crise ou Fin de l'irrigation
ManagerHarvest : programmation de la récolte	ER5+. A la fin de l'irrigation	ER5. Fin de la simulation

TAB. 23 – Prise en charge et abandon des rôles sociaux du modèle jouet. Dans le modèle jouet, il y a un seul type de culture, donc un seul lancement et un seul arrêt de l'irrigation.

Les différents processus sociaux, hors phase d'irrigation sont alors listés dans le tableau 24.

Événement déclencheur Evi : étiquette pour le ième événement	Ordonnancement	Déclencheur	Conséquences
Ev5. Programmation semis	initialisation	ManagerSow	Actions de semis programmées
Ev6. Semis	selon programmation ManagerSow	Technician	Semis parcelles et programmation fin irrigation
Ev7. Programmation lancement irrigation au 15 juin	initialisation rôle	ManagerStartFixe	
Ev8. Programmation récolte	initialisation du rôle	ManagerHarvest	

TAB. 24 – Les stimulations des processus sociaux hors phase d'irrigation du modèle jouet.

Durant la phase d'irrigation Les processus sociaux sont issus des stimulations suivantes (voir diagrammes de la section D.3 de l'annexe D) :

- observation de la rivière par la CLE ;
- activation des règles collectives lors des changements de niveau de crise ;
- choix d'irrigation.

Le tableau des stimulations 25 détaille ces processus.

Le diagramme 57 décrit la circulation de l'information à travers les différents groupes lors d'un changement de niveau de crise. C'est également ce circuit qu'empruntent les informations décrivant les règles collectives de gestion envoyées en début de simulation.

Événement déclencheur Evi : étiquette pour le ième événement	Ordonnancement	Déclencheur	Conséquences
Ev9. Envoi des règles collectives de gestion aux usagers	Initialisation	Managers des niveaux de gestion collectifs	Ces informations seront prises en compte lors des passage en crise, ou lors de la programmation des actions d'irrigation des usagers
Ev10. Vérification du niveau de la rivière	Tous les jours à midi	Manager de BasinManagement	Passage en crise ou retour à la normale selon niveau de la rivière
Ev11. Programmation du calendrier d'irrigation	Au début de la phase d'irrigation, et à chaque changement de niveau de crise	ManagerIrri	Programmation des activités périodiques d'irrigation
Ev12. Changement des doses d'irrigation	Au 10 juillet et au 15 août	ManagerIrri	Reprogrammation des activités périodiques d'irrigation

TAB. 25 – Les stimulations des processus de la phase d'irrigation

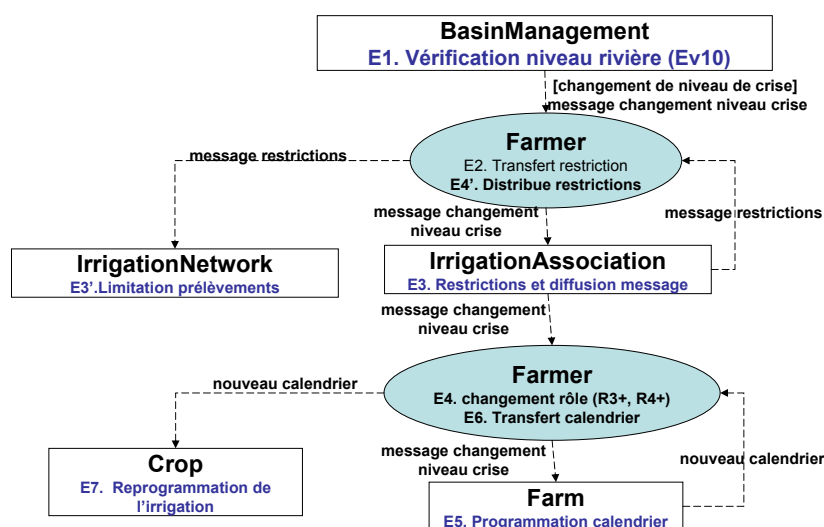


FIG. 57 – Diagramme dynamique local : observation de la rivière changement de niveau de crise

On voit que les changements de niveau de crise se répercutent sur les groupes représentant les unités fonctionnelles, et peuvent donc aboutir au déclenchement des processus physiques déjà décrits, mais qu'on ne représentera pas sur les diagrammes.

Enfin, la dernière étape de la phase de conception est d'établir les role models sociaux, que l'on trouvera dans l'annexe E. On ne construit pas de diagramme de composition des rôles pour le modèle-jouet car pour présenter les transition entre rôles lors des différentes phases de la campagne, les diagrammes de séquence sont plus explicites (voir en annexe).

3 Quelques points de mise en œuvre du modèle

Les diagrammes et tableaux de la section 2 donnent une description complète de la structure du modèle et posent les bases du fonctionnement de ses processus. La description systématique de la mise en œuvre du modèle-jouet se trouve dans l'annexe E. Seuls les points de mise en œuvre soulevant des questions touchant à l'utilisation concrète du formalisme AGR sont présentés ici.

3.1 Règles collectives et règles individuelles

On a mis à profit le formalisme AGR pour différencier règles collectives, règles de comportement individuelles, et choix de ces règles de comportement.

Représentation des règles collectives : les contraintes Les règles collectives sont modélisées par des objets de type **Constraint**. Une contrainte est caractérisée par les variables :

- **access** : la pompe sur laquelle la règle porte ;
- **crisis** : le niveau de crise auquel la contrainte est active. Dans le modèle jouet, **crisis** est donc égal à 0 (situation normale), 1 ou 2 ;
- **source** : le niveau d'organisation dans lequel la règle est définie. Ainsi, pour les règles collectives portant sur les usagers de la rivière (définies par la CLE), **source** est une instance de **BasinManagement**, alors que pour les règles collectives portant sur les usagers des réseaux (et internes aux réseaux), **source** est une instance de **IrrigationAssociation**.
- **type** est un descripteur du type de contrainte représentée par la règle ;
- **args** sont les éventuels arguments venant compléter la description de la règle.

Les contraintes sont définies au niveau des groupes et transmises aux usagers des accès sur lesquelles elles portent en début de simulation.

Chaque **User** d'un groupe d'un niveau agrégé est **Manager** d'un groupe d'un niveau plus élémentaire. C'est ce rôle **Manager** qui est chargé de mettre en œuvre les contraintes dans le niveau dont il est responsable. Les rôles **Manager** doivent donc être capables de comprendre les descripteurs des contraintes qu'ils reçoivent.

Dans les niveaux où elles sont mises en œuvre, les contraintes sont associées aux accès concernés (rôles **PumpObservation**). Ainsi, un agriculteur possédant des pompes dans plusieurs réseaux recevra indépendamment pour chacune de ses pompes les contraintes provenant du réseau auquel elle appartient.

Les contraintes définies dans le modèle-jouet sont listées dans le tableau 26.

Règle représentée	type	args
Restriction des prélèvements en valeur absolue : les prélèvements sur l'accès concerné ne doivent pas excéder un débit de v	flowLimitFixed	valeur : v
Restriction des prélèvements en valeur relative : les prélèvements sur l'accès concerné ne doivent pas excéder une fraction égale à v du niveau de référence nivRef , affecté ou pas par la prise en compte de ressources complémentaire (pC , voir tableau 20)	flowLimitRelative	valeur : $0 \leq v \leq 1$ niveau référence : nivRef = capacite / OSMaze / 10Maze partageCrise : pC = prelevements / apports
Jours d'arrêt à respecter sur l'accès concerné : n jours consécutifs par périodes de p jours, à partir du jour i de la période	tourEau	période tour (jours) : p index premier jour arrêt dans période : $1 \leq i \leq p$ nombres jours arrêt : $0 \leq n \leq (p-1)$

TAB. 26 – Contraintes du modèle jouet

Règles individuelles : mise en œuvre des contraintes au niveau des exploitations

Les contraintes sont mises en œuvre par les rôles **Manager** à chaque fois qu'ils doivent définir leur calendrier d'irrigation : au début de la phase d'irrigation, et à chaque changement de niveau de crise.

À chacune de leurs pompes (rôles **PumpObservation**), les **Manager** vont demander les contraintes correspondant au niveau de crise en cours (cette information est entièrement portée par les **PumpObservation**) ; puis ils compilent ces contraintes en exécutant une méthode qui leur est propre, et qui caractérise leur comportement face aux contraintes exogènes au niveau.

Pour les gestionnaires des réseaux d'irrigation, cette mise en œuvre se traduit par une action directe sur la prise d'entrée du réseau.

Le calendrier d'irrigation Les **ManagerIrri** sont en charge de la gestion de l'irrigation de l'exploitation représentée par leur groupe **Farm**. Pour cela, ils compilent les contraintes issues des niveaux supérieurs, et stockent le résultat de leur décision dans un objet de type **Calendar**. Les **Calendar** sont des dictionnaires, associant à chacune des parcelles de groupe (rôles **PlotObservation**) une structure de données (**CalendarEvent**) décrivant les différents paramètres de l'irrigation de cette parcelle : pompe utilisée, fréquence, durée et débit d'irrigation, ainsi que son jour (index dans la période définie par la fréquence) et son heure d'utilisation.

La gestion individuelle de l'irrigation dans le modèle-jouet se fait avec l'appui d'objets **Calendar**, représentant des calendriers d'irrigation. Cela implique l'hypothèse que les irrigants planifient leur irrigation.

Il serait bien sûr possible de créer une gestion sans planification avec d'autres rôles **ManagerIrri** et d'autres rôles **Technician**.

Le diagramme 58 expose les éléments utilisés par les **ManagerIrri** pour leurs calculs de calendriers d'irrigation :

- **plantsIrriRef** est un dictionnaire qui associe à chaque type de plante cultivée par l'irrigant la période d'irrigation, et la quantité d'eau, en mm, à amener durant cette période ;
- **calendarRef** est un **Calendar** qui décrit le calendrier d'irrigation « idéal » du **ManagerIrri**. Dans le modèle-jouet, **calendarRef** est décrit à la main, pour reproduire l'irrigation de GibiDrome ;
- **myPumps** donne accès aux pompes du groupes, et donc aux contraintes portées par ces pompes ;
- **calendar** enfin est le calendrier d'irrigation résultant de la compilation des différents paramètres précédents.

calendar est calculé quand le rôle **ManagerIrri** s'initialise, puis à nouveau à chaque changement dans les contraintes, ou dans **plantsIrriRef**. La méthode de calcul est propre au rôle **ManagerIrri**. Dans le modèle-jouet, celui-ci prend toujours comme point de départ le **calendar** en cours puis applique les modifications dictées par les contraintes (voir paragraphe suivant pour plus de détails). Il faut donc toujours définir une contrainte de « retour à la normale » au niveau 0 pour pouvoir revenir à une situation hors restrictions. **plantsIrriRef** et **calendarRef** donnent donc les caractéristiques de l'irrigation « optimales », hors contraintes, propres au **ManagerIrri**, alors que **myPumps** donne accès aux contraintes issues

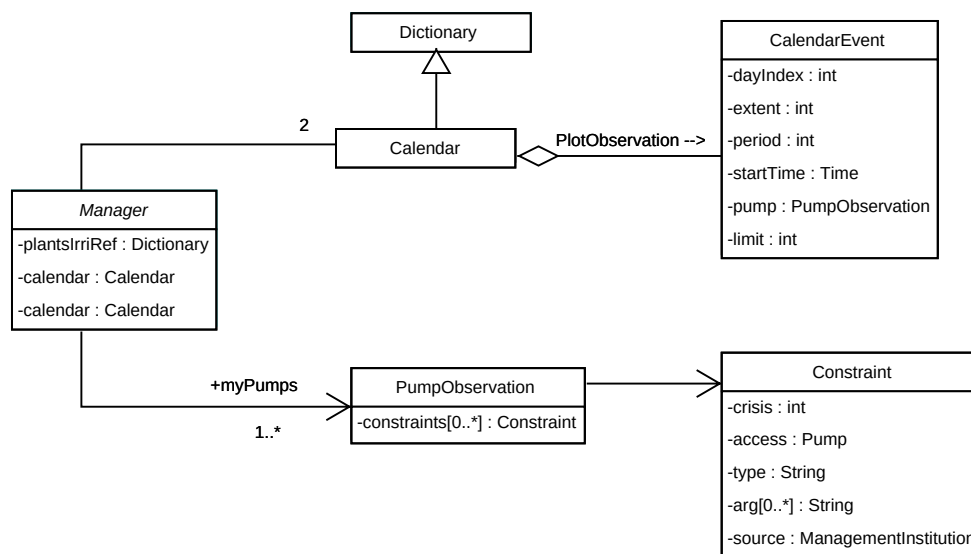


FIG. 58 – Classes utilisées pour la mise en œuvre des règles collectives d’irrigation

de niveaux supérieurs, et que `calendar` décrit l’irrigation réellement pratiquée, résultant de la compilation par le `ManagerIrri` de ses caractéristiques et des contraintes qu’il subit.

Les règles collectives de gestion de l’eau sont modélisées par des objet de type `Constraint`, définis au niveau des groupes sur lesquels portent ces règles.

Leur mise en œuvre est effectuée par les rôles `Manager`. Au niveau de l’exploitation cette mise en œuvre se traduit par l’établissement d’un calendrier d’irrigation (objet de type `Calendar`).

Exécution du calendrier d’irrigation Quand une modification du calendrier `calendar` a lieu, elle est automatiquement signalée au rôle `Technician` concerné, qui reporte ces modifications sur la programmation de ses actions d’irrigation. Les modifications ne peuvent toutefois s’appliquer aux irrigations en cours : si une parcelle concernée par la modification est en cours d’irrigation, la modification concernant cette parcelle est reportée à la fin de l’irrigation.

Choix des règles individuelles : changement de rôle Dans GibiDrome, les irrigants suivent un comportement différent en situation de crise et en situation normale. En situation de crise, ils irriguent le dimanche leur parcelle la plus sèche. Ce changement de comportement a été modélisé dans le modèle-jouet par 2 rôles différents : un rôle `ManagerIrriFixe`, qui suit le comportement décrit jusqu’à présent, et un rôle `ManagerIrriCrisisGibi` qui, en plus, irrigue tous les dimanches sa parcelle la plus sèche. On a recours à deux rôles différents parce que les deux comportements présentent des méthodes de calcul de l’irrigation différentes.

Dans le groupe `IrrigationAssociation`, deux types de rôles `Manager` sont à disposition : `ManagerFlow` réagit aux contraintes issue du bassin en réduisant directement la capacité de la borne d’entrée du réseau, sans rien demander aux usagers ; `ManagerTourEau` impose un tour d’eau à

ses usagers. Il ne réagit donc aux contraintes issues du bassin qu'en début de simulation, en envoyant à ses usagers des contraintes de type `tourEau`.

Interprétation des contraintes Les réactions des rôles `Manager` du modèle-jouet aux contraintes qu'ils sont susceptibles de recevoir sont présentées dans le tableau 27.

Type Contrainte	ManagerIrri (groupe Farm)	Manager (groupe IrrigationAssociation)	Manager (groupe BassinManagement)
<code>flowLimitFixed</code>	réduit capacité à <code>v</code> dans <code>calendar</code>	demande à <code>Technician</code> de réduire capacité à <code>v</code>	NC
<code>flowLimitRelative</code>	réduit capacité dans <code>calendar</code> à : si <code>nivRef = capacite</code> , <code>v*capacite</code> ; si <code>nivRef = 08Mais</code> , <code>v*0.8*besoinsMais</code> ; si <code>nivRef = 10Mais</code> , <code>v*besoinsMais</code>	demande à <code>Technician</code> de réduire capacité accès concerné selon les paramètres (voir tableau 1, annexe D)	NC
<code>tourEau</code>	retire de <code>calendar</code> les <code>CalendarEvent</code> correspondant aux jours d'arrêt. Si <code>p</code> $\neq$ fréquence <code>CalendarEvent</code> , tous les <code>p</code> , <code>calendar</code> est remis à <code>calendarRef</code> et l'opération est répétée. Si <code>i</code> n'est pas entier, les <code>CalendarEvent</code> correspondant à la partie entière de <code>i</code> sont retirés, et le <code>CalendarEvent</code> du jour suivant a sa capacité réduite selon la partie fractionnelle de <code>i</code>	NC	NC

TAB. 27 – Interprétation des contraintes du modèle jouet (voir tableau 26). NC signifie que le rôle n'est pas concerné pas la contrainte. L'action s'applique toujours à l'accès désigné dans la variable `access` de la contrainte

Les contraintes permettent de modéliser des règles exogènes au niveau, imposées par des niveaux supérieurs plus agrégés.
Les règles endogènes au niveau, reflétant les différentes manières de gérer sont encapsulées dans des rôles `Manager` différents.
Le choix de ces règles endogènes est donc du ressort de l'agent, qui choisit les rôles qu'il doit mettre en œuvre

3.2 Gestion des rôles : cas où un agent prend part à plusieurs instances d'un même groupe

Il y a dans le modèle jouet six instances de `Crop` (1 pour chaque parcelle) associées à chaque instance de `Farm`. Or chaque `Farm` est associée à une seule pompe et à un seul agriculteur, qui interviennent dans chacun des `Crop`. Plusieurs cas de figures et plusieurs solutions existent :

- l'agent prend en charge simultanément un rôle permanent dans chacun des 6 groupes. C'est la solution adoptée pour le rôle `PumpControl` de `Pump`. `PumpControl` peut être considéré comme la représentation d'une vanne présente sur chaque parcelle, et plusieurs vannes peuvent être attribuées à une même pompe. Il peut donc y avoir fractionnement de l'identité de l'agent dans les différents rôles ;

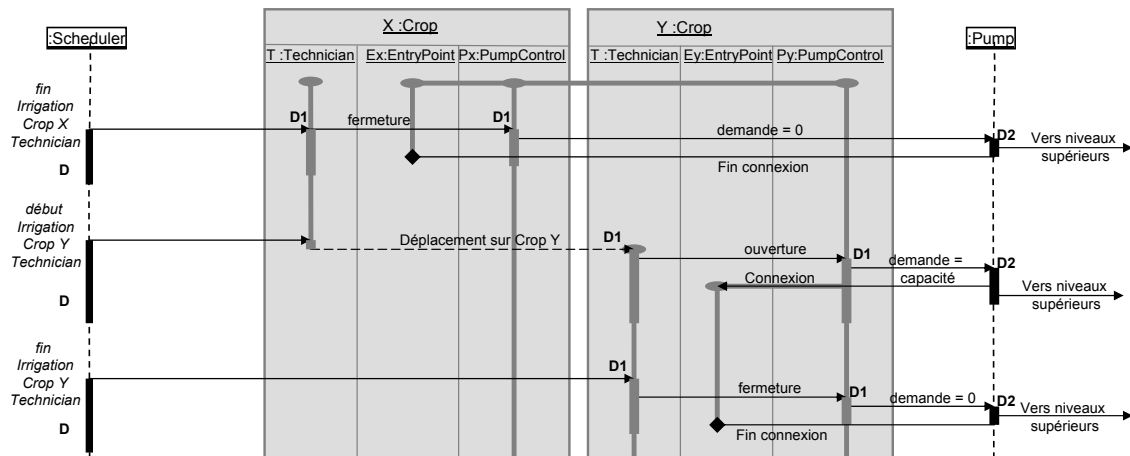


FIG. 59 – Diagramme de séquence des dynamiques organisationnelles lors des actions d'irrigation. Les références se rapportent aux diagramme dynamique local 55.

- l'agent prend en charge le rôle à chaque fois qu'il est actif dans le groupe, et annule son rôle quand il n'y est plus actif. C'est la solution adoptée pour le rôle **EntryPoint** de **Pump** dans **Crop**, que l'on peut considérer comme une relation se faisant et se défaisant. Il peut donc y avoir fractionnement dans le temps de l'identité de l'agent dans les différents rôles ;
- le cas du rôle **Technician** ne peut se résoudre par aucune des solutions précédentes. En effet **Technician** représente le comportement de l'agriculteur quand il va sur la parcelle. Si on veut rendre possible le fait que ce comportement puisse accumuler de l'information au cours de la simulation, il ne peut y avoir de rupture de son identité ni dans le temps, ni dans l'espace. Il faut donc créer une solution alternative en autorisant le rôle **Technician** à « voyager » entre les groupes : pour chaque **Farmer**, **Technician** est créé une seule fois à l'initialisation et attribué à l'une des parcelles au hasard, puis change de groupe au gré de ses actions, sans être réinstancié ou réinitialisé à chaque fois.

Le diagramme de séquence 59 illustre ces différents cas de figure.

Afin d'assurer la continuité temporelle et spatiale de l'identité des agents, on autorise des rôles à se déplacer entre différents groupes d'une même classe lorsqu'ils représentent un même agent pouvant agir alternativement dans chacun de ces groupes. Quand il est sollicité, le rôle quitte alors simplement un groupe pour entrer dans un autre, sans être réinitialisé.

3.3 Gestion du temps : événements et influences

La gestion du temps par événements a mené à introduire différents types d'influences afin de temporiser et de coordonner les processus. Les influences sont des messages envoyés d'une entité ou d'un rôle à un autre pour provoquer une réaction. Trois parmi les quatre types d'influences créés dans **CormasAGR** ont été utilisés dans le modèle-jouet.

Influences synchrones simples On a utilisé dans le modèle-jouet ce type d'influence pour réguler l'accès à des variables : si une variable est écrite plusieurs fois au cours du même cycle de simulation, on peut perdre des informations (artefact de Cormas : l'observation se fait à la fin d'un cycle de simulation). Si on repère une telle situation, il faut donc régler l'accès à la variable par une influence (une seule réaction à une influence est autorisée pour une entité à une date donnée).

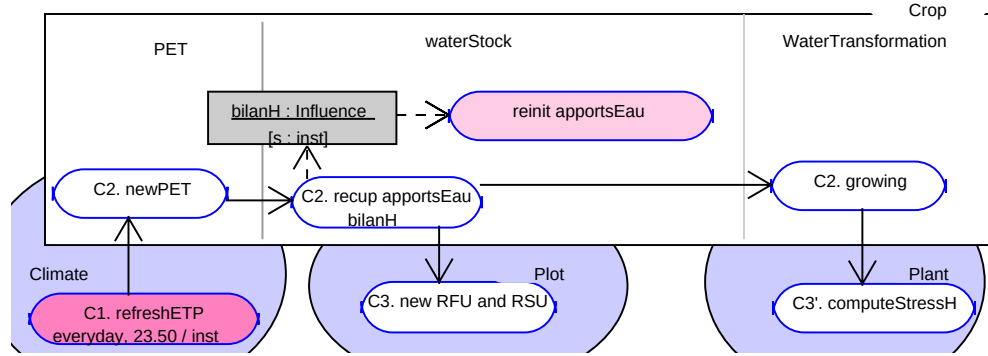


FIG. 60 – Diagramme d’activité organisationnel du bilan hydrique dans le modèle jouet, illustrant l’utilisation d’une influence synchrone simple. Les références se rapportent aux diagramme dynamique local 54.

C’est le cas de la variable `apportsEau` du rôle `WaterStock` dans le groupe `Crop` (voir diagramme 60). `apportsEau` stocke la quantité d’eau reçue par la parcelle. Lors du bilan hydrique, cette variable peut être dans le même cycle de simulation rafraîchie (intégration de l’apport d’eau en cours) et réinitialisée. La réinitialisation se fait donc sur l’envoi d’une influence. On utilise aussi les influences synchrones pour simuler l’envoi de messages entre agents. Ainsi, les messages de passage en crise sont envoyés par influence des `Manager` aux `User`.

Influences synchrones retardées On utilise les influences synchrones retardées pour programmer une action à une certaine heure. Dans le modèle-jouet, on utilise des influences synchrones retardées pour programmer la pluie : chaque jour, `Climate` calcule une heure aléatoire dans la journée et s’envoie à lui-même une influence synchrone retardée à cette heure.

Influences anonymes On utilise les influences anonymes pour synchroniser des sollicitations multiples. Dans le modèle-jouet, tous les irrigants ouvrent et ferment leur pompe au même moment. A la même date, 20 nouvelles demandes arrivent donc sur la prise du réseau, et donc 20 propagations de débit se passent en retour, comme si les pompes s’ouvraient les unes après les autres. Si le résultat est correct, le processus prend beaucoup de temps, d’autant plus que les demandes s’accumulent d’elles-mêmes sur la prise du réseau, et qu’il suffit donc d’une seule réaction pour l’ensemble des sollicitations.

Quand une nouvelle demande arrive à un `ExitPoint` du bassin, une influence anonyme est donc envoyée à la `WaterBranch` entrante pour solliciter sa réaction. Cette réaction se fera au cycle de simulation suivant (à la seconde d’après si la branche est libre) et le débit propagé en retour répondra à l’ensemble des demandes accumulées pendant le cycle de simulation précédent (voir figure 61).

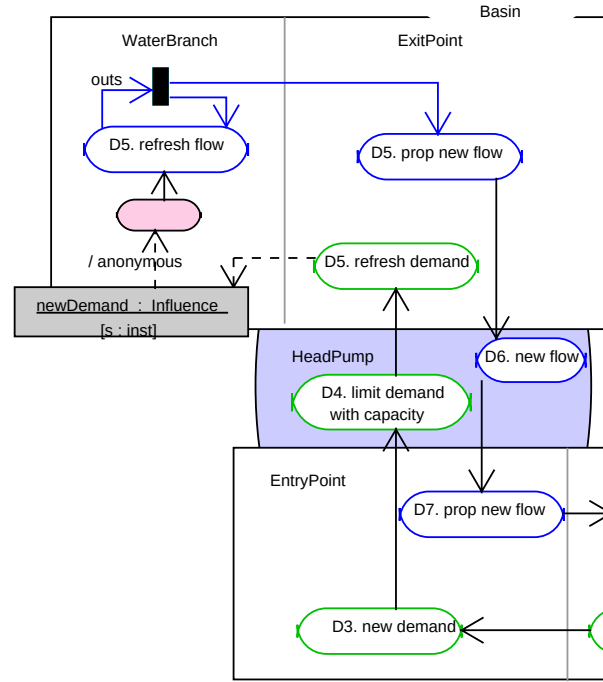


FIG. 61 – Extrait du diagramme d'activité organisationnel de la propagation d'une demande dans le système, illustrant l'utilisation d'une influence anonyme. Les références se rapportent aux diagramme dynamique local 55.

4 Initialisation et paramétrage

Cette dernière section précise comment passer du modèle abstrait décrit jusqu'ici au modèle simulé.

4.1 Initialisation

Le découplage des interactions du système dans différents groupes et la multiplication de liens interdépendants entre les rôles qui en résulte rend l'initialisation d'un modèle AGR relativement fastidieuse.

Si les liens entre rôles représentent des liens fonctionnels entre les entités, des liens structurels préexistants les sous-tendent. Ces liens structurels (physiques et non transitoires) sont localisés au niveau des agents.

Il y a en fait bijection entre liens structurels et liens fonctionnels, mais on choisit d'adopter une approche où la structure induit la fonction : on commence par créer les liens structurels entre les agents, puis on crée les groupes qui sont chargés de distribuer les rôles qu'ils définissent et leurs relations fonctionnelles aux agents. Afin de préparer cette initialisation, il faut :

- lister tous les liens structurels entre les agents dans le diagramme structurel d'ORIGAMI (figure 62) ;

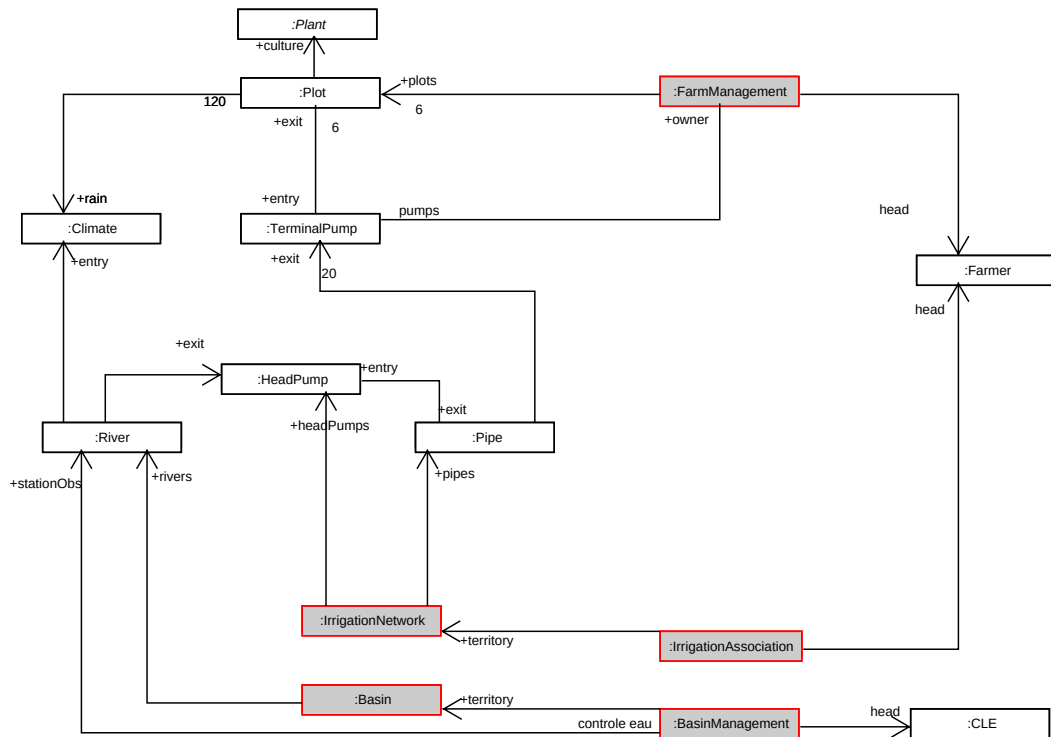


FIG. 62 – Diagramme structurel : liens structurels entre les agents et les groupes du système. Les groupes sont grisés. Les liens interdépendants sont encadrés et reliés

- décider d'un ordre d'initialisation :
 - on crée d'abord les liens physiques, entre la rivière et la borne d'entrée, la pompe et la conduite, la conduite et les prises individuelles, les prises et les parcelles ;
 - on crée ensuite les liens de composition : du bassin à la rivière, du réseau aux pompes et à la conduite, de l'exploitation aux parcelles. Les groupes **Crop**, **IrrigationNetwork** et **Basin** sont alors déterminés, et peuvent être créés ;
 - enfin on crée les liens de prise en charge : entre les groupes niveaux de gestion et leurs entités. Ces groupes peuvent alors être créés ;
- vérifier groupe par groupe que tous les liens fonctionnels sont bien reconstituables à partir de liens structurels, et modifier le diagramme structurel tant qu'on n'arrive pas à la bijection.

Ce travail aboutit à la définition des méthodes d'initialisation des groupes et de la méthode d'initialisation globale. Ces méthodes pourront être réutilisées et paramétrées pour définir différents scénarios de réalisation du modèle. Par exemple la modification de la taille du réseau se fait en paramétrant le nombre de pompes dans le réseau dans l'initialisation globale (lien structurel). La prise en charge des rôles correspondants est gérée par les méthodes d'initialisation des groupes, qui n'ont pas à être modifiées.

L'établissement du diagramme structurel permet par ailleurs de mettre en valeur certaines hypothèses implicites du modèle. Par exemple :

- **Climate** n'est relié qu'à **River** (pour donner le débit entrant) et à **Plot** (pluie) parce qu'il n'y a pas de modélisation hydrologique de type pluie-débit, auquel cas il serait plutôt relié à **Basin** ;

- le groupe **Crop** n’apparaît pas : il est implicitement défini par le **Plot**. Peut-être apparaîtrait-il si le modèle agronomique était plus développé ;
- **CLE** n’est pas liée à **Farmer** parce que la relation **Manager-User** est purement fonctionnelle, et issue d’hypothèses propres au groupe de gestion : dans notre cas, est **User** tout responsable d’un point de sortie hydraulique dans l’unité fonctionnelle correspondante.

Enfin on se sert du diagramme structurel pour renseigner la cardinalité des entités instanciées. Ainsi, si des arités sur le diagramme structurel ne sont pas renseignées, c’est que sont des paramètres du modèle aléatoires ou laissés au choix de l’utilisateur.

4.2 Paramétrage

Le paramétrage permet spécifier un scénario de simulation du modèle. Les paramètres du modèle-jouet sont les suivant :

- cardinalité des entités : elles apparaissent sur le diagramme structurel 62 ;
- séries climatiques et coefficients culturels. Ce sont les données utilisées dans GibiDrome ;
- profondeur et surface des **Plot**, capacité des **Pump**, niveaux de référence de déclenchement et d’arrêt des crises (**RiverObservation**) : là encore, ce sont les paramètres utilisés dans GibiDrome. Leurs valeurs sont données dans la description de la situation jouet, au 1 ;
- valeurs de référence des **ManagerIrri**. Elles sont issues du paramétrage de GibiDrome :
 - **plantsIrriRef** associe initialement **Maze** à une période de 7 jours et une quantité d’eau de 30 mm. Au 15 juillet, cette valeur est rafraîchie à 40 mm, puis 30 mm à nouveau au 15 août ;
 - **calendarRef** : pour chacune des 6 parcelles, un **CalendarEvent** se voit attribuer un jour dans la semaine, une fréquence de 7 jours, une durée d’irrigation de 23 heures, de 0h00 à 23h00, et un débit calculé à partir de **plantsIrriRef**. La durée d’irrigation de 23 heures est un artefact de programmation qui permet de s’assurer que l’événement de fin d’irrigation arrive bien avant l’événement de début de l’irrigation suivante. On pourra toujours autoriser un irrigant à « oublier » de fermer une pompe en rajoutant une nouvelle règle de décision ;
- contraintes : le paramétrage des contraintes est décrit dans le tableau 28.

On peut noter que la distinction **prelevements** / **apports** est caduque puisqu’il n’y a pas de ressources complémentaires.

Un paramétrage autre de ce modèle peut ainsi mener à des simulations plus évoluées :

- comprenant plus d’un réseau, ainsi que plus d’irrigants dans les réseaux ;
- où les règles collectives sont paramétrées différemment : tours d’eau répartis différemment, limitation des capacités des irrigants...

Des résultats de simulation ne seront présentés que dans la troisième partie du document, en regard des autres modèles.

Émetteur	Récepteurs	type	crisis	args
BasinManagement	tous CollectiveUser, pour leur accès à la rivière dans leur IrrigationNetwork	flowLimitRelative	0	nivRef = capacite / 08Maze / 10Maze pC = prelevements / apports v = 1
			1	nivRef = capacite / 08Maze / 10Maze pC = prelevements / apports v = 0.8
			2	nivRef = capacite / 08Maze / 10Maze pC = prelevements / apports v = 0.6
BasinManagement	tous IndividualUser, pour leur accès à la rivière	tourEau	0	p = 7 $1 \leq i \leq 7$ n = 0
			1	p = 7 $1 \leq i \leq 7$ n = 1,5
			2	p = 7 $1 \leq i \leq 7$ n = 3
IrrigationAssociation	tous User, pour leur accès dans leur réseau (si le gestionnaire est de type ManagerTourEau)	tourEau / $\emptyset$	0	p = 7 $1 \leq i \leq 7$ n = 0
			1	p = 7 $1 \leq i \leq 7$ n = 1
			2	p = 7 $1 \leq i \leq 7$ n = 2

TAB. 28 – Paramétrage des contraintes du modèle jouet (voir tableau 26). Quand plusieurs paramètres sont possibles, c’est qu’ils sont laissés au choix de l’utilisateur. Pour les tours d’eau, la valeur de *i* est attribuée dans l’ordre des usagers sur la conduite.

CONCLUSION DU CHAPITRE

Le modèle jouet laisse apparaître des éléments d'ordre générique pour la gestion de ressources naturelles :

- groupes de gestion et groupes fonctionnels ;
- rôles Manager, User, Technician ;
- distinction formelle entre règles collectives de gestion (objet Constraint), règles individuelles de gestion (compétences des rôles Manager), mise en œuvre de ces règles (rôle Technician et objet Calendar), sélection de ces règles (agent) ;
- rôles observation et contrôle. Ils font l'interface entre les objets et leur gestionnaire, et peuvent représenter une instrumentation. Il faudra explorer leur capacité à représenter les distorsions entre le réel et le perçu.

Cette décomposition de l'action entre observation, contrôle, choix d'un comportement, et déroulement du comportement pourra être mise en regard des modèles classiques d'agent composés de modules perception, délibération, action ([Ferber, 1995] par exemple). Il faudra aussi s'interroger sur la portée de ces éléments de généricité.

L'exercice du modèle-jouet permet de confirmer que :

- un niveau d'organisation est défini comme un point de vue sur un processus à une échelle ;
- les rôles sociaux sont des éléments de comportement (des masques que l'agent endosse selon les circonstances) ; les rôles physiques sont souvent plutôt des « filtres » d'accès (en observation ou en contrôle) aux objets ;
- les agents, physiques et sociaux, définissent des caractéristiques internes objectives. Les agents sociaux ont le choix de leurs rôles comme degré de liberté : la personnalité d'un agent se définit par sa panoplie de masques et par les critères selon lesquels il les choisit.

Cet exercice pose les bases d'une validation des concepts AGR et de la méthodologie ORIGAMI. L'extension à des modèles plus complexes permettra de tester la plasticité de l'approche et sa capacité à aborder la complexité.

Chapitre 6

Extension à des modèles plus complexes

CONTENU DU CHAPITRE

Le chapitre précédent présentait en détail le modèle-jouet dans le but d'explicitier et de tester les concepts, l'implémentation et la méthodologie développés autour d'AGR. Il s'agit maintenant d'aller plus loin dans la mise en œuvre de l'approche en étendant le modèle-jouet à des modèles plus complexes.

Le premier modèle, GibiAGR reproduit complètement la situation de GibiDrome. La plupart des comportements étaient déjà dans le modèle jouet, et les extensions sont plutôt d'ordre organisationnel : ajout de nouveaux niveaux d'organisation, instanciation de plus de groupes.

Le second modèle, GibiH, apporte des extensions d'ordre comportemental : de nouveaux rôles sont ajoutés pour introduire des comportements plus hétérogènes.

La première partie de ce chapitre décrit les différentes extensions amenées au modèle-jouet pour reproduire GibiDrome, en redéroulant la méthodologie ORIGAMI sur chacun des 3 axes où portent les extensions : (1) ajout des irrigants individuels et augmentation du nombre de réseaux (2) ajout de ressources complémentaires (3) ajout d'1 niveau d'observation du système.

La seconde partie s'intéresse à GibiH. Les extensions ne portant que sur la diversification des comportements, les niveaux d'organisation et les dynamiques globales ne sont pas remises en cause : les diagrammes d'ORIGAMI ne seront utilisés que ponctuellement.

Enfin, une troisième partie dresse un bilan global sur les 3 modèles, leurs différences et leurs caractéristiques.

Sommaire

1	Du modèle-jouet à GibiAGR	184
1.1	De 1 à 3 réseaux, apparition des irrigants individuels : exploration de nouvelles connections	185
1.2	Ajout des ressources complémentaires	186
1.3	Nouveaux modes de lancement de l'irrigation : définition de nouvelles structures de groupe et de nouveaux rôles	190
1.4	Comparaison entre GibiDrome et GibiAGR	192
2	Modèle hétérogène : de GibiAGR à GibiH	193
2.1	Un nouveau mode d'allocation des débits	193
2.2	Une nouvelle règle de gestion dans les réseaux	195
2.3	Décomposition de la prise de décision sur la gestion des irrigations	197
2.3.1	Nouvelles hypothèses de modélisation	197
2.3.2	Traduction AGR : création de nouvelles hiérarchie de rôles	198
2.4	Diversification des stratégies des irrigants	201
2.4.1	Diversification de l'assolement	201
2.4.2	Diversification du lancement et du calcul des doses des irrigations	203
2.4.3	Diversification du niveau de contrainte en eau et du mode de programmation des irrigations	205
2.4.4	Diversification des comportements de crise	206
2.4.5	Bilan	206
3	Présentation synthétique des 3 modèles	208
3.1	Présentation comparée des 3 modèles	208
3.2	Paramètres des modèles	211

On redéroule à chaque fois les étapes nécessaires de ORIGAMI

1 Du modèle-jouet à GibiAGR

Le modèle GibiAGR est la reproduction du modèle GibiDrome en Agent-Groupe-Rôle. GibiDrome est décrit dans l'annexe D, et les simplifications qui ont été opérées pour passer de GibiDrome au modèle-jouet dans la section 1.1 du chapitre précédent (p. 151). Pour revenir à GibiAGR il faut donc :

- instancier les **trois réseaux** et créer des **irrigants individuels**. Pour cela tous les éléments sont déjà présents dans le modèle-jouet, il suffit juste d'instancier de nouvelles connections (voir 1.1) ;
- apporter des **ressources complémentaires** aux réseaux, mais également à la rivière. Là encore, il faut instancier de nouvelles connections, mais aussi créer de nouveaux agents et de nouveaux rôles (voir 1.2) ;
- mettre en place la règle de **lancement de l'irrigation par information centralisée et par observation de la réserve des sols**. Il faut donc créer de nouveaux rôles de type `ManagerStartIrri` et modéliser l'acquisition et la diffusion de cette information. Cela revient à définir de nouvelles structures de groupe (voir 1.3).

Avant de rentrer dans le détail de ces différentes étapes, on donne une vue globale de GibiAGR en déroulant les 2 premiers diagrammes d'ORIGAMI, qui décrivent les différentes structures de groupe ainsi que leurs relations fonctionnelles.

Dans GibiAGR apparaissent deux nouveaux processus liés à l'introduction de la règle de lancement de l'irrigation par information centrale : la « veille agronomique », ou observation des valeurs agronomiques d'un ensemble de parcelles témoins, ainsi que la « liste de diffusion », ou envoi périodique d'informations à des abonnés. Ces deux processus ont lieu à l'échelle du bassin. Au tableau échelles-processus 21 de la p. 157 se rajoutent donc les 2 cases suivantes :

	Structures	Veille agronomique	Liste de diffusion
Fonctions			
Bassin		Observation d'un échantillon de parcelles du bassin (DashBoard)	Diffusion d'un bulletin d'information à l'ensemble des irrigants du bassin (MailingList)

TAB. 29 – Niveaux d'organisation supplémentaires apparaissant dans GibiAGR

Pour ce qui est des relations fonctionnelles, apparaissent sur le diagramme fonctionnel global 63 de GibiAGR :

- des liens directs entre niveau bassin et niveau exploitation, dus à l'introduction d'irrigants individuels. En effet pour les irrigants individuels, structures de groupe et rôles restent les mêmes, mais les pompes des exploitations sont connectées directement sur la rivière, et les irrigants sont usagers directs du bassin ;
- les deux nouvelles structures de groupe qui collectent, transforment et diffusent des informations agronomiques aux exploitations.

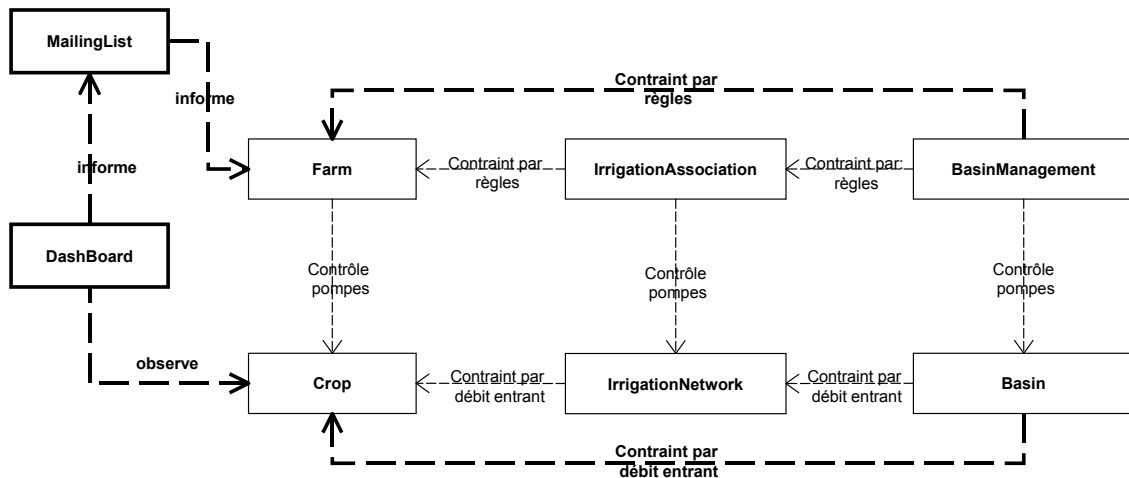


FIG. 63 – Diagramme fonctionnel global de GibiAGR. Les éléments rajoutés par rapport au modèle-jouet sont représentés en gras

1.1 De 1 à 3 réseaux, apparition des irrigants individuels : exploration de nouvelles connections

Passage de 1 à 3 réseaux Cette évolution, ainsi que l'augmentation du nombre d'irrigants dans les réseaux, n'amène aucune modification sur l'ensemble des schémas présentés au chapitre précédent, ni sur le code des différentes classes du système. En effet, la modélisation de la circulation de l'eau a été prévue pour que plusieurs connections puissent se faire sur la rivière. La

seule différence avec le modèle-jouet se situe donc dans le diagramme structurel et les méthodes d'initialisation.

Irrigants individuels Les irrigants individuels sont connectés directement à la rivière, et soumis directement aux règles collectives définies au niveau du bassin. Du point de vue physique, tous les éléments sont donc déjà présents dans le modèle-jouet : il suffit de connecter directement une **TerminalPump** à la rivière. Du point de vue social, les règles collectives auxquelles sont soumis les irrigants individuels sont différentes de celles auxquels sont soumis les réseaux. Par commodité d'adressage, on crée donc dans la structure de groupe **BasinManagement** un rôle **IndividualUser** qui recevra ces règles particulières. Les **CollectiveUser** reçoivent des contraintes de type **flowLimit**, alors que les **IndividualUser** reçoivent des contraintes de type **tourEau**. Lors de l'initialisation, les **Farmer** liés à des **TerminalPump** connectées à la **River** viennent prendre un rôle **IndividualUser** dans **BasinManagement**.

Les diagrammes swimlane de la figure 64 illustrent les modifications structurelles induites par l'introduction d'irrigants individuels dans le modèle-jouet, et le diagramme dynamique local illustre que cela ne pose pas de problème du point de vue de la dynamique.

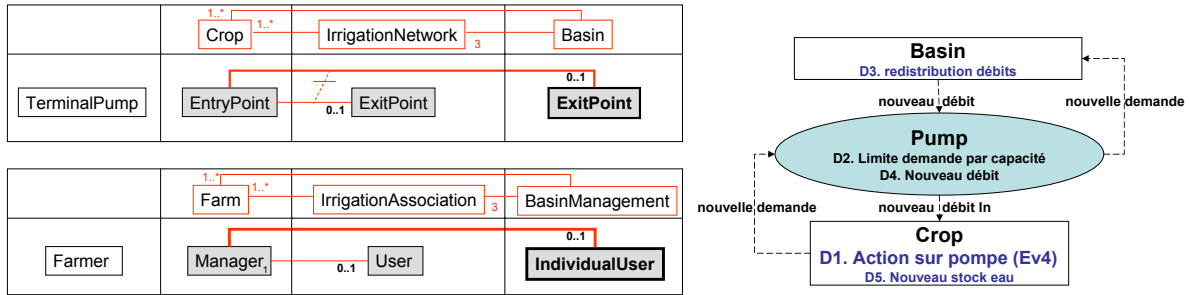


FIG. 64 – GibiAGR : diagrammes swimlane et diagramme dynamique local de l'irrigation individuelle.

Sur les diagrammes swimlane, ce qui est modifié par rapport au modèle jouet est en gras (à comparer avec le diagramme 51 du chapitre 5) : une pompe est **ExitPoint** soit d'un **IrrigationNetwork**, soit d'un **Basin**.

Le diagramme dynamique local est à comparer au diagramme 55 du chapitre 5. Il perd simplement un étage, ce qui ne pose pas de problème de modélisation

1.2 Ajout des ressources complémentaires

Les ressources complémentaires que l'on choisit de représenter sont :

- les connexions avec le SISEV ;
- la réserve des Juanons. La mise en place de la réserve des Juanons a pour conséquence de créer de nouvelles connexions avec le SISEV. On ne représentera pas la réserve des Juanons en tant que telle, mais simplement ces nouvelles connexions.

Connexion avec le SISEV L'introduction d'une connexion avec le SISEV se traduit :

- **sur le plan hydraulique** : La connexion d'un réseau avec le SISEV est représentée par une entrée supplémentaire. Le SISEV fournit toujours l'eau demandée, dans la limite de la taille de la connexion. Plutôt que de représenter un nouveau réseau d'irrigation, on choisit

de représenter une entrée qui fournit tout le temps le débit demandé dans la limite de sa capacité par un nouveau rôle `InfEntryPoint`. Il faut ensuite adapter la propagation de l'eau et la manière de faire remonter des demandes (voir diagramme dynamique local de la figure 65). Cet exercice est détaillé dans le paragraphe suivant ;

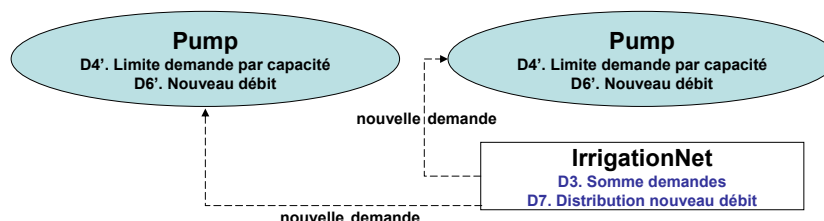


FIG. 65 – Connexion avec le SISEV : diagramme dynamique local (à comparer avec diagramme 55 du chapitre 5). Ce diagramme illustre le problème posé par la présence d'entrées multiples dans un réseau lors de la remontée des demandes : comment gérer la répartition des demandes entre les 2 entrées, dans quel ordre les activer ?

- **Sur le plan social** : un rôle `PumpObservationCompl` est créé au niveau des réseaux afin d'étiqueter les ressources complémentaires, qui ne doivent être activées qu'en cas de crise, et doivent alors alimenter préférentiellement le réseau (diagramme 66). Ceci implique que les règles de gestion collective concernant les ressources complémentaires sont différentes. On crée donc un nouveau type de contrainte (tableaux 30, 31 et 32).

La manière dont on modélise la priorité d'une ressource sur une autre est développée dans le paragraphe suivant.

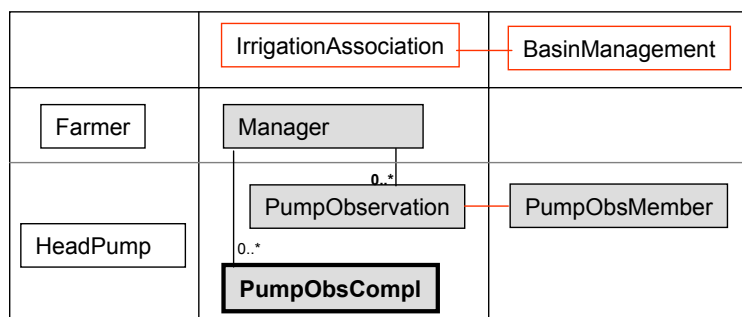


FIG. 66 – Connexion avec le SISEV : diagramme swimlane des processus sociaux (à comparer avec diagramme 50 du chapitre 5)

Règle représentée	type	args
Priorité et conditions du déclenchement de l'accès concerné : à un niveau de crise donné l'accès doit être déclenché si <code>open = true</code> , et de manière prioritaire si <code>priority = true</code>	<code>openPriority</code>	ouverture : <code>open = true / false</code> priorité : <code>priority = true / false</code>

TAB. 30 – Description de la contrainte `openPriority`

Type Contrainte	Manager (structure de groupe <code>IrrigationAssociation</code>)
<code>openPriority</code>	La pompe est ouverte si <code>open = true</code> (mais les Manager peuvent aussi choisir de l'ouvrir en dehors des crises) et une priorité basse ou haute lui est attribuée selon <code>priority</code>

TAB. 31 – Interprétation de la contrainte `openPriority`

Émetteur	Récepteurs	type	crisis	args
BasinManagement	tous <code>CollectiveUser</code> pour leur accès à la rivière	<code>priority</code>	tous niveaux	<code>open = true</code> <code>priority = false</code>
BasinManagement	tous <code>CollectiveUser</code> pour leurs ressources complémentaires	<code>priority</code>	0 1 ou 2	<code>open = false</code> <code>priority = true</code> <code>open = true</code> <code>priority = true</code>

TAB. 32 – Paramétrisation de la contrainte `openPriority`

Ressources multiples dans un réseau Avec l'introduction d'une ressource complémentaire dans les réseaux, les dynamiques des structures de groupe décrivant la circulation de l'eau dans les réseaux doivent être revues de manière à gérer la **réponse de deux entrées** aux demandes.

Avec une seule entrée, lorsqu'une pompe du réseau s'ouvre ou se ferme, la variation de demande est propagée jusqu'à l'entrée, puis une influence anonyme est envoyée au niveau auquel est connectée l'entrée. Lors du traitement de l'influence, le débit correspondant à la différence entre demande et débit est propagé depuis l'entrée du réseau jusqu'à la pompe (diagramme 67).

Avec plusieurs entrées, la totalité de la demande est propagée à toutes les entrées, mais le traitement est échelonné dans le temps. L'entrée prioritaire traite les augmentations de la demande (ouverture d'une borne) en premier, et les diminutions de la demande (fermeture d'une borne) en dernier. La propagation de la demande se fait en 2 temps :

1. propagation de la demande sur les deux entrées qui renvoient un lien vers le niveau auquel elles sont connectée ainsi que leur priorité. L'entrée infinie (rôle `InfEntryPoint`), qui représente la connexion au SISEV, renvoie un lien vers elle-même ;
2. envoi d'une influence retardée selon l'ordre de priorité à la sortie du niveau.

Lors de la propagation d'un débit, l'information se propage jusqu'à arriver à une parcelle ou jusqu'à rencontrer un nœud ou une branche où la demande est égale au débit, ce qui signifie que la demande a déjà été traitée. Comme le changement de débit n'est effectué qu'au retour, si la demande a déjà été traitée, rien ne se passe (diagramme 68).

L'extension du modèle à des réseaux à deux entrées a finalement nécessité la modification des méthodes de propagation des demandes (propagation en 2 temps, envoi d'influences retardées).

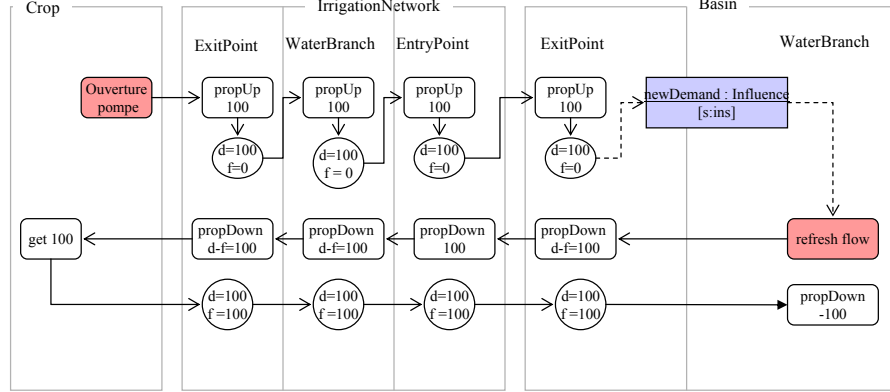


FIG. 67 – Diagramme d’activité organisationnel simplifié de la propagation et du traitement des demandes dans le modèle-jouet. Exemple de l’ouverture d’une pompe à 100 l/s dans un réseau à une entrée où tous les demandes et débits sont initialement nuls. Seuls les groupes et les rôles ont été représentés pour simplifier la lecture. d et f représentent respectivement la demande et le débit dans l’entité concernée.

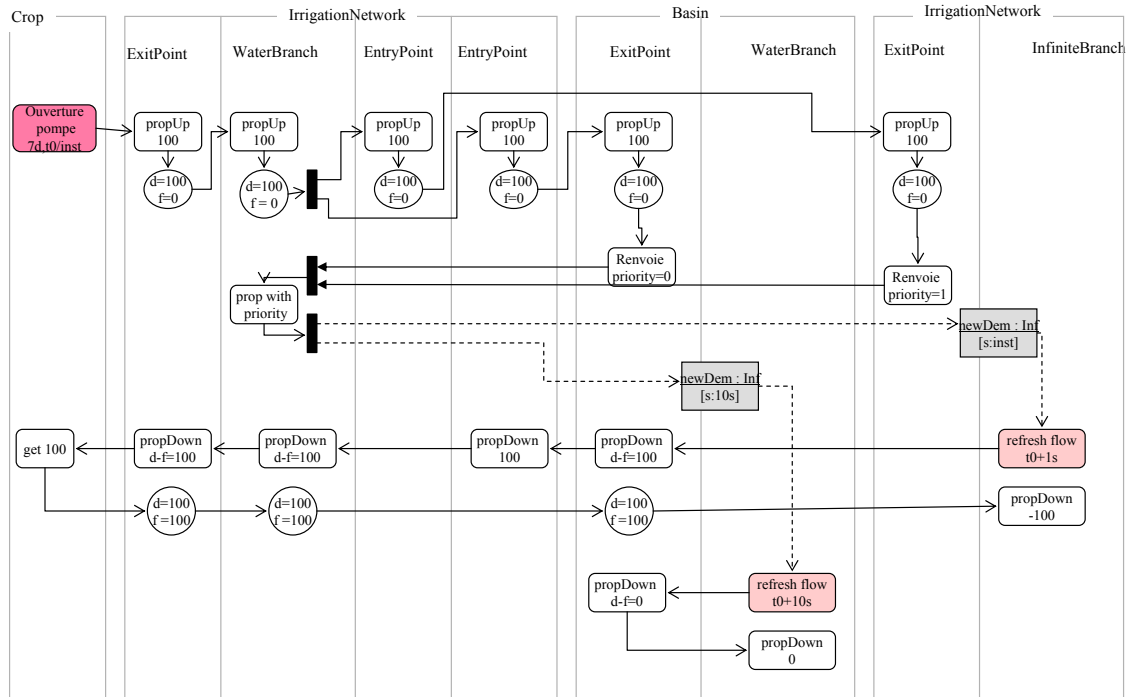


FIG. 68 – Diagramme d’activité organisationnel simplifié de la propagation et du traitement des demandes dans GibiAGR. Exemple de l’ouverture d’une pompe à 100 l/s dans un réseau à 2 entrées où toutes les demandes et débits sont initialement nuls. Seuls les groupes et les rôles ont été représentés pour simplifier la lecture. d et f représentent respectivement la demande et le débit dans l’entité concernée.

Cet exercice d'introduction des ressources complémentaires dans le modèle-jouet soulève des questions :

- alors que ces éléments sont modélisés très simplement dans GibiDrome, la décomposition et l'explicitation pratiquée avec le formalisme AGR oblige à développer des hypothèses et objets supplémentaires : création de la classe `InfiniteWaterBranch`, explicitation de nouvelles contraintes, modification des méthodes de propagation ;
 - l'ajout de nouvelles règles de gestion collective se traduit facilement par la création d'un nouvel objet `Constraint`, mais il demande à ce que de nouvelles méthodes soient rajoutées dans les rôles `Manager` afin qu'ils puissent interpréter ces nouvelles contraintes. Si plusieurs variétés de `Manager` ont été créées, il faut donc remonter l'interprétation des contraintes le plus haut possible dans la hiérarchie des classes afin de réduire les coûts de modification.
-

1.3 Nouveaux modes de lancement de l'irrigation : définition de nouvelles structures de groupe et de nouveaux rôles

Des nouveaux rôles pour de nouvelles modalités de stratégies Dans le modèle-jouet, un seul mode de lancement de l'irrigation est possible : à date fixe, au 15 juin. Pour reproduire GibiDrome, il faut rajouter deux stratégies alternatives : par utilisation d'une information centrale, ou par observation de l'état des sols (utilisation d'un tensiomètre). Ces nouvelles modalités d'un type de règle individuelle, la règle de lancement de l'irrigation, sont introduites en définissant de nouveaux types de rôles `ManagerStartIrri` (voir diagramme 69) :

- `ManagerStartPointu` vérifie tous les jours le niveau dans ses parcelles (nouvel événement proactif, voir tableau 33), et quand ce niveau devient trop bas (même règle que dans GibiDrome) il demande à `Farmer` de passer en phase d'irrigation en prenant en charge son rôle `ManagerIrri` ;
- `ManagerStartCentral` attend de recevoir un message lui indiquant qu'il est temps de commencer l'irrigation. Une fois ce message reçu, il demande à `Farmer` de passer en phase d'irrigation en prenant en charge son rôle `ManagerIrri`. Ce sont les structures de groupe décidant de l'envoi de ce message qu'il faut maintenant définir.

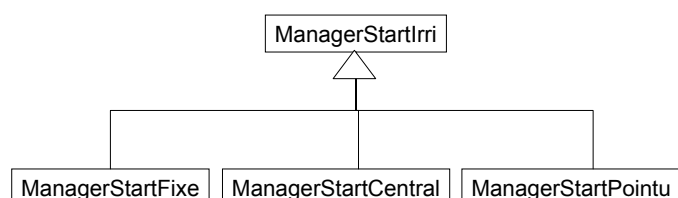


FIG. 69 – Diversification des stratégies de lancement de l'irrigation en créant de nouvelles sous-classes de `ManagerStartIrri`

Les `Farmer` définissent un attribut `roleStartIrri` afin de stocker le type de rôle `ManagerStartIrri` qu'ils prendront en charge quand ils passeront en phase d'irrigation.

Des nouvelles structures de groupe pour de nouveaux processus La règle de lancement par information centrale implique deux nouveaux processus :

- observation d'un échantillon de parcelles par un organisme centralisé : on crée pour cela une structure de groupe que l'on appelle **DashBoard**, tableau de bord, où un agent tenant un rôle d'**Expert** observe des éléments du système et en tire des informations agrégées. Pour lors, l'**Expert** doit chaque semaine observer l'état hydrique des parcelles et en tirer une information sur le lancement de l'irrigation (nouvel événement proactif, voir tableau 33). Un rôle **PlotObservation** est donc défini dans la structure organisationnelle **DashBoard**. La règle utilisée par l'**Expert** est la règle de lancement de l'irrigation par information centralisée de GibiDrome (voir section 1 du chapitre 5) et les **PlotObservation** donnent une information exacte sur la réserve hydrique des sols ;
- diffusion d'une lettre d'information aux agriculteurs : on a choisi de définir une structure de groupe distincte à portée générique, **MailingList**, pour représenter la diffusion d'une lettre d'information. Cette structure définit deux types de rôles : un rôle **Transmitter** qui détermine notamment le rythme et la vitesse d'envoi de l'information, et des rôles **Subscriber** qui reçoivent l'information.

Événement déclencheur Evi : étiquette pour le ième événement	Ordonnancement	Déclencheur	Conséquences
Ev13. Vérification de l'état des sols d'un échantillon de parcelles	chaque semaine	Expert de DashBoard	Envoi d'information quand les parcelles sont sèches
Ev14. Vérification de l'état des sols des parcelles de l'exploitation	chaque jour	ManagerStartPointu	Lancement de l'irrigation : transition entre le rôle ManagerStartIrri et le rôle ManagerIrriGibi

TAB. 33 – Stimulations introduites par les nouveaux modes de lancement de l'irrigation

Enfin, un nouvel agent **CA** est introduit. **CA** représente la chambre d'agriculture, qui est dans la Drôme responsable de l'envoi d'une lettre d'information contenant des conseils pour l'irrigation. C'est cet agent **CA** qui prend en charge le rôle **Expert**, et renvoie les informations fournies par ce rôle aux agriculteurs en prenant en charge un rôle **Transmitter** dans un groupe de type **MailingList**. Le diagramme swimlane résultant est représenté figure 70, et le diagramme dynamique local de la diffusion de l'information centralisée est représenté figure 71. Enfin, le diagramme de composition des rôles 72 illustre les stratégies alternatives de lancement de l'irrigation à la disposition des **Farmer**.

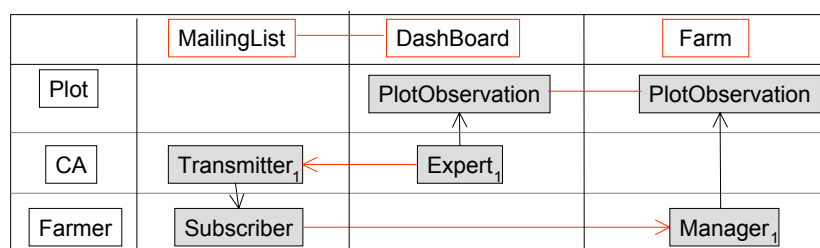


FIG. 70 – Diagramme swimlane des structures de groupe introduites par la règle de lancement de l'irrigation par information centrale.

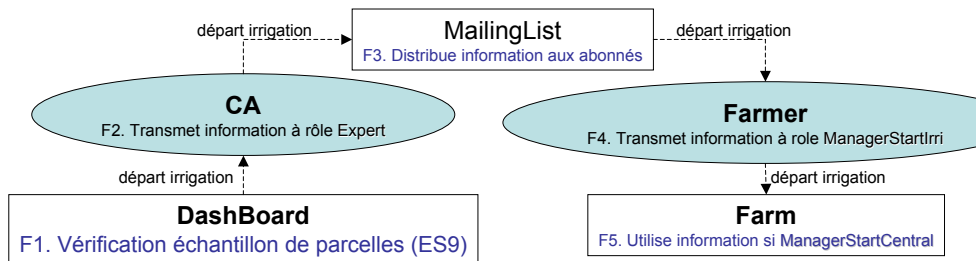


FIG. 71 – Diagramme dynamique local du déclenchement de l'irrigation par information centralisée

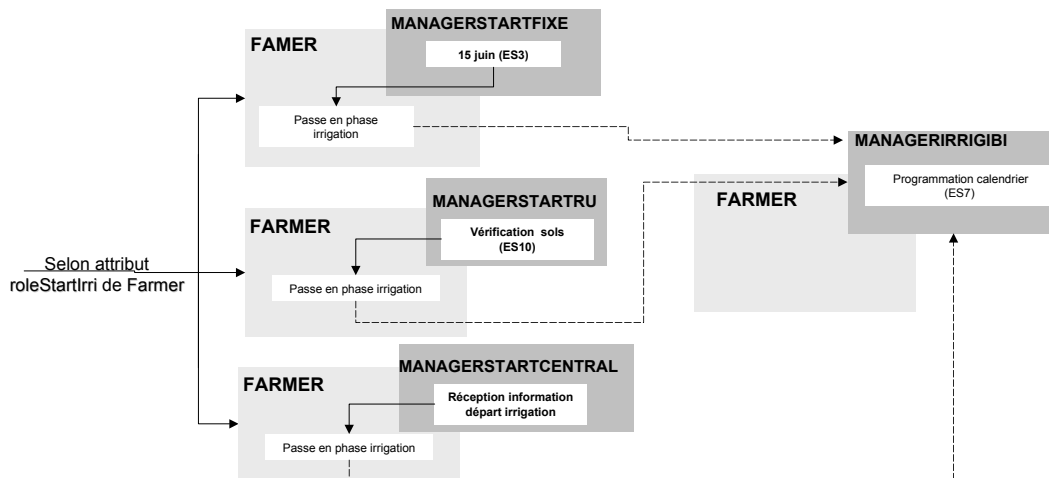


FIG. 72 – Diagramme de composition des rôles des transitions entre lancement de l'irrigation et irrigation pour les 3 types de rôles ManagerStartIrri

L'ajout de stratégies alternatives de gestion de l'irrigation se traduit directement par l'introduction de nouveaux rôles et éventuellement de nouvelles structures de groupe, sans poser de problèmes.

Les structures de groupe introduits ont une portée générique : MailingList permet de représenter des mécanismes de diffusion d'information d'un acteur central vers des acteurs abonnés ; DashBoard permet de représenter un « tableau de bord », où un expert observe des éléments du système et en tire des informations plus évoluées. Ces informations, qui ne concernent pour lors que le lancement de l'irrigation pourront être étendues par la suite (météo, coefficients culturaux..).

1.4 Comparaison entre GibiDrome et GibiAGR

Le principal apport de GibiAGR par rapport à GibiDrome est de **modéliser d'un côté les règles de gestion collective dans des objets séparés, et de l'autre côté la mise en**

œuvre de ces règles de gestion dans des rôles Manager. Il est alors plus facile de créer de nouveaux scénarios en jouant sur ces 2 éléments, en créant soit de nouvelles contraintes, soit de nouveaux rôles. Ainsi en l'état de GibiAGR, il est possible de reproduire GibiDrome mais aussi de simuler la mise en œuvre des règles de gestion collective par les réseaux par la mise en place de tours d'eau entre les abonnés. Ces tours d'eau peuvent être les mêmes pour tous les réseaux, ou bien propres à chacun, comme c'est le cas dans la réalité.

Une des raisons qui avaient poussé au choix d'AGR au départ était de pouvoir modéliser des **niveaux d'organisation enchevêtrés**, et plus particulièrement l'accès des irrigants à plusieurs types de ressources. Ceci est **structurellement** facilité par AGR : pour avoir plusieurs type d'accès, un **Farmer** vient prendre des rôles **User** dans des réseaux ou dans le bassin, ses pompes étant points de sortie des groupes hydrauliques concernés. Les contraintes (règles collectives) sont distribuées aux **User** des groupes sociaux puis distribuées par ces **User** sur leurs accès concernés. Ainsi les **Farmer** retrouvent dans leur groupe **Farm** leurs différents accès avec les contraintes qui y sont propres. Mais d'un **point de vue dynamique**, le problème de compiler ces contraintes dans un seul calendrier ou de passer d'un accès à un autre reste par contre entier, et doit être résolu par l'agent ou son rôle **Manager**.

Du point de vue du **temps de calcul**, GibiAGR est beaucoup plus lent que GibiDrome. Cela ne tient pas tant au formalisme AGR lui-même qu'au niveau de détail des modèles puisque, contrairement à GibiDrome, agriculteurs et bornes sont simulés individuellement, et débits et demandes se propagent de proche en proche pour chaque action individuelle.

2 Modèle hétérogène : de GibiAGR à GibiH

À partir de la structure de GibiAGR, un modèle incorporant des comportements hétérogènes, appelé GibiH, est construit en modifiant ou sous-classant des rôles. L'extension de GibiAGR à GibiH a pour but de mettre à l'épreuve la capacité du formalisme AGR à générer des modèles flexibles et à inclure rapidement de nouvelles hypothèses dans ces modèles. Les différentes extensions réalisées permettent ainsi d'approfondir certains aspects du modèle-jouet et de GibiAGR et d'explorer comment le formalisme AGR supporte la modification des modèles :

1. mise en valeur et test de l'architecture arcs-nœuds utilisée pour représenter la circulation de l'eau : diversification du mode d'allocation des débits entre les différents nœuds d'un réseau ;
2. introduction d'une nouvelle règle de gestion collective dans les réseaux : quelle est l'ampleur des modifications à effectuer pour introduire une nouvelle règle de répartition de l'eau entre les abonnés d'un réseau, prenant en compte les profondeurs de sols ?
3. introduction d'une nouvelle règle individuelle : quelle est l'ampleur des modifications à effectuer pour introduire des hypothèses sur la planification de la durée et des horaires irrigations ?
4. diversification des comportements existants : quel est le coût d'introduire des stratégies alternatives pour chacun des types de rôles **Manager** existants ?

2.1 Un nouveau mode d'allocation des débits

Les rôles **WaterBranch** gèrent la répartition des débits dans les structures de groupe **Basin** et **IrrigationNetwork** :

- dans **Basin**, l'eau circule en surface libre : à chaque nœud, si le débit demandé par les sorties est disponible, il est distribué, et le reste est envoyé dans la branche suivante. Si la demande excède le débit, les branches suivantes sont à sec ;
- dans **IrrigationNetwork**, l'eau circule sous pression : les débits sont répartis au prorata des demandes sur l'ensemble du réseau. Si le réseau ne peut pas satisfaire le total des demandes des abonnés, ils sont tous pénalisés de la même façon, et leur emplacement sur la conduite du réseau n'intervient pas.

Dans GibiH, on souhaite représenter le fait que les irrigants situés en début de ligne sont favorisés par rapport aux irrigants situés en bout de ligne, comme on peut l'observer sur le terrain. On introduit pour cela un paramètre c dans les rôles **WaterBranch** tel que :

- si $c = 0$, les abonnés en début de ligne sont servis les premiers, et les abonnés en bout de ligne reçoivent le reste du débit disponible ;
- si $c = 1$, les débits sont répartis équitablement entre tous les abonnés du réseau, au prorata des demandes ;
- quand c est compris entre 0 et 1, la situation est intermédiaire : les abonnés en début de ligne sont d'autant plus favorisés quand c est proche de 0, la situation est d'autant plus équitable quand c est proche de 1.

Ce nouveau mode de répartition de l'eau est implémenté dans un rôle **WaterBranchLoad**, dont le rôle **WaterBranch** devient une spécialisation, avec $c = 1$ (figure 73).

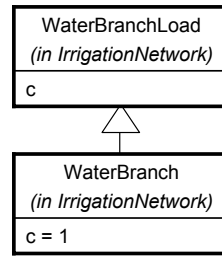


FIG. 73 – Implémentation du nouveau mode de calcul de la circulation de l'eau dans une nouvelle classe surclassant **WaterBranch**

À chaque nœud, c est utilisé comme suit : si Q est le débit dans la branche en cours, d_B et d_P les demandes totales des branches sortantes et des pompes sortantes respectivement, alors les débits Q_B et Q_P alloués aux branches sortantes et aux pompes sortantes respectivement sont définis par :

$$\text{Conservation du débit aux nœuds : } Q = Q_B + Q_P$$

$$\text{Cas où le débit entrant est suffisant : si } Q = d_B + d_P, Q_P = d_P$$

$$\text{Cas où le débit entrant est insuffisant : si } Q < d_B + d_P, Q_P = \min(d_P, \frac{d_P}{d_P + c * d_B} Q)$$

Seule l'hypothèse de conservation du débit aux nœuds a un sens hydraulique. L'utilisation du paramètre c permet de représenter rapidement une variété de situations sans recourir aux équations de l'hydraulique en charge. Si le débit entrant est suffisant, les débits alloués sont égaux aux débits demandés. Si il n'est pas suffisant, c est utilisé pour moduler la répartition du débit amené dans une branche par rapport aux différents débits demandés. Ainsi, en jouant sur la valeur de c , on peut mettre à profit l'architecture arcs-nœuds constituée par les **WaterBranch** et les **WaterPoint** des structures de groupe de circulation de l'eau pour représenter des déséquilibres dans la répartition de l'eau dans un réseau. Les courbes 74 illustrent l'effet du paramètre c .

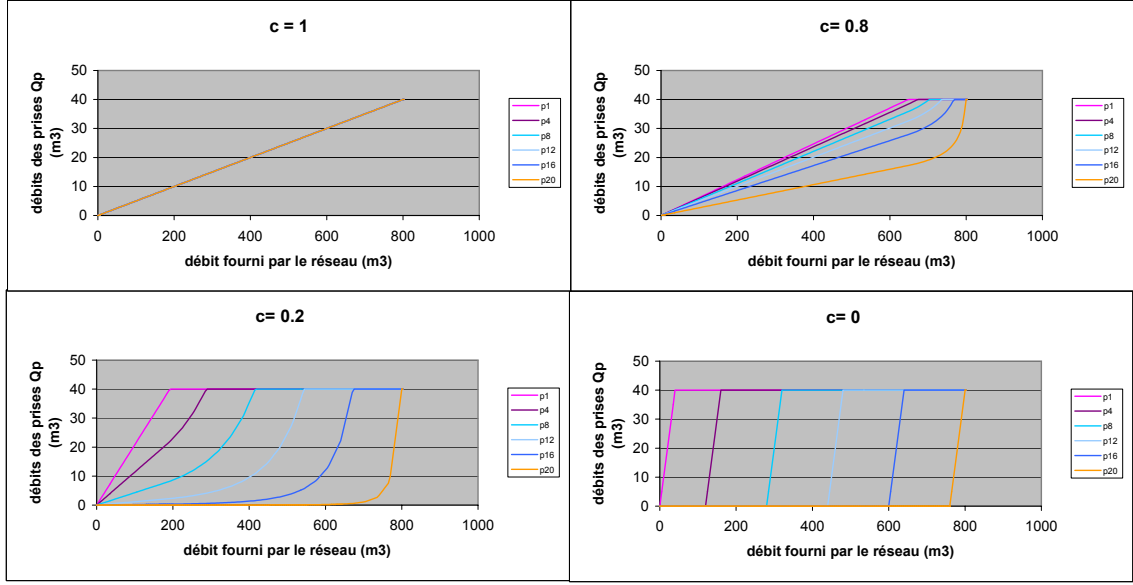


FIG. 74 – Effet du paramètre c sur la répartition amont-aval dans la ligne d'un réseau comprenant 20 pompes ayant toutes une demande de $40 \text{ m}^3/\text{h}$. Seules 6 de ces pompes, numérotées de l'amont vers l'aval sont représentées. En abscisse est représenté le débit disponible à l'entrée du réseau. Ainsi, lorsque le débit disponible est de $400 \text{ m}^3/\text{h}$: si $c=0$, les 10 premières pompes reçoivent leurs $40 \text{ m}^3/\text{h}$, les 10 dernières ne reçoivent rien ; si $c = 1$, toutes les pompes reçoivent $20 \text{ m}^3/\text{h}$; si $c = 0.2$, les 8 premières pompes reçoivent leurs $40 \text{ m}^3/\text{h}$, la 12eme pompe reçoit environ $10 \text{ m}^3/\text{h}$, et les 5 dernières pompes ne reçoivent rien ; si $c = 0.8$, les premières pompes reçoivent environ $25 \text{ m}^3/\text{h}$, et la dernière environ $10 \text{ m}^3/\text{h}$.

2.2 Une nouvelle règle de gestion dans les réseaux

Afin d'évaluer le coût de l'ajout d'un nouveau type de règle collective dans le modèle, on a introduit une nouvelle règle de gestion collective, largement irréaliste, au niveau des réseaux : attribution préférentielle de l'eau aux parcelles les plus légères lors des périodes de crise.

Pour que cette règle soit implémentée, il faut que :

- les irrigants déclarent chaque jour le débit qu'ils demanderont le jour suivant, et la parcelle qu'ils irriguent au président du réseau ;
- le président calcule les débits attribués à chacun en fonction des types de sol des parcelles, et communique ces débits aux abonnés ;
- les irrigants utilisent le débit qui leur est attribué lors de l'irrigation.

Le schéma dynamique local correspondant est présenté figure 75.

Dans le modèle, les règles collectives sont représentées sous la forme de contraintes, et leur mise en œuvre sous la forme de rôles. Les contraintes à définir sont :

- déclaration quotidienne de l'irrigation du lendemain : création d'un nouveau type de contrainte `#askWater`, précisant la fréquence à laquelle la déclaration doit se faire, et quelles sont les informations à déclarer ;
- limitation du débit à une valeur donnée : utilisation de la contrainte `#flowLimitFixed`, qui existe déjà dans le modèle-jouet.

Les données concernant la nouvelle contrainte sont spécifiées dans les tableaux 34, 35 et 36.

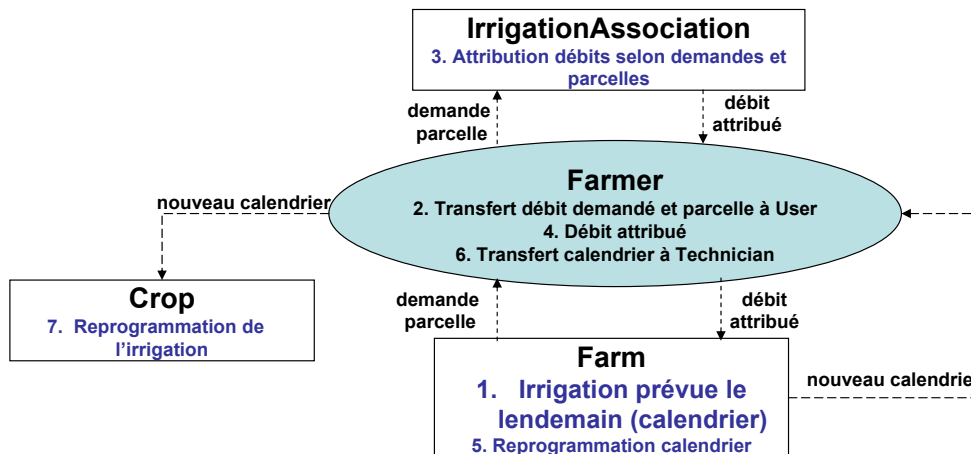


FIG. 75 – Schéma dynamique local de la mise en œuvre d'une règle d'attribution des débits en fonction des types de sol

Règle représentée	type	args
Tous les freq jours, les informations décrites par infos doivent être envoyées au gestionnaire du niveau d'où vient la contrainte	askWater	fréquence de la déclaration (en jours) : freq informations de la déclaration : infos

TAB. 34 – Description de la contrainte **askWater**

Type Contrainte	ManagerIrri (structure de groupe Farm)
askWater	Déclaration des informations demandées par info tous les freq jours. Si freq = 0, les déclarations s'arrêtent

TAB. 35 – Interprétation de la contrainte **askWater**

Émetteur	Récepteurs	type	crisis	args
IrrigationAssociation	tous User du groupe	askWater	1/2	freq = 1 infos = #flow,#plot
			0	freq = 0 infos = ∅
IrrigationAssociation	tous User du groupe	flowLimitFixed	1/2	v selon débit attribué
			0	v = capacité prise

TAB. 36 – Paramétrisation des contraintes **askWater** et **flowLimitFixed**

Au niveau individuel :

- les irrigants doivent être capables d'interpréter la nouvelle contrainte : il faut donc étendre le rôle **ManagerIrri** de manière à ce que lorsqu'il reçoit la contrainte **askWater**, il programme la déclaration quotidienne de son irrigation du lendemain (les **ManagerIrri** savent déjà interpréter la contrainte **#flowLimitFixed**).

On ne crée pas un nouveau rôle parce qu'on considère que l'interprétation d'un nouveau type de contrainte ne constitue pas un nouveau type de comportement ;

- un nouveau comportement de gestionnaire de réseau doit être spécifié, qui envoie la contrainte `#askWater` aux irrigants, et effectue tous les jours le calcul des débits attribués en fonction des déclarations reçues. On crée un nouveau rôle `ManagerFlowForSoil`, qui sous-classe le rôle `Manager` existant pour coder ce nouveau comportement. Ce rôle est pris en charge lors des passages en crise 1, et abandonné lors du retour à la normale (figure 76).

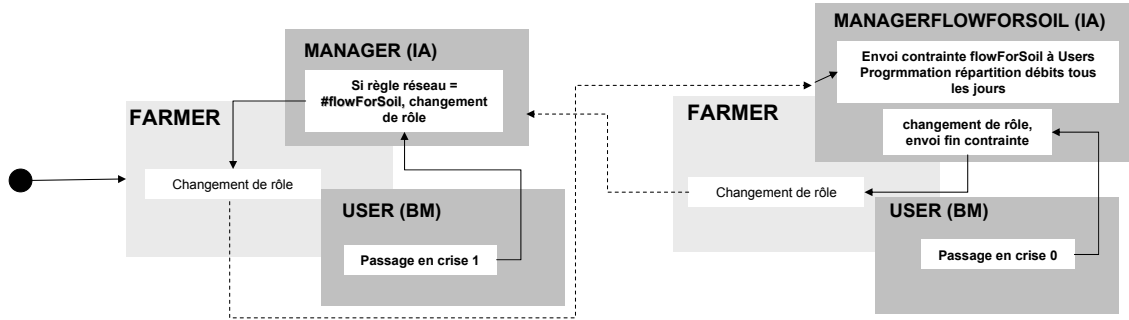


FIG. 76 – Diagramme de composition des rôles des transitions autour du rôle `ManagerFlowForSoil` de `IrrigationAssociation`

L'introduction d'un nouveau type de règle collective dans les associations d'irrigants s'est traduite par

- la création d'un nouveau type de contrainte ;
- l'extension du rôle responsable de la gestion d'une exploitation de manière à ce que la contrainte puisse être interprétée ;
- la création d'un nouveau rôle de gestionnaire de l'association d'irrigants, parce que la nouvelle règle demande à ce que le gestionnaire de l'association se comporte différemment.

Le coût de cette extension est finalement faible (une journée de travail).

2.3 Décomposition de la prise de décision sur la gestion des irrigations

2.3.1 Nouvelles hypothèses de modélisation

On se propose dans GibiH de diversifier les décisions concernant les irrigations sous 3 angles comme décrit ci-dessous.

Définition des doses d'irrigation Dans le modèle-jouet et GibiAGR, tous les irrigants apportent la même dose fixe à leur culture. On se propose de diversifier ce comportement en introduisant 2 nouveaux modes de calcul de la dose apportée, et en représentant ainsi 3 modes de calcul :

- irrigation « fixe » : l'agriculteur irrigue avec une dose fixe ;

- irrigation « pointue » : l'agriculteur irrigue en fonction des besoins de la culture. Il utilise pour cela des informations, pas forcément correctes, sur l'ETP et le Kc de la culture, ainsi que sur la quantité d'eau présente dans le sol ;
- irrigation par « imitation » : l'agriculteur irrigue de la même manière que l'un de ses voisins pratiquant le même type de culture.

Définition d'un calendrier d'irrigation Dans la réalité, les agriculteurs règlent leurs irrigations en modulant la durée du temps d'irrigation le débit des pompes restant fixe, égal à la capacité des pompes. Ceci a pour effet :

- à un niveau individuel, d'ajouter une marge de manœuvre sur la programmation des irrigations en jouant sur l'heure où l'irrigation se fait ;
- à un niveau collectif, de créer des pics d'irrigation lorsque les conditions sont les plus favorables (la nuit, lorsqu'il n'y a pas de vent). Ainsi le débit instantané pompé dans la rivière varie dans la journée.

L'utilisation d'une gestion du temps par événements permet de représenter ces variations de débit instantané et cette marge de manœuvre dans le temps, ce que ne permet pas un pas de temps fixe. On se propose donc de rajouter cette possibilité dans GibiH. On obtient ainsi 2 modes de définition des calendriers d'irrigation :

- calendriers définis en « modulation de débit » : les irrigations ont lieu toute la journée, la dose est modulée en jouant sur le débit de la pompe ;
- calendriers définis en « modulation par le temps » : la pompe fonctionne à débit maximal, et la dose est modulée en jouant sur la durée de l'irrigation. Il existe alors plusieurs manières de définir le calendrier : irrigation de jour, irrigation de nuit, 1 ou 2 irrigations par jour...

Comportement de crise Dans le modèle jouet et GibiAGR, il est fait l'hypothèse que les agriculteurs modifient leur comportement en prévision des restrictions éventuelles en période de crise en rajoutant une irrigation le dimanche, jour où ils n'irriguent normalement pas.

On se propose d'introduire un second type de comportement de crise, qui est d'utiliser au maximum la ressource (irrigation à débit maximum toute la journée) durant les périodes de crise. Ce type de comportement est irréaliste et devrait plutôt avoir lieu *a posteriori*, pour rattraper l'effet des restrictions. Il a surtout été introduit ainsi pour tester les possibilités de diversification des comportements dans les modèles.

Il est à noter que ce type de comportement est issu d'une incertitude sur l'effet des restrictions.

2.3.2 Traduction AGR : création de nouvelles hiérarchie de rôles

Dans GibiAGR et le modèle-jouet, toutes les décisions concernant l'irrigation (prise en compte des contraintes, calcul des doses, définition du calendrier d'irrigation) sont prises par le rôle **ManagerIrri**, et le comportement de crise est représenté par une sous-classe de ce rôle (voir section 3.1 du chapitre 5). Le maintien de l'ensemble de ces décisions dans une hiérarchie de rôles uniques n'est pas viable si l'on veut pouvoir représenter différentes combinaisons entre les types de décisions possibles.

Ainsi, de même que différentes hiérarchies de rôles ont été utilisées pour représenter les différentes phases du comportement de l'agriculteur (voir section 2.3.2 du chapitre 5), on utilisera différentes hiérarchies de rôles pour représenter les décisions de différents types. Durant la phase d'irrigation, la gestion de l'irrigation dans l'exploitation ne sera alors plus représentée par un rôle unique, mais par plusieurs rôles simultanés agissant autour du calendrier d'irrigation (diagramme de classes, figure 77) :

- la hiérarchie des rôles **ManagerIrri** se spécialise dans le calcul de la quantité à irriguer ;
- la hiérarchie des rôles **CalendarManager** est responsable de la mise en œuvre de la répartition de ces doses. Les rôles **CalendarManager** ne décident de rien, ils savent juste calculer la répartition des irrigations selon les contraintes ;
- la hiérarchie des rôles **ManagerCrisis** est responsable de la mise en œuvre de comportements de crise. Les rôles **ManagerCrisis** décident de modifications du calendrier d'irrigation qu'ils communiquent aux rôles **CalendarManager**.

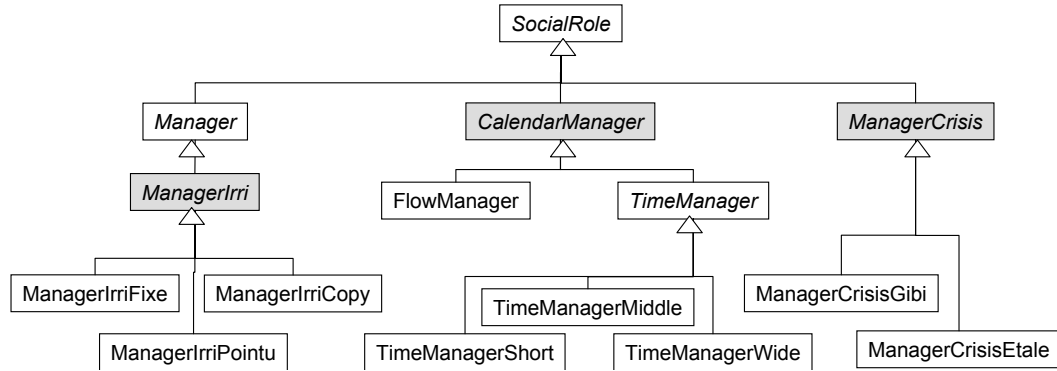


FIG. 77 – Diagramme des classes des hiérarchies de rôles induites par la diversification des décisions sur l'irrigation

Ainsi, durant la phase d'irrigation, un agriculteur (qui n'est pas par ailleurs président de réseau) prend simultanément en charge (diagramme swimlane, figure 78) :

- un rôle de type **User** qui transmet les règles collectives du niveau où l'exploitation est connectée, ainsi que les changements de niveau de crise. Dans le modèle, les contraintes imposées par les règles collectives sont toujours suivies, mais ce seraient les rôles de cette hiérarchie qui pourraient décider ou pas du respect des règles collectives d'un niveau en choisissant de transmettre ces contraintes entièrement, partiellement ou pas du tout à leur rôle **ManagerIrri** ;
- un rôle de type **ManagerIrri** qui détermine les doses d'irrigation à apporter à chaque type de culture, et intègre les contraintes transmises par le rôle **User** en aménagements de calendrier demandés au rôle **CalendarManager** ;
- un rôle de type **CalendarManager** qui construit un calendrier d'irrigation apportant les doses demandées par **ManagerIrri** selon des critères spécifiques. Il met aussi en œuvre les aménagements de calendrier demandés par ce même rôle pour respecter les règles collectives des niveaux supérieurs ;
- un rôle **Technician** qui met en œuvre le calendrier fixé par **CalendarManager** ;
- enfin, durant les périodes de crise, un rôle de type **ManagerCrisis** est aussi pris en charge. Ce rôle peut redéfinir les doses d'irrigation et demander au **CalendarManager** de nouveaux aménagements de calendrier.

D'un point de vue dynamique (diagramme de composition des rôle, figure 79) :

- lors du passage en phase d'irrigation (lancement d'une irrigation), les rôles de type **ManagerIrri** et **CalendarManager** sont pris en charge. A l'initialisation les doses et le calendrier de référence (calendrier idéal, ne tenant pas compte de contraintes collectives) sont calculés, puis le rôle **User** fournit les règles collectives qui contraignent la programmation du calendrier d'irrigation réellement utilisé ;

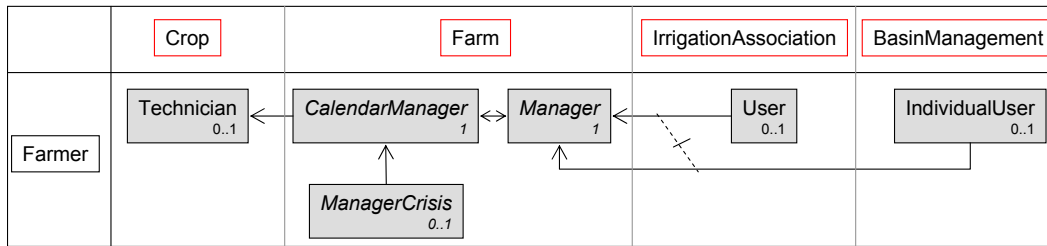


FIG. 78 – Diagramme swimlane des différents rôles portés par un Farmer autour de l'irrigation

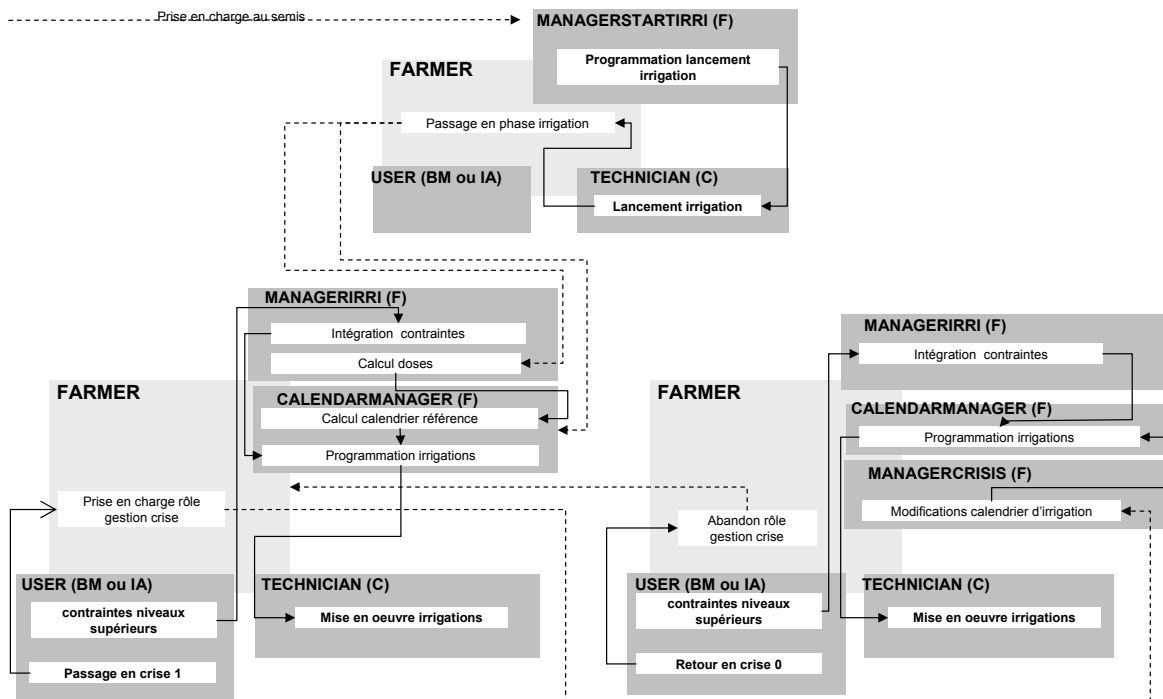


FIG. 79 – Diagramme de composition des rôles liés aux décisions autour de l'irrigation

- définition du calendrier idéal
 - **ManagerIrri** définit les doses à apporter sur chaque type de culture (**plantsIrriRef**);
 - **CalendarManager** calcule un calendrier idéal (**calendarRef**) en tenant compte des informations fournies par **ManagerIrri** et de ses propres préférences;
- définition du calendrier réellement utilisé :
 - **ManagerIrri** interprète les contraintes issues des niveaux supérieurs, et fournit à **CalendarManager** les limites en débit ou en temps correspondantes;
 - **CalendarManager** calcule le calendrier en fonction de ces limites, et fournit les événements correspondants à **Technician**;
 - **Technician** programme les irrigations;
- périodes de crise : lors des périodes de crise, un rôle **ManagerCrisis** est pris en charge. Ce rôle vient fournir des nouvelles doses et des nouveaux jours à **CalendarManager**. La gestion de conflits éventuels entre **ManagerIrri** et **ManagerCrisis** est gérée au niveau

de **ManagerIrri**, qui laisse la main au rôle de gestion de crise sur certaines informations durant les période de crise.

La diversification des décisions autour de l'irrigation selon différents angles (diversification des décisions concernant les doses apportées, diversification des décisions concernant la programmation des irrigations, diversification des décisions concernant les comportements de crise) conduit à décomposer cette prise de décision à travers 3 types de rôles pris en charge simultanément et communiquant autour du calendrier d'irrigation.

L'introduction d'une nouvelle règle de comportement sur la répartition des irrigations a donc conduit à revoir l'organisation des rôles autour de la gestion de l'irrigation. Le coût de cette extension est donc plus important que l'ajout d'une nouvelle modalité à une règle de comportement déjà existante.

La gestion de conflits entre 2 rôles susceptibles de fournir des informations contradictoires est faite au niveau d'un des 2 rôles qui laisse la main à l'autre dans certaines conditions. Cette solution rend les rôles interdépendants et restreint donc la modularité du modèle.

2.4 Diversification des stratégies des irrigants

On détaille maintenant les extensions amenées par la diversification des rôles des **Farmer** dans les différentes phases de la simulation.

2.4.1 Diversification de l'assolement

On introduit deux nouveaux types de plantes : la tomate et le maïs semence. Ces nouveaux types sont représentés par deux nouvelles classes dans la hiérarchie de l'objet **Plant**. Elles n'introduisent pas de nouveaux comportements mais définissent de nouvelles valeurs pour les données culturelles (diagramme des classes, figure 80).

On introduit aussi deux nouveaux rôles caractérisant des choix d'assolement dans la hiérarchie du rôle abstrait **ManagerSow** :

- **ManagerSowDiversified** représente le choix d'un assolement diversifié : il sème 4 parcelles de maïs, 1 parcelles de maïs semence, et 1 parcelle de tomate ;
- **ManagerSowAudacious** représente le choix d'un assolement spécialisé : il sème 3 parcelles de tomate, 2 parcelles de maïs semence, et 1 parcelle de maïs.

La programmation des dates de semis pour chacun des types de plante reste au niveau de **ManagerSow**, puisqu'elle reste la même quelque soit le choix d'assolement. Cette méthode a été modifiée par rapport au modèle jouet : plutôt que de tirer les dates de semis en parcourant jour après jour un intervalle avec 40% de chance, les dates sont tirées par une loi normale dont la moyenne est le centre de l'intervalle, et l'écart type est égal au quart de la largeur de l'intervalle. Si le jour tiré sort de l'intervalle, il est retiré.

L'introduction de nouveaux types d'assolements oblige à gérer sur une même exploitation des cycles de culture (semis, irrigation, récolte) décalés : les phases de comportement pour chacune des cultures se chevauchent. Pour pouvoir gérer cela, on autorise la prise en charge simultanée de rôles de type semis, lancement de l'irrigation, gestion de l'irrigation et récolte, et on modifie les conditions de prise en charge et d'abandon de ces rôles (tableau 37, à comparer avec tableau 23 du chapitre 5).

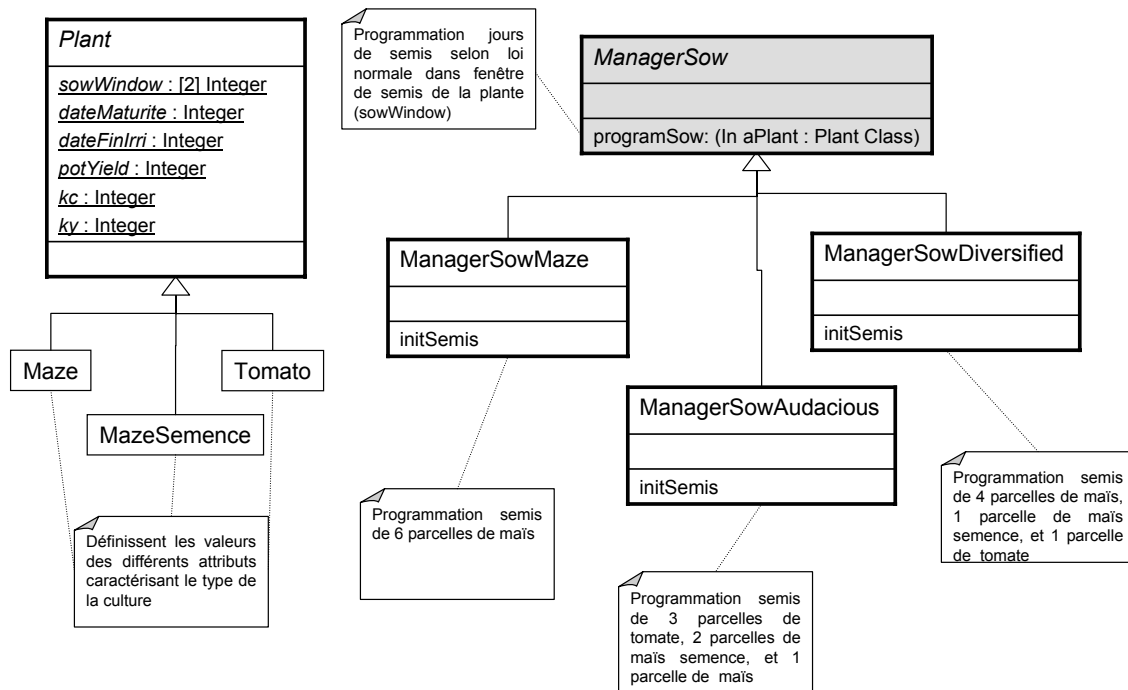


FIG. 80 – Diagramme des classes des rôles de semis et des types de plantes

Ces prises en charge et abandons sont modifiés au niveau de **Farmer**, sans toucher au contenu des rôles sinon leur faire renvoyer de nouvelles informations.

Rôle	Prise en charge (ERi+ : étiquette pour l'événement entraînant la prise en charge du ième rôle)	Abandon (ERi- : étiquette pour l'événement entraînant l'abandon du ième rôle)
ManagerSow : assolement et programmation des semis	ER1+. Initialisation de la simulation	ER1-. Toutes parcelles semées
ManagerStartIrri : programmation du lancement de l'irrigation	ER2+. Semis de la 1ère parcelle	ER2-. Irrigations lancées sur tous les types de culture de l'exploitation
ManagerIrri : décision sur les doses d'irrigation	ER3+. Première irrigation lancée	ER3-. Irrigations arrêtées sur tous les types de culture de l'exploitation
CalendarManager : programmation des irrigations	ER3'+. Première irrigation lancée	ER3'-. Irrigations arrêtées sur tous les types de culture de l'exploitation
ManagerCrisis : comportement de crise	ER4+. début crise	ER4-. Fin crise
ManagerHarvest : programmation de la récolte	ER5+. Arrêt de l'irrigation sur un type de culture	ER5. Fin de la simulation

TAB. 37 – Prise en charge et abandon des rôles sociaux de GibiH

À chaque fois qu'une culture est semée, **Farmer** prévient son rôle **ManagerStartIrri** (ou le prend en charge si c'est la première culture) de programmer le lancement d'irrigation sur cette culture; à chaque fois qu'une irrigation est lancée, **Farmer** prévient son rôle **ManagerIrri** de calculer les doses sur cette culture.

La diversification de l'assolement et des choix d'assolements a pour conséquence de modifier les conditions de prise en charge et d'abandon des rôles correspondant aux différentes phases du cycle de culture afin de pouvoir gérer la superposition de ces cycles pour les différents assolements.

2.4.2 Diversification du lancement et du calcul des doses des irrigations

On introduit de nouveaux comportements de lancement et de gestion de l'irrigation (diagramme des classes, figure 81).

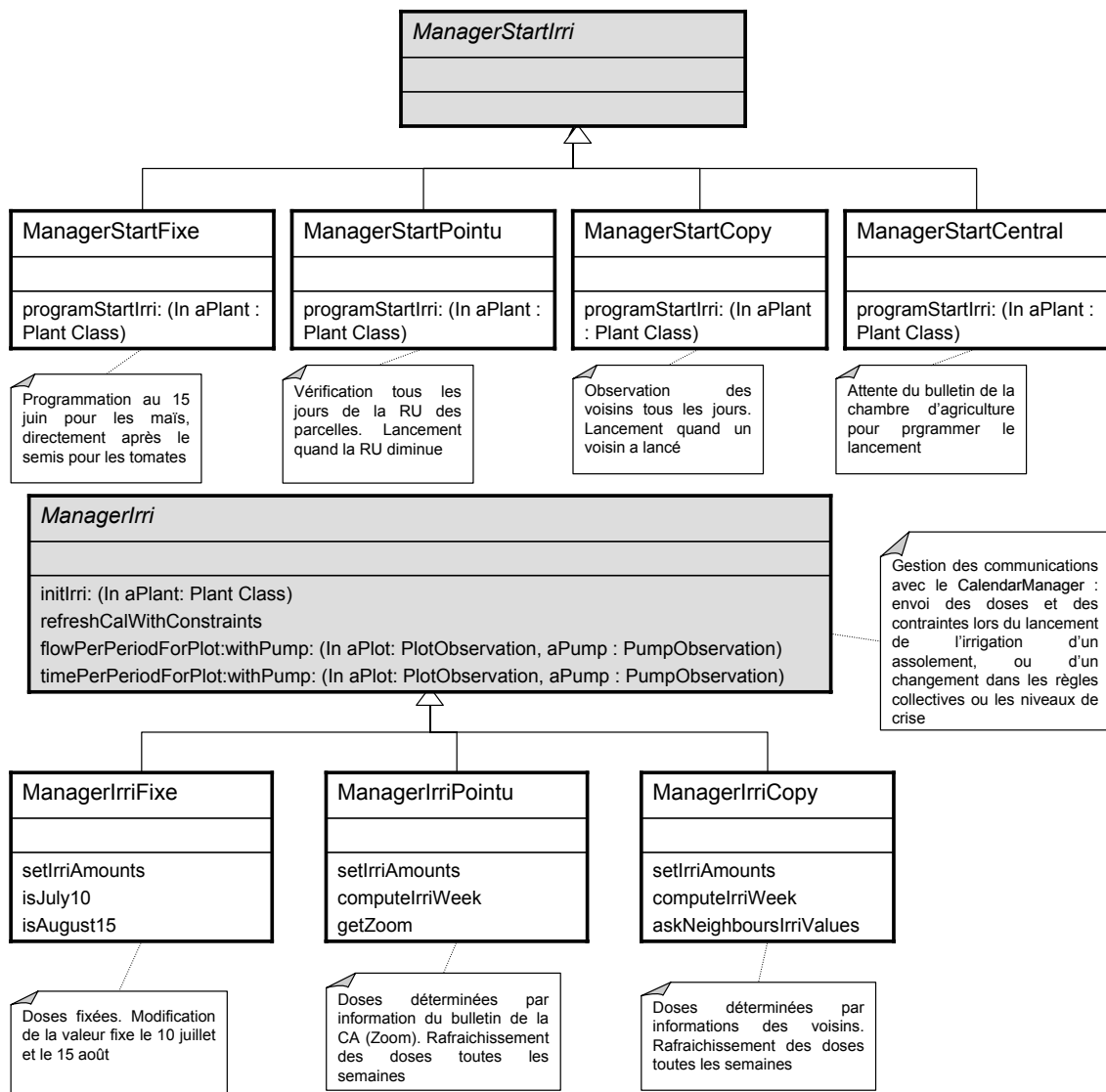


FIG. 81 – Diagramme des classes des rôles de lancement de l'irrigation et de gestion de l'irrigation

Comportements pointus Les comportements de type « pointu » utilisent des informations fournies par une observation de leurs parcelles d’une part, et par le bulletin envoyé par la chambre d’agriculture (voir 1.3) d’autre part pour établir des dates de lancement ou des doses d’irrigation :

- lancement quand la valeur de RU observée sur une parcelle commence à baisser ;
- détermination d’un besoin en eau pour chaque assolement en fonction des valeurs d’ETP et de Kc envoyées par la Chambre. Ces besoins en eau sont valables pour la semaine à venir, et rafraîchis chaque semaine. La dose appliquée pour chaque parcelle est ensuite limitée par la quantité d’eau que peut recevoir le sol de la parcelle.

Les informations fournies par la chambre sont des valeurs moyennes pour la semaine à venir. Elles proviennent des séries climatiques. Un paramètre du rôle **Expert** détermine le pourcentage d’erreur de ces informations.

Comportements de copie On représente des comportements de copie. Il faut donc d’abord décrire un voisinage. On définit pour cela un nouveau niveau d’organisation. On modélise a priori un voisinage à 3 voisins (figure 82) :

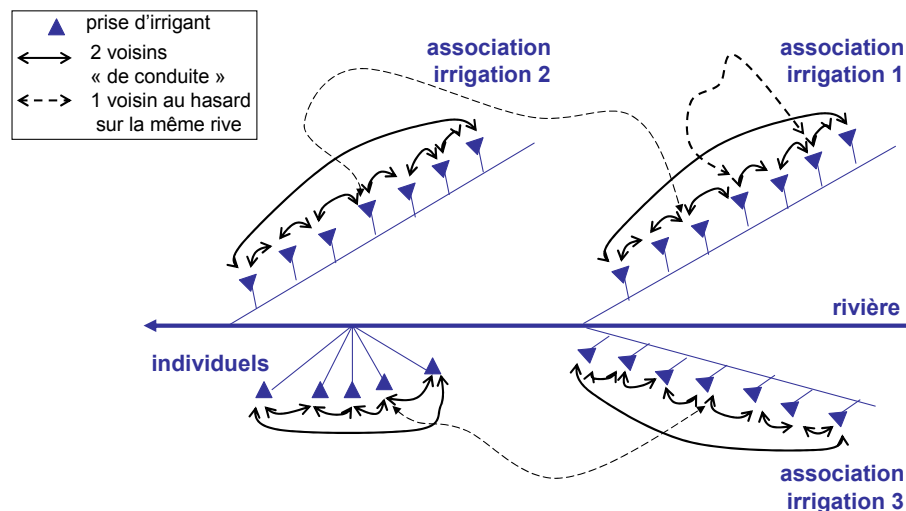


FIG. 82 – Structure du réseau de voisinage dans le système complet

- chaque irrigant a pour voisins l’irrigant directement en amont et celui directement en aval (« voisins de conduite »). Le voisinage sur la conduite est ouvert : l’irrigant le plus en amont et celui le plus en aval sont « voisins ». Cette dernière hypothèse a été faite afin que tout le monde ait 3 voisins, mais n’est pas réaliste ;
- chaque irrigant a un voisin choisi au hasard sur la rive (hors les 2 voisins de conduite). Ce voisin représente un facteur d’éparpillement des exploitations.

Tous les liens de voisinage sont réciproques.

Ainsi, les conduites forment des réseaux linéaires ouverts reliés par des liens aléatoires sur chacune des rives, et le réseau de voisinage est constitué de manière à ce que chaque rive soit entièrement connexe.

Les comportements de copie sont les suivants :

- lancement de l’irrigation : **ManagerStartCopy** choisit de suivre pour chacune de ses cultures le premier voisin à mettre en œuvre une irrigation sur ce type de culture. Si aucun de ses

voisins n'a planté une de ces cultures, il inclut les voisins de ses voisins dans son voisinage jusqu'à trouver la culture.

Le voisin suivi pour le lancement de l'irrigation sur une culture devient le voisin de référence pour cette culture.

- irrigation : toutes les semaines, et pour chaque type de culture, **ManagerIrriCopy** demande à son voisin de référence quels sont les besoins en eau sur lesquels il se base, et utilise les mêmes.

L'introduction de comportements utilisant des informations fournies par un expert ou des voisins amène la mise au point de nouveaux types d'hypothèses

- sur l'exactitude des informations fournies ;
 - sur la forme de réseaux de voisinage.
-

2.4.3 Diversification du niveau de contrainte en eau et du mode de programmation des irrigations

On se propose dans GibiH de diversifier le niveau de contrainte sur la ressource en eau pour chaque exploitation (capacité de la pompe de l'exploitation). Les différentes capacités ont été fixées afin de générer des comportements caricaturaux :

- irriguer toutes la journée pour mettre 50 mm : $45 \text{ m}^3/\text{h}$ (petite capacité)
- irriguer 1/2 journée pour mettre 50 mm : $90 \text{ m}^3/\text{h}$ (capacité moyenne)
- irriguer 1/2 journée pour mettre 50 mm sur 2 parcelles : $200 \text{ m}^3/\text{h}$ (grande capacité - il y a obligatoirement une pause d'une heure entre 2 irrigations - contrainte de l'implémentation). Cette dernière capacité est irréaliste (environ $17 \text{ m}^3/\text{h/ha}$ alors que $10 \text{ m}^3/\text{h/ha}$ représente déjà une très grosse capacité), mais est introduit pour tester la souplesse du formalisme.

Ces différentes capacités s'ajoutent à celles qui étaient utilisées dans le modèle-jouet ($40 \text{ m}^3/\text{h}$), déterminées par la capacité totale des réseaux.

A chacun de ces niveaux de ressource est associé un comportement de programmation du calendrier d'irrigation, défini par un rôle **CalendarManager** (voir figure 77). Tous ces rôles intègrent les éventuels jours d'arrêt définis dans les règles collectives de tour d'eau dans la programmation du calendrier :

- **FlowManager** est associé à la capacité de $40 \text{ m}^3/\text{h}$. Il reproduit le comportement des irrigants du modèle-jouet et de GibiAGR : l'irrigation d'une parcelle est programmée sur 23 heures, et la dose est modifiée en modulant le débit de la pompe.
FlowManager programme donc 6 jours d'irrigation par semaine. Le jour sans irrigation est le premier des jours d'arrêt, ou à défaut le dimanche ;
- **TimeManagerShort** est associé à la petite capacité. Il programme l'irrigation d'une parcelle chaque jour à partir de minuit, durant le nombre d'heures nécessaire avec un débit égal à la capacité de la pompe.
TimeManagerShort programme donc 6 jours d'irrigation par semaine. Le jour sans irrigation est le premier des jours d'arrêt, ou à défaut le dimanche ;
- **TimeManagerMiddle** est associé à la capacité moyenne. Il programme l'irrigation d'une parcelle chaque jour à partir de minuit, durant le nombre d'heures nécessaire avec un débit égal à la capacité de la pompe.

TimeManagerMiddle programme donc 6 jours d'irrigation par semaine. Le jour sans irrigation est le premier des jours d'arrêt, ou à défaut le dimanche ;

- **TimeManagerMiddle** est associé à la grande capacité. Il programme l'irrigation de 2 parcelles chaque jour à partir de minuit, durant le nombre d'heures nécessaire avec un débit égal à la capacité de la pompe, avec 1 heure d'arrêt entre les 2 parcelles.

TimeManagerMiddle programme donc 3 jours d'irrigation par semaine. Ces 3 jours sont contigus et juste avant le 1er jour d'arrêt si des jours d'arrêt sont définis, ou tirés au hasard de manière à éviter le dimanche sinon.

On voit que **TimeManagerShort** et **TimeManagerMiddle** sont équivalents. Ces comportements demanderaient à être retravaillés pour représenter des comportements plus différenciés, intégrant des reports ou des facteurs d'aversion au risque.

2.4.4 Diversification des comportements de crise

Les 2 comportements de crise sont définis par 2 rôles dans la hiérarchie **ManagerCrisis** :

- **ManagerCrisisGibi** sélectionne tous les samedis la parcelle la plus sèche, et programme son irrigation pour le lendemain ; en cas de tour d'eau, il ne fait rien, puisque le jour sans irrigation correspond au jour d'arrêt, où l'irrigation est interdite en cas de crise ;
- **ManagerCrisisEtale** modifie en plus les doses apportées durant la semaine en demandant au rôle **CalendarManager** d'apporter la dose maximale : **FlowManager** programme le débit maximal, et les **TimeManager** programment les irrigations sur toute la journée (**TimeManagerWide** continue à programmer 2 irrigations par jour).

Encore une fois les hypothèses de modélisation de ces comportements, qui ont été introduits afin de tester la souplesse du formalisme, seraient à retravailler.

2.4.5 Bilan

Les pratiques culturales finalement implémentées sont listées dans le tableau 38.

Compatibilité des différents rôles En définissant des modalités de stratégies à travers différents rôles, on peut définir des types d'agriculteur par la donnée de la série des rôles qu'ils prendront en charge pendant une saison.

Il y a alors des hypothèse de modélisation à faire sur les rôles compatibles les uns avec les autres. Par exemple, la prise en charge d'un rôle **ManagerSowAudacious**, qui implique la mise en place d'un assolement spécialisé nécessitant une irrigation bien adaptée n'est pas compatible avec la prise en charge d'un rôle **ManagerIrriCopy**.

Ce travail de caractérisation des rôles qui peuvent aller ou ne pas aller ensemble est à creuser. Il constitue sans doute une bonne base de dialogue avec les thématiciens ou les acteurs, ou de définition d'un jeu de rôles.

Pratique	Rôle	Maïs	Maïs semence	Tomate
Semis	Tous ManagerSow	Aléatoire (tirage selon loi normale) entre 1er et 30 avril	Aléatoire (tirage selon loi normale) entre 10 et 31 mai	Aléatoire (tirage selon loi normale) entre 10 et 31 mai
Lancement Irrigation	ManagerStartFixe	15 juin	15 juin	Au semis
	ManagerStartCentral	Quand $\frac{\sum ru}{\sum ru_{max}} < 0.9$ sur un échantillon de 10 parcelles du bassin		Au semis ^a
	ManagerStartPointu	Quand $\frac{rfu}{rfu_{max}} < 0.05$ sur une parcelle de l'exploitation		Au semis ^b
	ManagerStartCopy	Le lendemain du lancement du premier voisin ayant la même culture, à avoir lancé son irrigation		
Doses irrigation hebdomadaires	ManagerIrriFixe	30 mm jusqu'au 10 juillet, puis 40 mm jusqu'au 14 août, puis 30 mm	30 mm	15 mm jusqu'au 1er juillet, puis 35 mm
	ManagerIrriPointu	$\min(7 * \overline{etp} * \overline{k_c}, ru_{max} + \overline{etp} * \overline{k_c})^c$; $\overline{etp}$ et $\overline{k_c}$ sont fournies par la chambre d'agriculture chaque semaine		
	ManagerIrriCopy	mêmes doses que le voisin de référence (celui qui a été suivi pour le lancement)		
Programmation des irrigations	FlowManager	étalées sur la journée, modulation par le débit		
	TimeManagerShort	1 irrigation par jour à débit maximum à partir de minuit, modulation par la durée		
	TimeManagerMiddle	1 irrigation par jour à débit maximum à partir de minuit, modulation par la durée		
	TimeManagerWide	1 irrigation par jour à débit maximum à partir de minuit, modulation par la durée		
Situations de crise	ManagerCrisisGibi	rajout d'une irrigation le dimanche (parcelle la plus sèche) - rien si tours d'eau		
	ManagerCrisisEtale	rajout d'une irrigation + apports quotidiens au maximum		
Arrêt irrigation	Tous ManagerIrri	Date semis + 156 jours	Date semis + 98 jours	Date semis + 90 jours
Récolte	ManagerHarvest	Date semis + 158 jours	Date semis + 100 jours	Date semis + 120 jours

TAB. 38 – Pratiques culturelles implémentées dans les différents rôles

^aLe départ se fait toujours immédiatement pour la tomate car on ne dispose pas de données sur l'ETP avant le 10 juin, si bien que les lancements tenant compte de l'état du sol, qui est initialement plein interviennent forcément après le 10 juin, puisque dans le modèle les plantes ne consomment de l'eau que quand l'ETP est non nulle

^bid.

^c $\overline{etp} * \overline{k_c}$ représente la consommation journalière moyenne théorique de la plante durant la semaine. La dose est limitée par la profondeur du sol (à laquelle on ajoute une dose journalière qui est consommée directement le jour même de l'irrigation)

3 Présentation synthétique des 3 modèles

3.1 Présentation comparée des 3 modèles

Les 3 modèles sont comparés sous 3 points de vues :

Comportements individuels disponibles Chacun des modèles étend le précédent en définissant de nouveaux rôles, qui constituent de nouveaux comportements individuels modulaires disponibles pour le modélisateur. Le passage d'un modèle à un autre constitue alors une extension par diversification des rôles. Ce point de vue est présenté sur la figure 83.

Niveaux d'organisation Chacun des modèles peut étendre le précédent en définissant de nouveaux niveaux d'organisation, ou de nouvelles connections entre niveaux d'organisation (qui se traduisent en fait par la création de nouveaux rôles dans les structures de groupe concernées). Le passage d'un modèle à l'autre constitue alors une extension par modification de la structure AGR. Ce point de vue est présenté sur la figure 84.

Règles collectives chacun des modèles peut étendre le précédent en définissant de nouveaux types de règles collectives définies à un niveau et interprétées à un niveau plus élémentaires. L'ajout d'une règle collective se traduit par la définition d'un objet de type **Constraint** et par la définition de méthodes pour interpréter cette règle dans les rôles récepteurs. Le passage d'un modèle à l'autre constitue alors une extension par modification des informations transmises entre les niveaux. Ce point de vue est présenté sur la figure 85.

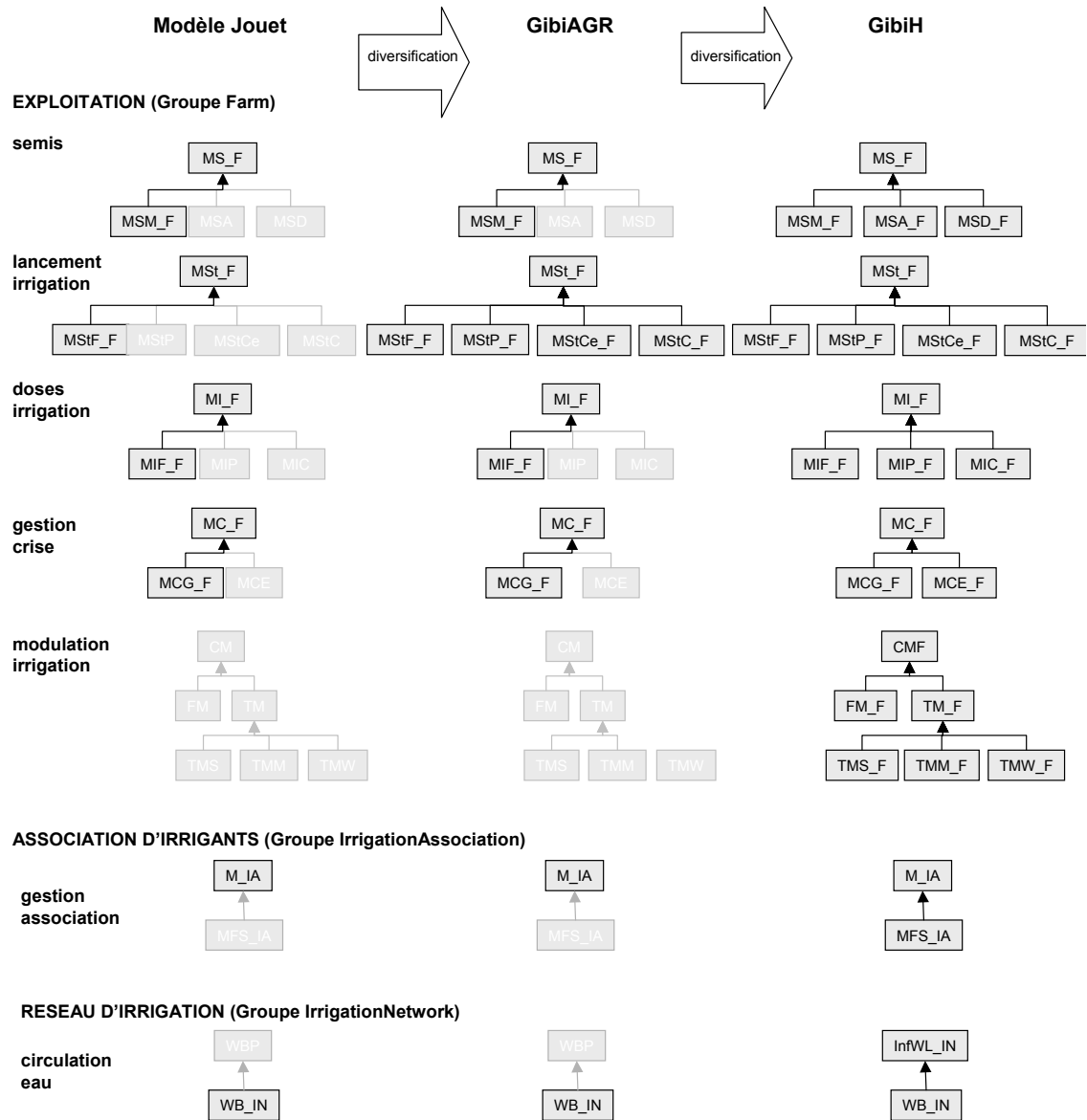


FIG. 83 – Présentation comparée des 3 modèles du point de vue des pratiques individuelles. Les rôles présents dans un modèle sont entièrement dessinés dans la colonne du modèle, ceux qui n'y sont pas sont atténués. Voir l'annexe F pour les abréviations.

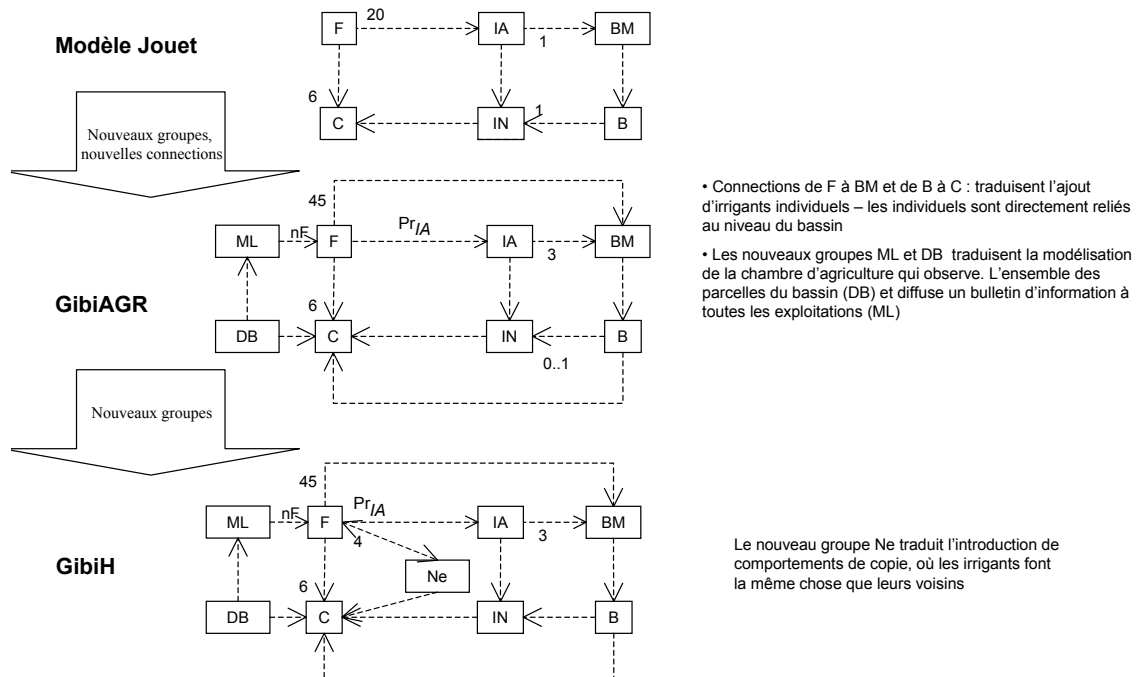


FIG. 84 – Présentation comparée des 3 modèles du point de vue des niveaux d'organisation (diagrammes fonctionnels globaux). Voir les annexes F et G pour les abréviations et les paramètres.

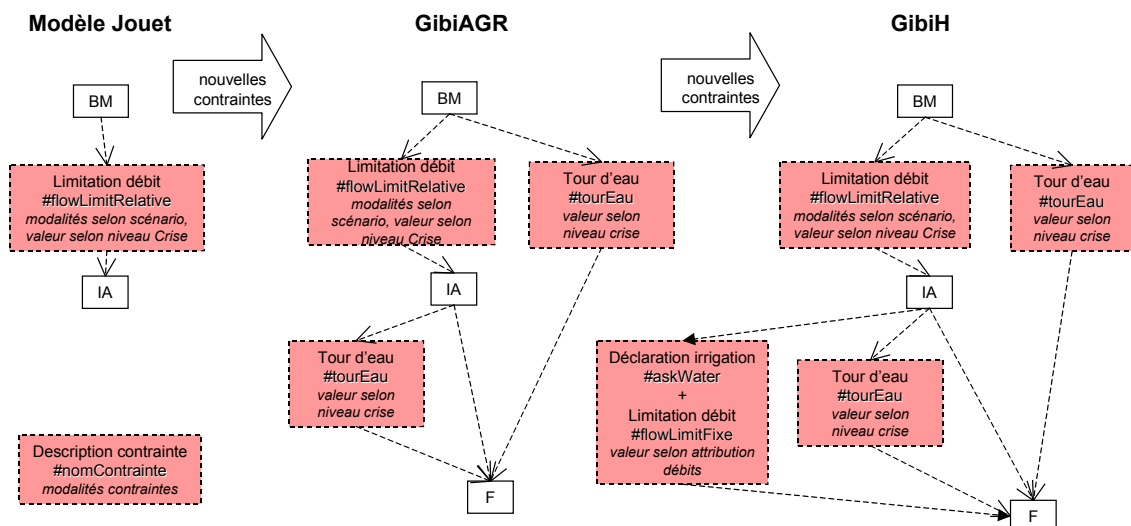


FIG. 85 – Présentation comparée des 3 modèles du point de vue des règles collectives. Si des niveaux sont reliés par 2 chemins, cela signifie que plusieurs types de règles collectives (éventuellement aucune) sont disponibles entre le niveau collectif et le niveau individuel (et une seule sera imposée par un scénario). Voir l'annexe F pour les abréviations.

3.2 Paramètres des modèles

La section précédente présentait les extensions pratiquées pour passer d'un modèle à un autre. Le modèle jouet, GibiAGR et GibiH constituent en fait des versions de plus en plus évoluées d'un même modèle. Cette section détaille les paramètres de ce modèle.

La liste complète des paramètres et leur description est donnée dans l'annexe [G](#).

On peut relier ces paramètres des modèles aux 3 points de vue de la section précédente, et les classer selon qu'ils déterminent :

- quels sont les agents instanciés dans une simulation, et quels sont leurs liens structurels (paramètres liés à la structure). Ces paramètres correspondent au diagramme structurel d'ORIGAMI ;
- quels sont les rôles pris en charge par les agents (paramètres liés aux types de comportements). Ces paramètres correspondent au diagramme swimlane et au diagramme de composition des rôles d'ORIGAMI ;
- quelles sont les contraintes qui circulent entre les niveaux sociaux (paramètres liées aux règles collectives) ;
- des variables internes ajustant les comportements d'agents ou de rôles (paramètres de réglage).

Le tableau [39](#) présente les paramètres indépendants des modèles, pour chacun des niveaux d'organisation auxquels ils s'appliquent, et suivant le type d'élément qu'ils fixent.

Niveau	Structure (n.o.)	Types de comportements (rôles)	Règles collectives (contraintes)	Paramètres de réglage
Global	<i>rCompl</i>			<i>clim</i>
Tableau de bord				<i>errClim</i> ; <i>errKc</i>
Bassin	<i>nInds</i> ; <i>nR</i>		<i>partageRestr</i> ; <i>refRestr</i>	<i>hObs</i>
Réseau	<i>nPr_i</i>		<i>rCol_i</i>	<i>capaMain_i</i> ; <i>surf_i</i>
Exploitation		<i>modCal</i> ; { <i>p</i> (MCE_F), <i>p</i> (MCG_F)} ; { <i>p</i> (MIC_F), <i>p</i> (MIF_F), <i>p</i> (MIP_F)} ; { <i>p</i> (MSA_F), <i>p</i> (MSD_F), <i>p</i> (MSM_F)} ; { <i>p</i> (MStC_F), <i>p</i> (MStCe_F), <i>p</i> (MStF_F), <i>p</i> (MStP_F)}		{ <i>p</i> (#short), <i>p</i> (#middle), <i>p</i> (#wide)} ;
Parcelle				{ <i>p</i> (#leger), <i>p</i> (#moyen), <i>p</i> (#profond)}

TAB. 39 – Paramètres indépendants des modèles : modes et niveaux d'application (voir l'annexe [G](#) pour la description des paramètres)

Quelques remarques complémentaires sur certains de ces paramètres :

- *hObs* : heure d'observation par la CLE du débit instantané dans la rivière. Ce paramètre est donc très significatif quand tous les irrigants n'irriguent plus en même temps ;
- *modCal* : quand *modCal* = #flow, la quantité irriguée se règle sur le débit des pompes, ce qui implique la simulation d'un pas de temps d'une journée identique pour tous les irrigants. Quand *modCal* = #time, la quantité irriguée se règle sur la durée d'irrigation, ce qui implique la simulation d'un pas de temps infraquotidien, propre à chaque irrigant. Chaque option impliquant donc une hypothèse forte de modélisation, on ne mélange pas les 2 types de gestion de calendrier d'irrigation dans une simulation.

Valeurs des paramètres pour chacun des modèles Si l'on considère les 3 modèles comme 3 versions plus ou moins évoluées d'un même modèle, GibiH en représente la forme la plus générale, alors que les 2 autres en représentent des formes restreintes, où certains paramètres ont été fixés. Le tableau 40 présente les valeurs des paramètres pour chacun des modèles. Certains paramètres de GibiH qui ne sont pas valables dans le modèle jouet ou dans GibiAGR sont signalés par la valeur *NE*. Cependant, puisqu'il est toujours possible de paramétrer GibiH pour retrouver les 2 modèles antérieurs, les valeurs correspondantes sont notées entre parenthèses.

Même si il est possible de jouer sur les paramètres structurels (nombre et taille des réseaux, surfaces irriguées...) pour représenter un autre système que celui de la Drôme, on se restreint à celui-ci, qui est le seul pour lequel on dispose de séries climatiques adaptées. Ainsi, dans le modèle jouet, où le système est plus simple et les prélèvements représentent environ $1/9^{eme}$ de ceux du système réel, les valeurs de débit des séries climatiques et des niveaux de restrictions et de relâchement sont ramenées à $1/9^{eme}$ de leur valeur.

Variables aléatoires Enfin, on liste dans le tableau 41 les variables aléatoires contenues dans les modèles pour donner une idée de leur niveau de stochasticité.

Trois types d'aléas apparaissent dans les modèles :

- aléas dans les conditions initiales : ces aléas rendent compte d'hypothèses de modélisation sur les scénarios simulés. Ils ne sont tirés qu'une seule fois, lorsqu'un scénario est initialisé ;
- aléas dans les dynamiques des modèles : ces aléas rendent compte d'hypothèses de modélisation sur les processus modélisés. Ils sont tirés à chaque fois que le processus concerné est activé durant la simulation ;
- aléas dus à des contraintes d'implémentation : ce sont par exemple les aléas générés par l'ordre d'activation des entités durant un cycle de simulation.

Les modèles sont finalement assez déterministes, et la plupart des variables aléatoires sont paramétrables. Le facteur de stochasticité le plus important et le moins prévisible est celui créé par la gestion du temps, puisque l'ordre d'activation des entités actives à une même date est aléatoire.

3. Présentation synthétique des 3 modèles

Paramètre	Valeur dans le modèle jouet	Valeur dans GibiAGR	Valeur dans GibiH
Niveau global			
<i>clim</i>	$\in \{1971..1996\}$ (débits divisés par 9)	$\in \{1971..1996\}$	$\in \{1971..1996\}$
<i>rCompl</i>	= #rien	$\in \{\text{\#rien}, \text{\#Juanons}\}$	$\in \{\text{\#rien}, \text{\#Juanons}\}$
Niveau du tableau de bord			
<i>errClim</i>	<i>NE</i> (= 0)	<i>NE</i> (= 0)	$\in [0, 1]$
<i>errKc</i>	<i>NE</i> (= 0)	<i>NE</i> (= 0)	$\in [0, 1]$
Niveau du bassin			
<i>nInds</i>	=0	=45	=45
<i>nR</i>	=1	=3	=3
<i>partageRestr</i>	$\in \{\text{\#apports}, \text{\#prelevements}\}$	$\in \{\text{\#apports}, \text{\#prelevements}\}$	$\in \{\text{\#apports}, \text{\#prelevements}\}$
<i>refRestr</i>	$\in \{\text{\#capacite}, \text{\#08maze}, \text{\#10maze}\}$	$\in \{\text{\#capacite}, \text{\#08maze}, \text{\#10maze}\}$	$\in \{\text{\#capacite}, \text{\#08maze}, \text{\#10maze}\}$
<i>hObs</i>	=12	=12	$\in \{0..23\}$
Niveau des réseaux			
<i>capaMain_i</i> (l/s)	=222	<i>capaMain₁</i> = 560, <i>capaMain₂</i> = 390, <i>capaMain₃</i> = 500	<i>capaMain₁</i> = 560, <i>capaMain₂</i> = 390, <i>capaMain₃</i> = 500
<i>capaCompl_{i,l}</i> (l/s)	=0	<i>capaCompl₂</i> = 0, <i>capaCompl₃</i> = 110 <i>capaCompl₁</i> = 25 si <i>rCompl</i> = Juanons, <i>capaCompl₁</i> = 225 sinon	<i>capaCompl₂</i> = 0, <i>capaCompl₃</i> = 110 <i>capaCompl₁</i> = 25 si <i>rCompl</i> = Juanons, <i>capaCompl₁</i> = 225 sinon
<i>nCompl_i</i>	=0	<i>nCompl₁</i> = 1, <i>nCompl₂</i> = 0, <i>nCompl₃</i> = 1	<i>nCompl₁</i> = 1, <i>nCompl₂</i> = 0, <i>nCompl₃</i> = 1
<i>nPr_i</i>	$= \frac{surf_i}{12}$	$= \frac{surf_i}{12}$	$= \frac{surf_i}{12}$
<i>rCol_i</i>	$\in \emptyset$	$\in \emptyset$	$\in \{\emptyset, \text{\#tourEau}\}$
<i>surf_i</i> (ha)	=240	<i>surf₁</i> = 650, <i>surf₂</i> = 400, <i>surf₃</i> = 580	<i>surf₁</i> = 650, <i>surf₂</i> = 400, <i>surf₃</i> = 580
Niveau des exploitations			
<i>modCal</i>	<i>NE</i> (= #flow)	<i>NE</i> (= #flow)	$\in \{\text{\#flow}, \text{\#time}\}$
<i>p</i> (#short), <i>p</i> (#middle), <i>p</i> (#wide)	<i>NE</i> (<i>p</i> (#flowCapa) = 1)	<i>NE</i> (<i>p</i> (#flowCapa) = 1)	$\in [0, 1]$
<i>p</i> (MCE_F), <i>p</i> (MCG_F)	<i>NE</i> (<i>p</i> (MCG_F) = 1)	<i>NE</i> (<i>p</i> (MCG_F) = 1)	$\in [0, 1]$
<i>p</i> (MIC_F), <i>p</i> (MIF_F), <i>p</i> (MIP_F)	<i>NE</i> (<i>p</i> (MIF_F) = 1)	<i>NE</i> (<i>p</i> (MIF_F) = 1)	$\in [0, 1]$
<i>p</i> (MSA_F), <i>p</i> (MSD_F), <i>p</i> (MSM_F)	<i>NE</i> (<i>p</i> (MSM_F) = 1)	<i>NE</i> (<i>p</i> (MSM_F) = 1)	$\in [0, 1]$
<i>p</i> (MStC_F), <i>p</i> (MStCe_F), <i>p</i> (MStF_F), <i>p</i> (MStP_F)	<i>NE</i> (<i>p</i> (MStF_F) = 1)	<i>p</i> (MStC_F) = 0	$\in [0, 1]$
Niveau des parcelles			
<i>p</i> (#leger), <i>p</i> (#moyen), <i>p</i> (#profond)	$\in [0, 1]$	$\in [0, 1]$	$\in [0, 1]$

TAB. 40 – Valeurs des paramètres pour chacun des modèles

Niveau concerné	Description	Tirage
Aléas dans l'initialisation des modèles		
Exploitation	$capa_j$: attribution d'une des modalités des niveaux de ressource en eau à l'exploitation j	tirage selon la loi de distribution construite à partir des probabilités de réalisations des modalités. Ces probabilités de réalisation constituent des paramètres des modèles.
Exploitation	MI_j : attribution d'une des modalités des comportements d'irrigation à l'exploitation j	
Exploitation	MS_j : attribution d'une des modalités des comportements de semis à l'exploitation j	
Exploitation	MSt_j : attribution d'une des modalités des comportements de lancement de l'irrigation à l'exploitation j	
Parcelle	$prof_k$: attribution d'une des modalités des profondeurs de sol à la parcelle k	
Voisinage	quand un voisinage est constitué, les 2 premiers voisins sont les propriétaires des pompes voisines, et le 3ème est tiré aléatoirement afin de représenter l'éclatement des exploitations. Cet aléa ne concerne que les comportements copieurs.	tirage équiprobable dans l'ensemble des irrigants de la même rive qui ne sont pas des voisins directs
Exploitation	les irrigants qui peuvent irriguer en 3 jours tirent au sort les 3 jours où ils irriguent (représentation de la diversité des cycles possibles). Cet aléa ne concerne que les irrigants dont $capa = \#wide$	tirage équiprobable parmi les cycles possibles
Aléas dans les dynamiques des modèles		
Tableau de bord	parcelles observées pour informer des départs d'irrigation. Cet aléa ne concerne les irrigants lançant l'irrigation par information centrale (type MStCe_F)	tirage équiprobable de 10 parcelles parmi les parcelles du bassin
Tableau de bord	pourcentages d'erreur dans le bulletin d'information. Cet aléa ne concerne que les irrigants pointus (type MIP_F)	loi uniforme dans un intervalle paramétré par les modèles
Parcelle	jours de semis	loi normale déterminée par le type de culture. Retirage si la valeur sort de bornes déterminées par le type de culture
Aléas dus à des contraintes d'implémentation		
Tous niveaux	ordre d'activation des entités simultanément actives à une date de la simulation. Aléa afin de limiter les biais dus à la gestion asynchrone du temps	classement par tirage équiprobable parmi les entités actives à cette date

TAB. 41 – Variables aléatoires des modèles. Voir l'annexe G pour la description des paramètres cités.

CONCLUSION DU CHAPITRE

Ce chapitre a décrit les 2 modèles qui ont été produits à la suite du modèle-jouet pour approfondir l'exploration du formalisme AGR.

Le premier modèle, GibiAGR reproduit la situation de GibiDrome. La plupart des comportements étaient déjà représentés dans le modèle jouet, et les extensions sont plutôt d'ordre organisationnel : ajout de nouveaux types de niveaux d'organisation, instanciation de plus de groupes.

Le second modèle, GibiH, apporte lui des extensions d'ordre comportemental : de nouveaux rôles sont ajoutés pour introduire des comportements plus hétérogènes.

Les extensions réalisées pour construire ces deux modèles permettent d'ébaucher un premier bilan sur la capacité de l'approche à intégrer de nouvelles hypothèses de modélisation.

Les extensions sur la propagation de l'eau ont été réalisées en se concentrant sur la gestion de nouvelles connections dans les structures de groupe concernées. Cet exercice illustre la capacité de l'approche à circonscrire le traitement des question propres à un niveau d'organisation dans la structure de groupe qui lui est attachée.

Les extensions réalisées sur les règles de gestion et les comportements des acteurs permettent de distinguer trois types de situations :

- l'ajout d'une nouvelle modalité à un type de comportement déjà décrit se traduit par la définition d'un nouveau rôle dans la hiérarchie du comportement. Pour ce type d'ajout, le gain en modularité induit par les rôles est évident. Les modifications à propager dans le reste du modèle sont limitées aux cas où les comportements décrits par la nouvelle modalité modifient l'ordre d'activation d'autres rôles, comme c'est le cas pour l'introduction d'assolements diversifiés. Il faut dans ce cas revoir la manière dont les agents effectuent le choix et la prise en charge des rôles concernés ;
- l'ajout d'un nouveau type de règle collective se traduit par la création d'une nouvelle classe de *Constraint* et induit donc que les rôles responsables du traitement de cette contrainte puissent la traiter. En remontant le traitement de la nouvelle contrainte le plus haut possible dans la hiérarchie des rôles concernés, on limitera le coût des modifications ;
- l'ajout d'un nouveau type de règle de décision individuelle se traduit par la définition d'une nouvelle hiérarchie de rôles et la réorganisation des éléments de décision au sein des différentes hiérarchies de rôles. Ce type d'ajout est plus fastidieux et peut nécessiter l'établissement de plusieurs versions avant de converger vers une organisation suffisamment modulaire. Mais une fois cette organisation modulaire réalisée, il devient facile de travailler sur la diversification des règles de décisions.

L'étape suivante est de passer aux tests et à l'analyse des modèles produits.

Troisième partie

Simulations et discussions

Ou il est désespéré et il maudit son voyage inutilement périlleux. Ou il se dit que le but était le voyage lui-même, ce qui justifie après coup son absurde choix, car la plus grande imprudence devient alors le plus grand plaisir.

Michel Rio, Mélancolie Nord

Chapitre 7

Tests de vérification et analyse de sensibilité

CONTENU DU CHAPITRE

L'exploration du formalisme AGR a donné lieu à la construction de 3 modèles, qui sont en fait des versions plus ou moins complexes d'un même modèle. Avant de dresser un bilan des apports du formalisme AGR au travail de modélisation, on examine le comportement des modèles en effectuant des tests de vérification et une analyse de sensibilité de ces modèles.

La mise en œuvre de tests de vérification et de sensibilité a pour objectif de (1) tester la faisabilité de l'approche AGR sur le cycle complet de modélisation (2) vérifier si l'utilisation du formalisme AGR introduit des biais ou a un impact sur la sensibilité des modèles.

La première partie de ce chapitre présente des prérequis et des définitions touchant à la mise en œuvre de plans d'expérience. La seconde partie présente les tests de vérification. Enfin la troisième partie présente les tests de sensibilité.

Sommaire

1	Définitions et prérequis	222
1.1	Vérification, validation, analyse de sensibilité	222
1.2	Variables, paramètres, scénarios, simulations	223
1.3	Prérequis valables pour tous les tests	224
2	Tests de vérification	226
2.1	Familles de test	226
2.2	Définition des tests pratiqués	229
2.3	Résultats des tests	232
2.3.1	Test V1 : circulation de l'eau et réseau à 2 entrées	233
2.3.2	Test V2 : mise en œuvre de tours d'eau	237
2.3.3	Test V3 : diversification des comportements individuels	240
2.3.4	Test V4 : comportements de copie	245
2.3.5	Test V5 : Comportements de crise	248
2.3.6	Test V6 : comparaison par rapport à GibiDrome	251
3	Analyse de sensibilité	253
3.1	Définition des tests pratiqués	253
3.1.1	Questions abordées	253
3.1.2	Définition de l'espace des valeurs des paramètres	255
3.1.3	Variables observées et analyse des observations	256
3.2	Résultats des tests	258
3.2.1	Test S1 : sensibilité aux stratégies des agriculteurs	258
3.2.2	Test S2 : sensibilité au mode de calcul du calendrier et à la contrainte sur la ressource	263
3.2.3	Test S3 : sensibilité à la gestion de crise	272

1 Définitions et prérequis

Une fois un modèle construit, il faut établir un plan d'expériences de ce modèle afin d'en étudier le comportement. Ce plan d'expériences repose généralement sur un cycle vérification / validation / analyse de sensibilité.

1.1 Vérification, validation, analyse de sensibilité

La **vérification** d'un modèle consiste à s'assurer que le modèle construit se comporte bien selon les hypothèses de modélisation. La **validation** d'un modèle consiste à s'assurer que le modèle répond bien aux objectifs de la modélisation (est-ce que le modèle est un « bon » modèle?). [Balci, 1998]

On peut raffiner ces définitions en distinguant les différents modèles produits (modèle du domaine, qui décrit les hypothèses de modélisation, modèle conceptuel, qui constitue une description formelle du modèle du domaine, et modèle opérationnel, qui est le modèle implémenté) [Vanbergue, 2003] :

- la vérification interne consiste à vérifier que l'implémentation du modèle opérationnel est juste (debuggage) ;
- la vérification externe consiste à vérifier que le modèle opérationnel est conforme au modèle conceptuel (est-ce que la simulation fait ce qu'on lui a dit de faire) ;

- la validation interne consiste à vérifier que le modèle conceptuel est conforme au modèle du domaine (est-ce que ce que l'on a dit de faire au modèle correspond bien à ce que l'on voulait qu'il fasse) ;
- la validation externe consiste à vérifier que les résultats de la simulation sont cohérents avec le modèle du domaine (est-ce que ce que le modèle fait correspond à ce qu'on l'on voulait qu'il fasse)

L'**analyse de sensibilité**, ou exploration de la sensibilité du modèle aux variations de ses paramètres est présentée par [Gilbert and Troitzsch, 1999] comme l'étape qui suit la validation. Dans le cas d'un modèle explicatif, il semble toutefois que cette étape qui permet d'explorer le comportement du modèle doive intervenir en préparation de restitutions, à la suite de la phase de vérification. Pour [Saltelli, 2000], l'analyse de sensibilité, qui étudie les relations des sorties d'un modèle à ses entrées, est symétrique à la phase de conception d'un modèle. En effet alors que la conception du modèle encode le système réel dans la machine, l'analyse de sensibilité décode ce que fait la machine.

L'annexe H donne des définitions générales concernant la conduite de tests de vérification et décrit des protocoles classiques.

Quel plan d'expériences ? Nous n'aborderons pas dans le cadre de cette thèse la validation des modèles produits, ce qui reviendrait à juger de la qualité des modèles conceptuels vis à vis de la réalité d'une part, et de l'usage qui en est fait avec les acteurs d'autre part. En effet, la construction de ces modèles n'a d'autres objectifs que de tester l'utilisation du formalisme AGR. La mise en œuvre d'une phase de vérification et d'analyse de sensibilité est effectuée pour évaluer l'impact de l'utilisation d'AGR sur le cycle de modélisation dans son entier.

On construit ainsi un plan d'expériences en 2 parties :

1. vérification
2. analyse de sensibilité

1.2 Variables, paramètres, scénarios, simulations

L'ensemble des **variables d'un modèle** est constitué par l'ensemble des attributs des entités du modèle, et des attributs globaux du modèle. Les valeurs des variables d'un modèle évoluent dans le temps et peuvent être observées au cours des simulations.

On définit les **paramètres du modèle** comme l'ensemble de ses variables dont il faut fixer la valeur pour l'initialiser et en définir une réalisation. Les valeurs initiales des autres variables se déduisent des valeurs de ces paramètres. sont définies comme les quantités du modèles qui évoluent dans le temps. On peut distinguer 3 types de paramètres :

- des **paramètres fixes**, dont la valeur est déterminée par les hypothèses de modélisation, et reste donc la même quelque soit la réalisation du modèle ;
- des **paramètres d'initialisation**, dont la valeur dépend du scénario que l'on souhaite représenter ;
- des paramètres dont on contraint la valeur tout au long de la simulation. C'est par exemple le cas du débit entrant dans le bassin, dont la valeur est fixé tout au long de la simulation par une série climatique prédéterminée. On appellera ces paramètres **paramètres de forçage**.

Un **scénario** d'un modèle correspond à une réalisation particulière de ce modèle. Il est défini par la donnée des valeurs des paramètres d'initialisation et des paramètres de forçage du modèle.

On définit le **scénario de référence** d'un modèle comme un scénario particulier, qui fixe une valeur de référence pour chacun des paramètres du modèle.

Enfin, une **simulation** est constituée par la mise en œuvre d'un scénario sur l'ordinateur.

1.3 Prérequis valables pour tous les tests

Scénario de référence Afin de pouvoir décrire les tests en ne se basant que sur les paramètres explorés par ces tests, on définit une valeur de référence pour chacun des paramètres indépendants du modèle (voir annexe G) dans un scénario de référence *ScRef*.

Afin de pouvoir servir de base de comparaison valable pour tous les tests, le scénario de référence reproduit un scénario simple et « plausible » de GibiDrome : comportements homogènes, année moyenne, règles collectives du bassin égales à celles utilisées dans la réalité. Les paramètres du scénario de référence sont listés dans le tableau 42, toujours classés selon les niveaux auxquels ils s'appliquent.

Répétition des scénarios On a identifié dans la section 3.2 du chapitre 6 onze variables aléatoires dans les modèles. Le scénario de référence fixe des lois de distribution homogènes³⁵ pour la plupart des paramètres dont les modalités sont attribués par une loi de distribution. D'autres aléas disparaissent parce que le comportement qui les induit a une probabilité de réalisation nulle dans le scénario de référence. Au total, seules trois variables aléatoires (profondeur des sols, dates de semis et ordre d'activation des entités) subsistent dans le scénario de référence. Compte tenu de ce faible niveau de stochasticité, et des contraintes en temps de simulation (la simulation d'un scénario prend entre 5 et 10 minutes sur un PC), on effectuera **20 répétitions pour chaque simulation d'un scénario**.

Ces répétitions permettront de repérer d'éventuelles instabilités lors des tests de vérification, et d'évaluer la sensibilité d'un scénario aux variables aléatoires du modèles lors des tests de sensibilité.

³⁵on entend par homogène qu'une des modalités du paramètre a une probabilité de réalisation de 1, alors que les autres modalités ont une probabilité de réalisation nulle : toutes les entités concernées par le paramètre se voient attribuer la même modalité et donc l'aléa disparaît.

Scénario de Référence		
Paramètre	Valeur	Commentaires
Niveau global		
<i>clim</i>	1993	correspond à une année moyenne mais intéressante (sèche mais sans plus)
<i>rCompl</i>	#Juanons	correspond à la situation réelle
Niveau du tableau de bord		
<i>errClim</i>	0	pour la simplicité du scénario de référence
<i>errKc</i>	0	pour la simplicité du scénario de référence
Niveau du bassin		
<i>nInds</i>	45	valeur fixée dans GibiH
<i>nR</i>	3	valeur fixée dans GibiH
<i>partageRestr</i>	#prelevements	correspond à la situation réelle
<i>refRestr</i>	#08maze	correspond à la situation réelle
<i>hObs</i>	12	heure moyenne (11 h après le lancement des irrigations de nuit)
Niveau du réseau d'irrigation		
<i>capaMain_i(l/s)</i>	<i>capaMain₁</i> = 560 <i>capaMain₂</i> = 390 <i>capaMain₃</i> = 500	valeur fixée dans GibiH
<i>capaCompl_i(l/s)</i>	<i>capaCompl₁</i> = 225 <i>capaCompl₂</i> = 0 <i>capaCompl₃</i> = 110	valeur fixée dans GibiH
<i>nPr_i</i>	<i>nPr₁</i> = 54 <i>nPr₂</i> = 33 <i>nPr₃</i> = 48	valeur fixée dans GibiH
<i>rCol_i</i>	∅	pour la simplicité du scénario de référence
Niveau de l'exploitation		
<i>modCal</i>	#flow	pour la simplicité du scénario de référence
{ <i>p</i> (MCE_F), <i>p</i> (MCG_F)}	{0, 1}	pour la simplicité du scénario de référence
{ <i>p</i> (MIC_F), <i>p</i> (MIF_F), <i>p</i> (MIP_F)}	{0, 1, 0}	pour la simplicité du scénario de référence
{ <i>p</i> (MSA_F), <i>p</i> (MSD_F), <i>p</i> (MSM_F)}	{0, 0, 1}	pour la simplicité du scénario de référence
{ <i>p</i> (MStC_F), <i>p</i> (MStCe_F), <i>p</i> (MStF_F), <i>p</i> (MStP_F)}	{0, 0, 1, 0}	pour la simplicité du scénario de référence
Niveau de la parcelle		
{ <i>p</i> (#leger), <i>p</i> (#moyen), <i>p</i> (#profond)}	{0.4, 0.3, 0.3}	situation hétérogène, conforme à la réalité

TAB. 42 – Valeurs des paramètres du scénario de référence

2 Tests de vérification

La vérification interne (debuggage) se fait au fur et à mesure du processus d'implémentation. La mise en œuvre de tests de vérification systématiques a pour but de vérifier que les modèles implémentés se comportent conformément aux hypothèses de modélisation. Ces tests consistent alors à confronter les valeurs de variables observées au cours des simulation à des valeurs théoriques reconstruites à partir d'un modèle d'analyse.

Définitions

Le **modèle d'analyse** d'un test de vérification est un modèle analytique définissant les valeurs des variables observées en fonction des valeurs des paramètres du test.

La définition de modèles d'analyse n'est possible que dans des situations simples, où les comportements que l'on souhaite vérifier sont isolés. La construction d'un test de vérification passe donc par une première étape de simplification des modèles.

Les tests de vérification sont effectués sur chacune des principales extensions réalisées sur le modèle-jouet pour arriver à GibiAGR et GibiH. Ces extensions sont isolées les unes des autres par simplification des modèles, et leurs interactions ne sont donc pas vérifiées. Ces tests ne garantissent donc pas le fonctionnement du modèle dans son entier mais constituent une étape nécessaire pour pouvoir traiter d'éventuelles incohérences dans des simulations plus évoluées. Ils doivent être menés à nouveau à chaque évolution importante du modèle pour vérifier que celui-ci garde son intégrité [Gilbert and Troitzsch, 1999].

Pour constituer des scénarios menant à des systèmes simplifiés, on pourra utiliser le formalisme AGR en créant des rôles « **test** » qui au lieu de conduire toute la succession des actions du modèle, ne font que des actions simplifiées.

Utilisation des rôles : il est possible de créer des comportements simplifiés dans de nouveaux rôles pour les tests de vérification sans altérer le comportement du reste du modèle.

2.1 Familles de test

On définit trois familles de tests de vérification ad hoc :

- **tests TVal** (vérification de valeurs instantanées) : si le comportement à vérifier agit de manière instantanée et indépendante de l'histoire de la simulation, il est possible de définir un modèle d'analyse indépendant du temps.

Le test consiste alors à parcourir dans le temps les différentes valeurs des paramètres, et à vérifier que les variables observées sont toujours conformes au modèle d'analyse.

- **tests TTraj** (vérification de trajectoires) : si le comportement à vérifier évolue au cours de la simulation, le modèle d'analyse définira l'évolution dans le temps (trajectoire) des valeurs des variables observées pour chacune des valeurs des paramètres.

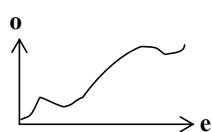
Le test consiste alors à effectuer des simulations pour chacune des valeurs des paramètres, et à vérifier que les trajectoires des variables observées pour chacune des simulations sont conformes au modèle d'analyse.

- **test TComp** (comparaison de modèles) : si on dispose de 2 modèles de simulation du même système, on pourra vérifier que les modèles se comportent de manière similaire. Le test consiste alors à effectuer, pour chacune des valeurs des paramètres, des simulations sur chacun des modèles, et à vérifier que les variables observées suivent la même trajectoire pour chacun des modèles.

Certains éléments de description de ces tests sont définis dans l'annexe H : matrice de criblage, paramètres de forçage...

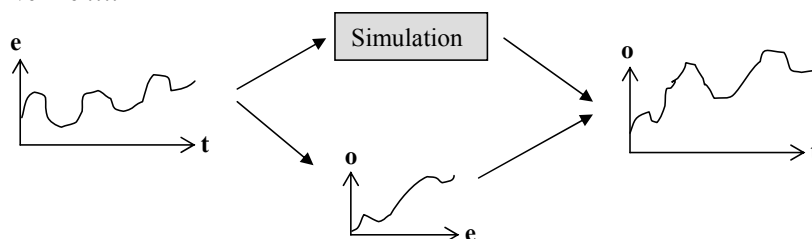
Test de type TVal : vérification de valeurs instantanées

Modèle d'analyse : On connaît, pour un paramètre e et une variable o ...



... une relation $o=f(e)$ vraie $\forall t$ (stationnaire, indépendante de l'histoire de la simulation).

Test : On vérifie



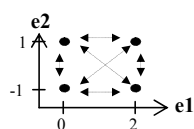
... que dans une simulation, quand les valeurs de e évoluent dans le temps, les valeurs de o observées correspondent bien à $o=f(e)$.

Étapes de la mise en œuvre :

- Type de question** : vérifier le fonctionnement d'un processus agissant de manière instantanée.
- Paramètres et variables à observer** : On observe les variables mesurant le fonctionnement du processus. On teste les paramètres permettant de définir l'état de ces variables indépendamment du temps.
- Espace des valeurs des paramètres** : défini par les bornes où se situe le fonctionnement du processus
- Scénarios** : Afin de vérifier que le modèle ne fait pas d'hystérésis, on parcourra toutes les transitions possibles de l'espace des paramètres durant une simulation. La matrice de criblage M est constituée à partir de toutes les transitions possibles dans l'espace des paramètres, et est parcourue durant une simulation : les paramètres du tests sont des paramètres de forçage.

Exemple : on connaît $o=f(e1, e2)$. On souhaite explorer $E1=\{0, 2\}$ et $E2=\{-1, 1\}$ =

Alors,



$$M = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 2 & 0 & 2 & 2 & 0 & 2 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

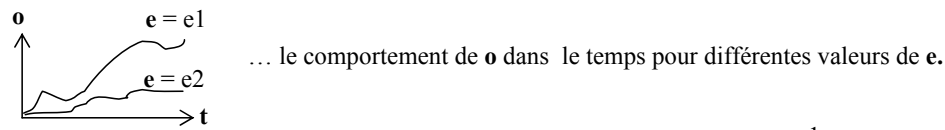
est parcourue pendant le temps de la simulation.

Un seul scénario est défini, et le temps de la simulation est le temps mis pour parcourir M (la taille de M est du même ordre que le carré de la taille de l'espace des valeurs des paramètres).

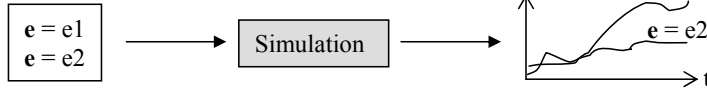
- Mise en œuvre** : Pour construire un tel test sur Cormas AGR, il faut :
 - générer la matrice M pour définir l'espace à parcourir;
 - fixer un pas de temps pour parcourir M ;
 - définir des rôles tests capable de lire la matrice M au rythme du pas de temps choisi, et d'attribuer ses valeurs à la date voulue.

Test de type TTraj : vérification de trajectoires

Modèle d'analyse : On connaît, pour un paramètre e et une variable o ...



Test : On vérifie...



... que les valeurs observées lors d'une simulation avec une certaine valeur de e correspondent bien au comportement prévu

Etapes de la mise en œuvre :

- Type de question :** vérifier un comportement sur la durée de la simulation.
- Paramètres et variables à observer :** On observe les variables mesurant le comportement. On teste les paramètres dont on souhaite vérifier l'expérience sur le comportement.
- Espace des valeurs des paramètres :** défini par les bornes où se situe le fonctionnement du comportement.
- Scénarios :** On définit un scénario pour chaque combinaison de paramètres. La matrice de criblage M est constituée de l'ensemble (total ou partiel) de ces combinaisons, et chacune de ses colonnes sert à initialiser un scénario du test.

Exemple : on souhaite explorer $E1=\{0, 2\}$ et $E2=\{-1, 1\}$.

Alors $M = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 0 & 2 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ et chaque colonne de M définit un scénario.

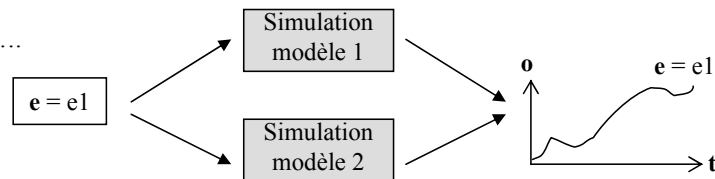
Le test définit autant de scénarios que de colonnes de M , et le temps de la simulation est celui d'une simulation normale.

- Mise en œuvre :** Pour construire un tel test sur Cormas AGR, il faut :
 - générer la matrice M pour définir l'espace à parcourir;
 - boucler sur M pour affecter les valeurs aux paramètres lors de l'initialisation;
 - lancer une simulation « normale ».

Test de type TComp : comparaison de modèles

On dispose de 2 modèles d'un même système.

Test : On vérifie....



....que pour un même scénario, les 2 modèles produisent bien le même comportement.

Etapes de la mise en œuvre :

- Type de question :** vérifier la similarité de 2 modèles d'un même système.
- Paramètres et variables à observer :** Ce sont les mêmes pour les 2 modèles, on les choisit pour leur significativité dans les modèles.
- Espace des valeurs des paramètres :** définies par les bornes où on souhaite explorer les modèles.
- Scénarios :** Comme pour les tests TTraj, on définit un scénario pour chaque combinaison de paramètres. La matrice de criblage M est constituée de l'ensemble (total ou partiel) de ces combinaisons, et chacune de ses colonnes sert à initialiser un scénario du test. Le temps de la simulation est celui d'une simulation normale.

2.2 Définition des tests pratiqués

Le modèle-jouet a été construit très progressivement, et des vérifications effectuées en guise de débogage au fur et à mesure de son développement. On n'effectuera donc des tests que sur les extensions réalisées à partir du modèle-jouet pour construire GibiAGR et GibiH.

La figure 86 reprend les présentations de synthèse des 3 modèles effectuées à la fin du chapitre 6. Toutes les extensions effectuées sur le modèle-jouet seront testées, sauf

- la circulation de l'eau tenant compte des pertes de charge ;
- la règle collective d'attribution des débits en fonction des types de sols.

Pour chacun de ces tests, il s'agit d'isoler le comportement modélisé par l'extension afin de vérifier que son implémentation est bonne.

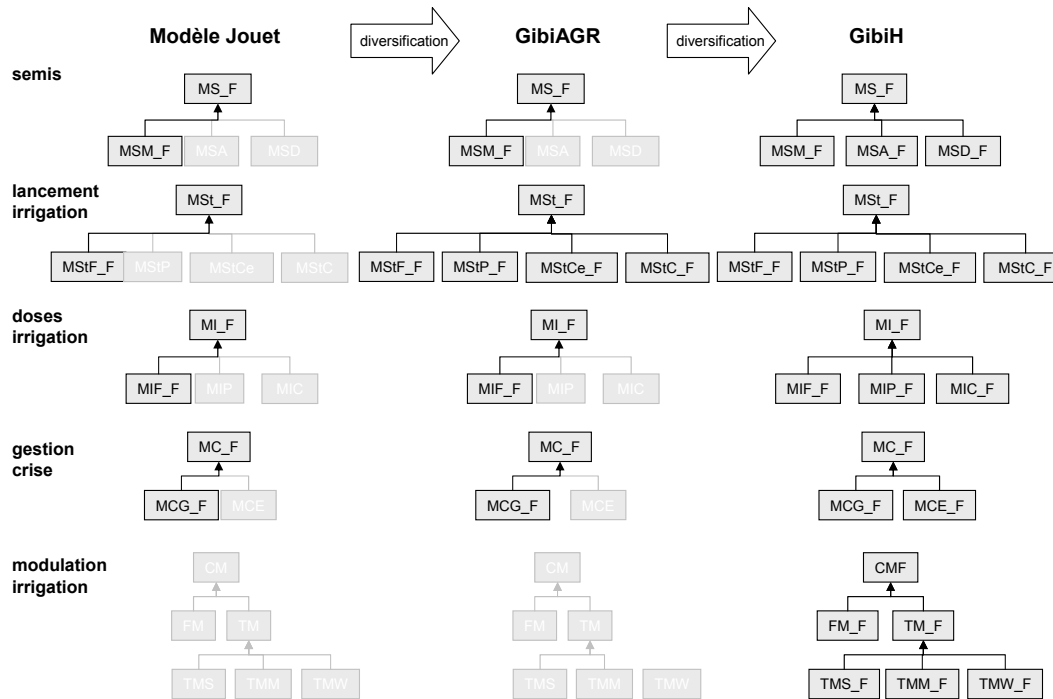
Dans un second temps, on procède à une vérification par **comparaison** (test de type TComp)

entre GibiAGR et GibiDrome. Ceci permet de vérifier que l'architecture AGR et la gestion du temps par événement n'induisent pas de biais.

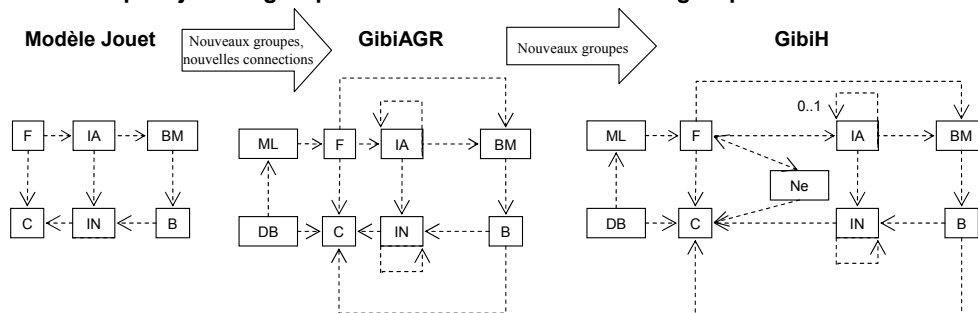
Les 6 tests de vérification sont décrits dans le tableau 43. Les différentes rubriques renseignent :

- l'extension testée ;
- la description de ce qui est testé :
 - les simplifications opérées pour le test ;
 - les variables observées et les paramètres parcourus ;
- des informations sur le test :
 - type du test ;
 - modèle d'analyse ;
 - construction de la matrice de criblage.

Tous les tests se placent dans des conditions où la ressource en eau est non contrainte. La vérification que la circulation de l'eau a lieu correctement en situation de ressource contrainte a été effectuée *de facto* dans le chapitre 6 lors de l'étude du paramètre *c* qui module la distribution de débit dans les réseaux (figure 74).



Extensions par ajout de groupes ou de connections dans les groupes



Extensions par ajout de contraintes

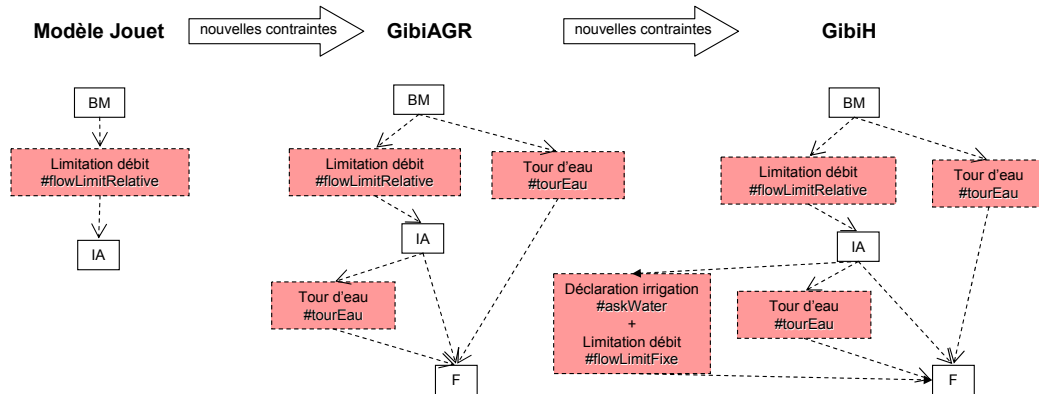


FIG. 86 – Extensions de GibiAGR et GibiH. Se reporter à l'annexe F pour les abréviations.

Système simplifié	paramètres et observations	Modèle d'analyse	Matrice de criblage
V1 : Ajout d'une seconde entrée dans un réseau (vérification de la circulation de l'eau). Famille TVal			
1 seul réseau avec 1 entrée principale et une entrée complémentaire	Vérification des réponses (débits pompés) des pompes aux variations de demandes dans différentes configurations ouvert/fermé	réponses théoriques des 2 pompes selon leurs priorités aux différentes valeurs de demandes	parcours de toutes les transitions possibles entre les combinaisons des valeurs de demandes et des configurations ouvert/fermé sur une simulation
V2 : Mise en œuvre d'un tour d'eau (vérification de la mise en œuvre d'une règle collective). Famille TVal			
7 irrigants dans 1 réseau	Vérification de la réduction des prélèvements consécutive au déclenchement de tours d'eau lors de passages en crise	réductions des prélèvements de 20% en crise 1, et de 40 % en crise 2	parcours de toutes les transitions possibles entre les 3 niveaux de crise pour différentes durées des périodes de crise
V3 : Diversification des comportements individuels (vérification des actions sur les parcelles pour les différents types de rôles MS, MSt, MI, et CM). Famille TTraj			
1 irrigant relié directement à la rivière	Vérification de l'état des parcelles d'un agriculteur durant une simulation pour chacune des combinaisons de comportements possibles	état des parcelles durant une simulation établi en appliquant directement les équations sous-tendant les pratiques aux données climatiques dans un tableur	scénarios définis par les combinaisons des différents types de rôles.
V4 : Comportements de copie (vérification que les exploitants « copieurs » (lancement de l'irrigation MstC_F et irrigation MIC_F) suivent bien leur voisin le plus précoce). Famille TTraj			
4 irrigants reliés directement à la rivière, 2 copieurs et 2 pionniers	Vérification des dates de lancement et des doses apportées par un irrigant copieur par rapport à ses voisins	comportement du pionnier le plus précoce	matrice de criblage : 1 seul scénario
V4bis : Connexité du réseau de voisinage (vérification que le réseau de voisinage est bien connexe). Famille TTraj			
Système complet	Vérification que des comportements « pionniers » de lancement de l'irrigation s'étendent bien à tout le système	les irrigations doivent être lancées dans 100 % des exploitations après un certain temps, de plus en plus vite quand le nombre de pionniers augmente	scénarios définis par le nombre de pionniers
V5 : Comportements de crise (vérification que tous les comportements de crise sont corrects pour toutes les règles collectives). Familles TVal+TTraj			
7 irrigants dans 1 réseau	Vérification des doses apportées et de quand elles sont apportées pour les différents types de CalendarManager , pour les 2 types de comportements de crise, et avec ou sans règle collective (tour d'eau en cas de crise)	doses apportées un jour de la semaine en fonction du niveau de crise, selon le type de CalendarManager , le comportement de crise et la règle collective (modèle établi sur tableur)	scénarios définis par les combinaisons type de CalendarManager /comportement de crise/règle collective + parcours de toutes les transitions possibles entre les 3 niveaux de crise pour différentes durées des périodes de crise
V6 : Comparaison (vérification que GibiAGR et GibiDrome fournissent bien les mêmes résultats). Famille TComp			
Système complet	Vérification des sorties en débit pompé, stress hydriques et jours de crise pour le scénario de référence	pas de modèle d'analyse (comparaison de modèles)	seul scénario (scénario de référence)

TAB. 43 – Description des tests de vérification

2.3 Résultats des tests

Chacun des tests de vérification est d'abord décrit dans un cadre présentant :

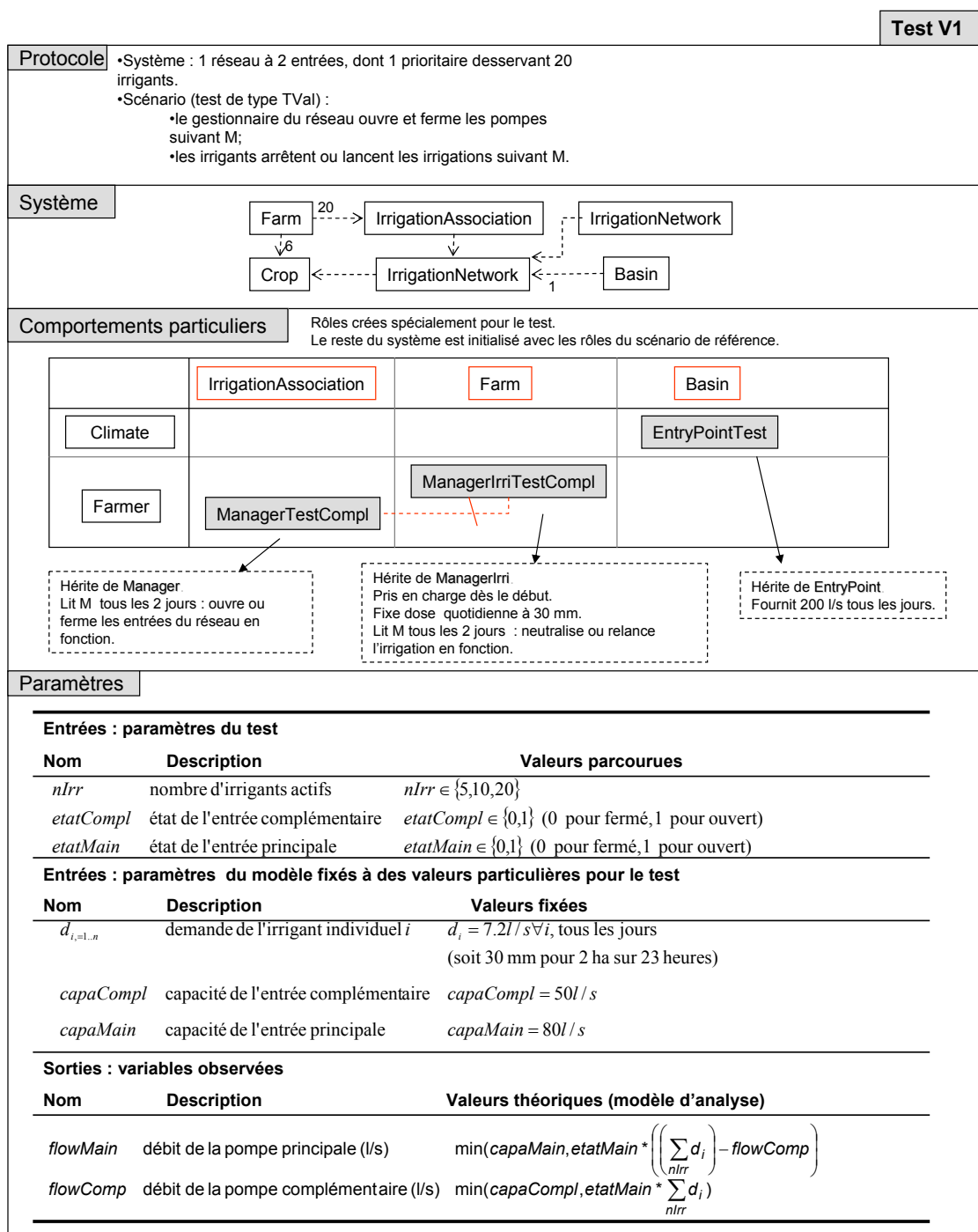
- le protocole du test : système simplifié mis en œuvre et déroulement des scénarios.

Cette partie figure aussi un diagramme de type diagramme dynamique global où le système testé est représenté, et les éléments (entités ou interactions) paramétrés ou observés par le test sont surlignés ;

- le diagramme fonctionnel global du système simplifié testé ;
- si des rôles tests ont été spécialement construits, un diagramme swimlane représentant ces rôles tests ;
- les paramètres du test avec leurs modalités, et les variables observées avec leurs valeurs théoriques (issues des modèles d'analyse).

Ces cadres ont recours aux abréviations listées dans l'annexe [F](#).

2.3.1 Test V1 : circulation de l'eau et réseau à 2 entrées



Commentaires sur le protocole Pour éprouver la robustesse de la représentation arcs-nœuds adoptée pour la circulation de l'eau vis à vis de la gestion du temps par événements, le test a été mené pour 4 options de séquençement des événements qui provoquent un processus de distribution de l'eau dans le système.

En effet, la distribution de l'eau est réalisée par propagation instantanée à travers le réseau arcs-nœuds constitué des rôles de type **WaterBranch** et **WaterPoint** d'une demande dans un sens et d'un débit dans l'autre. Cependant des délais de l'ordre de la seconde ont été introduits au niveau des jonctions entre les réseaux - constitués des groupes de type **IrrigationNetwork** et **Basin** - afin de gérer les priorités des entrées et d'améliorer les temps de calcul (voir chapitres 5 et 6). Il faut vérifier que l'arrivée simultanée sur une même entité d'événements indépendants provoquant des actions de distribution de l'eau ne produit pas d'erreurs dans le système.

Ces événements et leurs options de séquençement sont présentés dans la figure 87. Dans le cas 0, tous les événements sont décalés de 5 minutes. Dans les 3 autres cas, 1 événement parmi ev2, ev3 et ev4 est simultanément à ev1.

	Crop	Farm	IrrigationNetwork	Basin
	Action d'irrigation (ev1)	Modif. Calendrier (ev2)	Action sur pompes (ev3)	Rafraîchissement débit entrant (ev4)
Cas 0	+0'	+5'	+10'	+20'
Cas 1	+0'	+0'	+10'	+20'
Cas 2	+0'	+5'	+0'	+20'
Cas 3	+0'	+5'	+10'	+0'

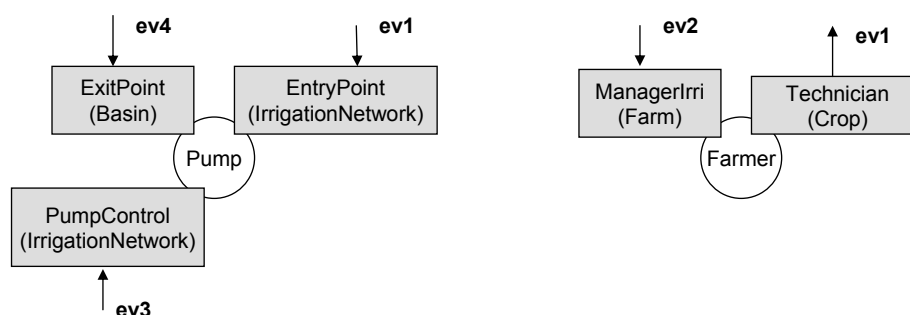


FIG. 87 – Test V1, synchronisation des événements : les 4 cas testés

Résultats Les résultats sont les suivants (voir figure 88) :

cas 0 Le test est correct à 100 %.

cas 1 Des instabilités apparaissent quand la pompe principale se ferme. C'est le **Farmer** qui échoue à traiter simultanément les événements ev1 et ev2. Lors de l'ouverture d'une pompe, la demande part vers la pompe principale et n'est traitée qu'à une date ultérieure (envoi d'une influence). Si la modification de calendrier due à l'arrêt de l'irrigation intervient pendant ce laps de temps, le **Farmer** ne « voit » pas cette demande en attente et ferme ses pompes, si bien que cette demande « fantôme » s'accumule dans la pompe d'entrée sans jamais être annulée.

Tant que la pompe est ouverte, même si la demande « apparente » (vue depuis le bassin)

Erreurs sur flowMain (extraits)

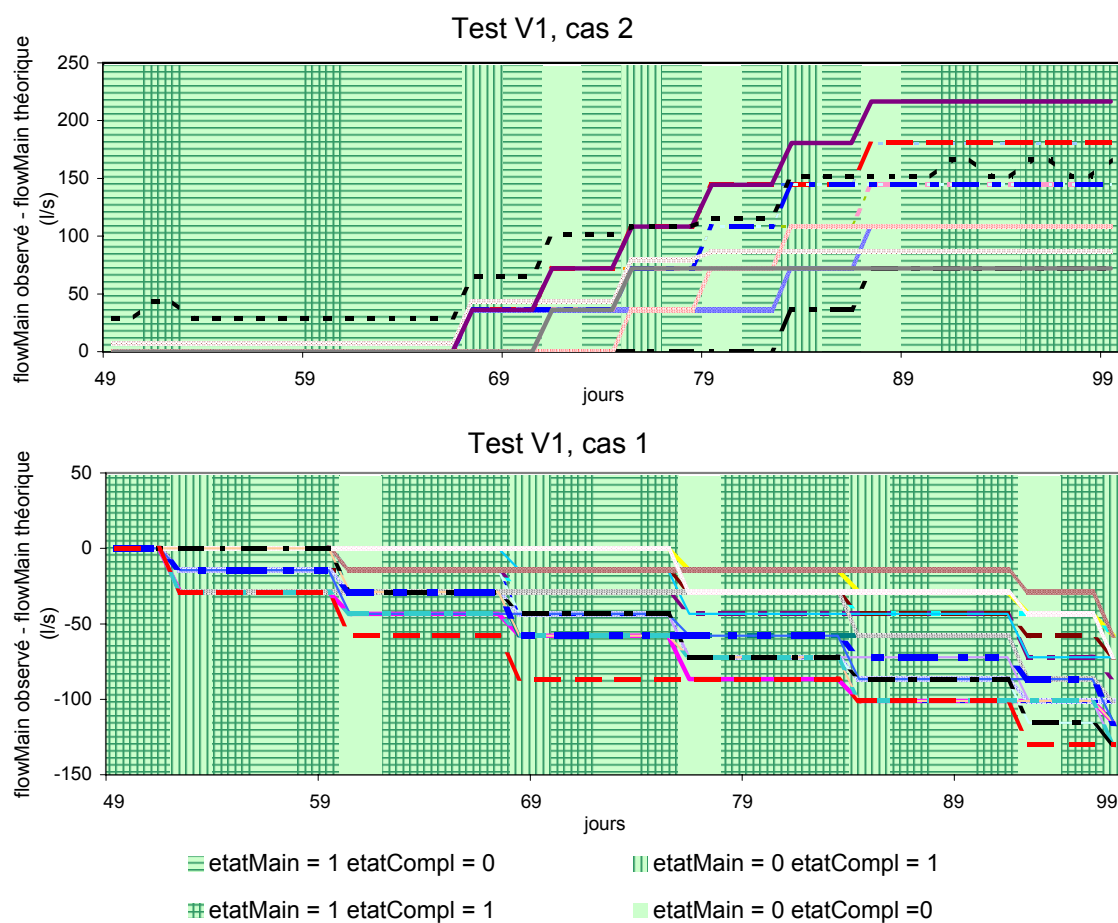


FIG. 88 – Résultats du test V1 dans les cas 1 et 2 pour les jours 49 à 100, sur les 250 jours simulés par les test. Les courbes représentent chacune des 20 simulations

Cas 0 : pas de perturbation pendant le traitement de ev1

Cas 2 : apparition d'une demande "fantôme" due au traitement de ev1 alors que la pompe est fermée

Cas 1 : apparition d'une demande "fantôme" due au traitement de ev1 après annulation de l'irrigation

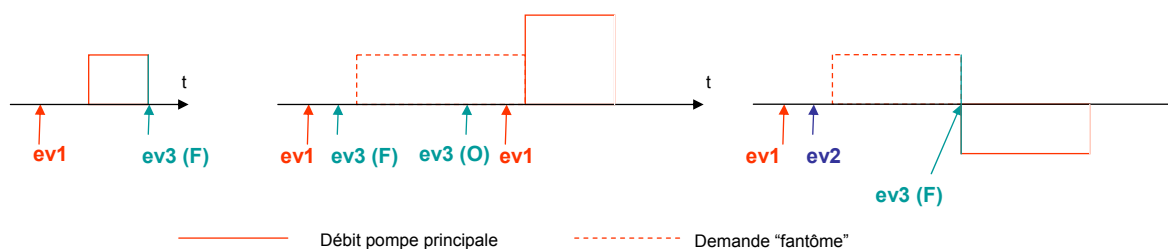


FIG. 89 – Test V1, synchronisation des événements sur 3 des 4 cas : explications

de la pompe est supérieure à la demande réelle du réseau, cette erreur n'apparaît pas parce que le réseau renvoie le débit dont il n'a pas besoin (mécanisme de contrôle en bout de ligne). Quand la pompe est fermée, le demande apparente est égale à la demande fantôme alors que la demande réelle est nulle, si bien que le seul débit passant dans la pompe est « négatif », du réseau vers le bassin.

cas 2 Des instabilités apparaissent aussi quand la pompe principale se ferme. La pompe échoue à traiter simultanément les événements *ev1* et *ev3* : *ev1* entraîne la propagation d'une demande dans le bassin qui ne sera traitée qu'à une date ultérieure (envoi d'une influence). Si *ev3* intervient entre-temps en fermant la pompe, le traitement de la demande qui suppose que la pompe est ouverte se fait alors que celle-ci est fermée. L'erreur conséquente n'est jamais corrigée et s'accumule.

cas 3 Le test est correct à 100 %. En effet le rafraîchissement du débit entrant ne fait que lancer un nouveau processus de circulation du débit depuis le bassin, sans modifier l'état des pompes, et n'interfère donc pas avec *ev1*.

La pompe complémentaire, qui est prioritaire, donne toujours des résultats corrects. En effet les influences sont alors traitées au cycle suivant immédiatement leur envoi, et les perturbations n'ont pas le temps d'intervenir.

Le schéma de la figure 89 illustre ce qui se passe pour les 3 premiers cas.

Conclusions Les instabilités apparues lors de ces tests peuvent se résoudre de 2 manières :

- en décalant dans le temps les dates des événements des différents niveaux, et pour un même niveau, les dates des événements de différents types (décisions et actions par exemple). Cette solution a l'avantage d'être simple mais n'est pas viable à long terme, puisqu'il devient difficile de gérer et de maintenir les décalages si le modèle devient plus complexe. C'est cependant celle que nous avons choisi dans les contraintes de temps de la thèse.
- en sécurisant mieux les entités susceptibles de gérer des événements simultanés par l'utilisation maîtrisée d'influences par exemple. Cependant, dans le cas de la circulation de l'eau, c'est tout le modèle arc-nœuds qu'il faudrait remettre à plat et reconsidérer.

Le mécanisme de gestion du temps par événements induit des instabilités lorsque des objets reçoivent des sollicitations simultanées qui n'ont pas été prévues.

En prenant garde à décaler les dates des événements issus de différents types de groupe, la circulation de l'eau dans un réseau à 2 entrées fonctionne.

2.3.2 Test V2 : mise en œuvre de tours d'eau

Test V2																																					
Protocole	•Système : 7 irrigants connectés à 1 réseau avec tour d'eau. 7 parcelles par irrigants (1 pour chaque jour de la semaine). •Scénario : • le gestionnaire du réseau décrète des périodes de crise suivant M; • les irrigants irriguent 1 de leurs 7 parcelles chaque jour de la semaine, sauf en cas de tour d'eau.																																				
Système	Farm IrrigationAssociation Crop IrrigationNetwork Basin 7 7 1																																				
Comportements particuliers	Rôles créés spécialement pour le test. Le reste du système est initialisé avec les rôles du scénario de référence. <table><tr><td></td><td>IrrigationAssociation</td><td>Farm</td><td>Basin</td></tr><tr><td>Climate</td><td></td><td></td><td>EntryPointTest</td></tr><tr><td>Farmer</td><td>ManagerTestCompl</td><td>ManagerIrriTestCompl</td><td></td></tr></table> Hérite de Manager. Envoie contrainte tour d'eau au début. Décrète période de crise en suivant M. Ne prend que les transitions autorisées : {c0→c1; c1 →c2;c1 →c0;c2 →c0} Hérite de ManagerIrri Pris en charge dès le début. Fixe dose quotidienne à 30 mm. Hérite de EntryPoint Fournit 200 l/s tous les jours.		IrrigationAssociation	Farm	Basin	Climate			EntryPointTest	Farmer	ManagerTestCompl	ManagerIrriTestCompl																									
	IrrigationAssociation	Farm	Basin																																		
Climate			EntryPointTest																																		
Farmer	ManagerTestCompl	ManagerIrriTestCompl																																			
Paramètres	Entrées : paramètres du test <table><tr><th>Nom</th><th>Description</th><th>Valeurs parcourues</th></tr><tr><td>cr</td><td>niveau de crise</td><td>cr ∈ {0,1,2}</td></tr><tr><td>ext</td><td>durée de la période de crise (jours)</td><td>ext ∈ {1,3,7,10}</td></tr></table> Entrées : paramètres du modèle fixés à des valeurs particulières pour le test <table><tr><th>Nom</th><th>Description</th><th>Valeurs fixées</th></tr><tr><td>dRe f</td><td>débit demandé par les irrigants</td><td>dRe f = 7.2l/s tous les jours</td></tr><tr><td>pRe f_{j,j=1..6}</td><td>référence parcelle arrosée le jour de la semaine j</td><td>pRe f_j = j</td></tr><tr><td>jour_i</td><td>jour de la semaine où commence le tour d'eau de l'irrigant i</td><td>jour_i = i</td></tr><tr><td>ext_c</td><td>durée du tour d'eau pour le niveau de crise c</td><td>ext_c = 1.5 * c∀c</td></tr></table> Sorties : variables observées <table><tr><th>Nom</th><th>Description</th><th>Valeurs théoriques</th></tr><tr><td>d_{i,j,cr}</td><td>demande de l'irrigant i le jour j en crise cr (l/s)</td><td>d_{i,j,0} = dRe f∀j d_{i,j,1} = $\begin{cases} 0 & \text{si } j = i \\ \frac{dRe f}{2} & \text{si } j = i + 1 \\ dRe f & \text{sinon} \end{cases}$ d_{i,j,2} = $\begin{cases} 0 & \text{si } (j - i) \in \{0,1,2\} \\ dRe f & \text{sinon} \end{cases}$</td></tr><tr><td>pi_{j,cr}</td><td>référence parcelle arrosée par l'irrigant i le jour de la semaine j en crise cr</td><td>pi_{j,0} = pRe f_j∀j pi_{j,1} = $\begin{cases} 0 & \text{si } j = i \\ pRe f_j & \text{sinon} \end{cases}$ pi_{j,2} = $\begin{cases} 0 & \text{si } (j - i) \in \{0,1,2\} \\ pRe f_j & \text{sinon} \end{cases}$</td></tr><tr><td>dTot_{cr}</td><td>demande globale du réseau en crise cr (l/s)</td><td>7 * dRe f * $\left(1 - \frac{1.5 * c}{7}\right)$</td></tr></table>	Nom	Description	Valeurs parcourues	cr	niveau de crise	cr ∈ {0,1,2}	ext	durée de la période de crise (jours)	ext ∈ {1,3,7,10}	Nom	Description	Valeurs fixées	dRe f	débit demandé par les irrigants	dRe f = 7.2l/s tous les jours	pRe f _{j,j=1..6}	référence parcelle arrosée le jour de la semaine j	pRe f _j = j	jour _i	jour de la semaine où commence le tour d'eau de l'irrigant i	jour _i = i	ext _c	durée du tour d'eau pour le niveau de crise c	ext _c = 1.5 * c∀c	Nom	Description	Valeurs théoriques	d _{i,j,cr}	demande de l'irrigant i le jour j en crise cr (l/s)	d _{i,j,0} = dRe f∀j d _{i,j,1} = $\begin{cases} 0 & \text{si } j = i \\ \frac{dRe f}{2} & \text{si } j = i + 1 \\ dRe f & \text{sinon} \end{cases}$ d _{i,j,2} = $\begin{cases} 0 & \text{si } (j - i) \in \{0,1,2\} \\ dRe f & \text{sinon} \end{cases}$	pi _{j,cr}	référence parcelle arrosée par l'irrigant i le jour de la semaine j en crise cr	pi _{j,0} = pRe f _j ∀j pi _{j,1} = $\begin{cases} 0 & \text{si } j = i \\ pRe f_j & \text{sinon} \end{cases}$ pi _{j,2} = $\begin{cases} 0 & \text{si } (j - i) \in \{0,1,2\} \\ pRe f_j & \text{sinon} \end{cases}$	dTot _{cr}	demande globale du réseau en crise cr (l/s)	7 * dRe f * $\left(1 - \frac{1.5 * c}{7}\right)$
Nom	Description	Valeurs parcourues																																			
cr	niveau de crise	cr ∈ {0,1,2}																																			
ext	durée de la période de crise (jours)	ext ∈ {1,3,7,10}																																			
Nom	Description	Valeurs fixées																																			
dRe f	débit demandé par les irrigants	dRe f = 7.2l/s tous les jours																																			
pRe f _{j,j=1..6}	référence parcelle arrosée le jour de la semaine j	pRe f _j = j																																			
jour _i	jour de la semaine où commence le tour d'eau de l'irrigant i	jour _i = i																																			
ext _c	durée du tour d'eau pour le niveau de crise c	ext _c = 1.5 * c∀c																																			
Nom	Description	Valeurs théoriques																																			
d _{i,j,cr}	demande de l'irrigant i le jour j en crise cr (l/s)	d _{i,j,0} = dRe f∀j d _{i,j,1} = $\begin{cases} 0 & \text{si } j = i \\ \frac{dRe f}{2} & \text{si } j = i + 1 \\ dRe f & \text{sinon} \end{cases}$ d _{i,j,2} = $\begin{cases} 0 & \text{si } (j - i) \in \{0,1,2\} \\ dRe f & \text{sinon} \end{cases}$																																			
pi _{j,cr}	référence parcelle arrosée par l'irrigant i le jour de la semaine j en crise cr	pi _{j,0} = pRe f _j ∀j pi _{j,1} = $\begin{cases} 0 & \text{si } j = i \\ pRe f_j & \text{sinon} \end{cases}$ pi _{j,2} = $\begin{cases} 0 & \text{si } (j - i) \in \{0,1,2\} \\ pRe f_j & \text{sinon} \end{cases}$																																			
dTot _{cr}	demande globale du réseau en crise cr (l/s)	7 * dRe f * $\left(1 - \frac{1.5 * c}{7}\right)$																																			

Commentaires sur le protocole Le test V2 vérifie la mise en œuvre des tours d'eau par les irrigants. Le rôle test **ManagerIrriTestTour** ne fait que fixer une dose unique pour toute la simulation et utilise les mécanismes d'interprétation des contraintes hérités de **ManagerIrri**. Même si l'on utilise des rôles test, c'est donc bien les comportements utilisés lors des simulations « normales » que l'on teste.

De même que pour le test V1, nous avons utilisé ce test pour éprouver la robustesse du système vis à vis de la gestion par événements, cette fois-ci par rapport à la gestion du calendrier d'irrigation.

On observe 3 options de séquençement pour les événements de passage en crise, qui entraînent des modifications de calendrier d'irrigation et les événements d'irrigation, qui constituent une mise en œuvre du calendrier d'irrigation (figure 90). Dans les cas 0 et 1, ces événements sont bien décalés, mais dans le cas 1, le passage en crise a lieu alors que les irrigations sont en cours. Dans le cas 2, modification et mise en œuvre du calendrier sont simultanées.

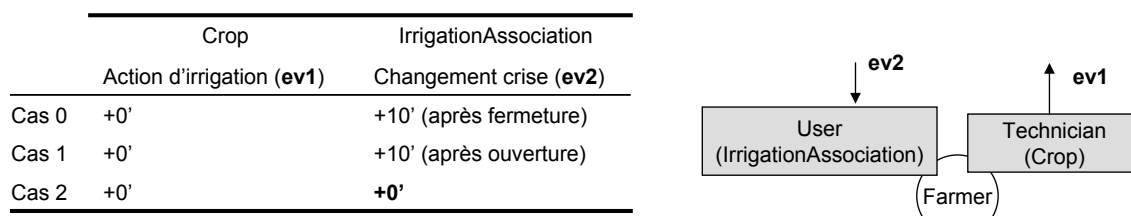


FIG. 90 – Test V2, synchronisation des événements : les 3 cas testés

Résultats La figure 91 montre des résultats du test pour une période de 50 jours où des instabilités sont visibles :

cas 0 le test est correct à 100 %.

cas 1 la variation globale de débit a 1 jour de retard sur la variation théorique dans 100 % des cas. En effet les mécanismes de coordination implémentés au niveau des rôles gestionnaires de calendrier d'irrigation font que les modifications décidées alors qu'une irrigation est en cours sont reportées à la fin de cette irrigation. Puisque les irrigations se terminent toutes à minuit, les modifications interviennent donc le jour suivant. Le test reproduit donc bien ce qui doit se passer.

cas 2 des instabilités apparaissent. Les raisons sont de même ordre que pour les instabilités du test V1 : si une modification de calendrier est décidée entre l'action d'irrigation et sa mise en œuvre effective par la pompe d'entrée du réseau qui résulte de l'envoi d'une influence, le **Farmer** ne « voit » pas qu'une irrigation est en train d'être lancée et modifie tout de même son calendrier, si bien que cette irrigation devient « fantôme », puisqu'elle n'est plus reliée au calendrier d'irrigation.

Le schéma de la figure 92 illustre ce qui se passe pour les 3 cas.

Conclusions Le test V2 confirme les conclusions du test V1 : à défaut de mieux sécuriser les entités et de revoir de plus près nos tests de coordination, nous choisissons de décaler les événements.

En prenant garde à décaler les événements issus de différents types de groupe, la mise en œuvre de tours d'eau dans les conditions d'un scénario de référence (modulation de l'irrigation en débit) fonctionne.

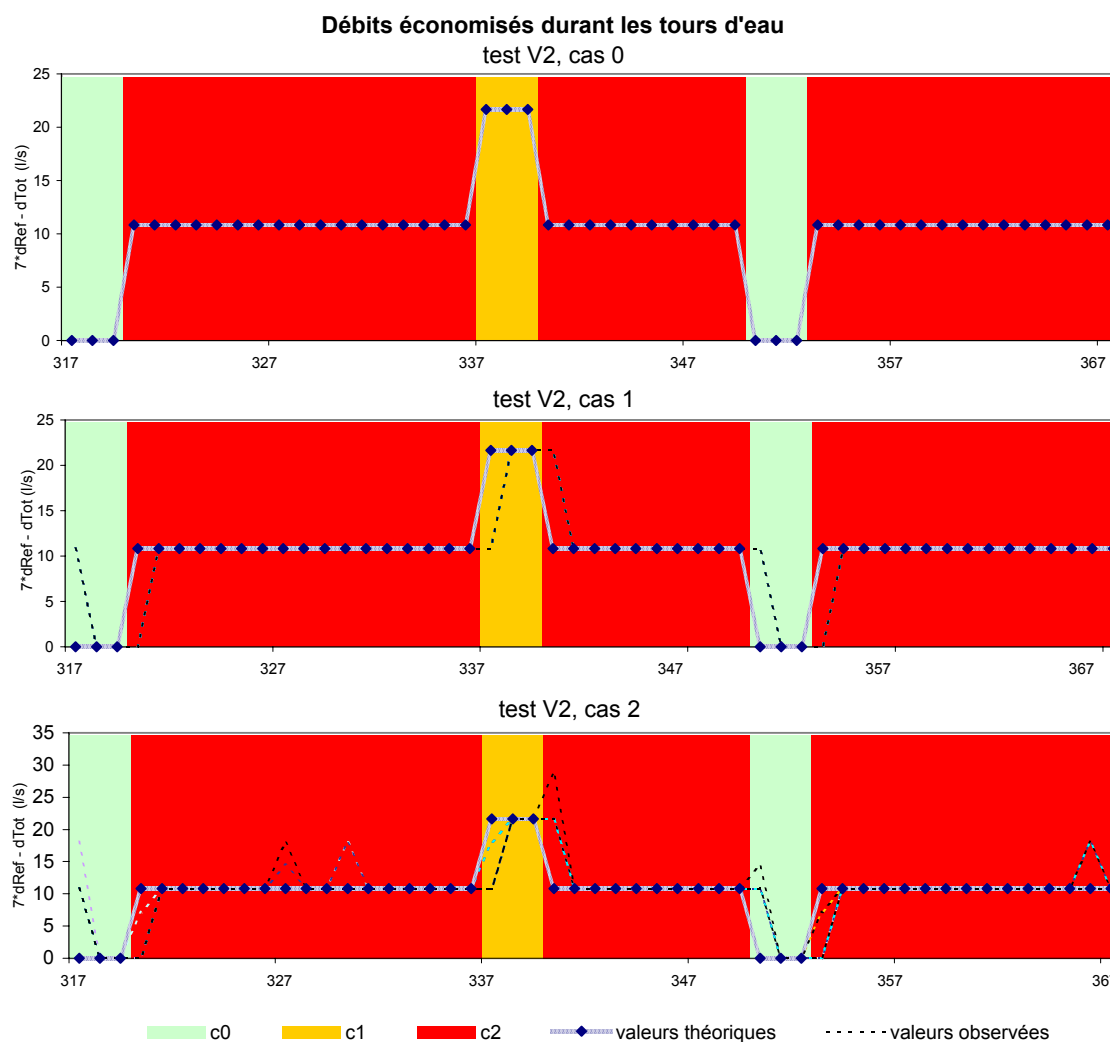


FIG. 91 – Résultats du test V2 dans les 3 cas pour les jours 317 à 368. Les courbes pointillées représentent chacune des 20 simulations

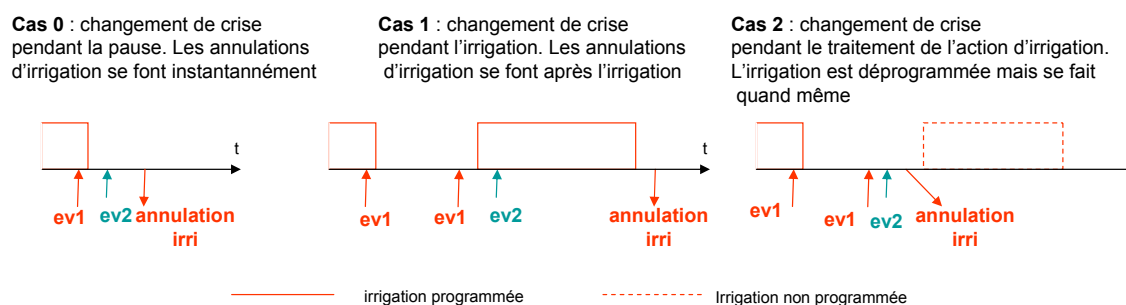


FIG. 92 – Test V2, synchronisation des événements sur les 3 cas : explications

2.3.3 Test V3 : diversification des comportements individuels

						Test V3
Protocole	•Système : 1 irrigant connecté à la rivière. •Scénarios : • Attribution d'un des 4 rôles CalendarManager et d'un des 2 types d'exploitant à l'irrigant selon M; •5 scénarios.					
Système	Farm ↓ 6 Crop <6----- Basin • Rôles des irrigants : selon M. • Les autres rôles sont ceux du scénario de référence.					
Paramètres	Les valeurs de date représentent le nombre de jours depuis le 1er avril de l'année simulée, début de la campagne.					
Entrées : paramètres du test						
Nom	Description	Valeurs parcourues				
farmType	Type de l'exploitant	farmType ∈ {tF, tP}				
capa	Niveau de contrainte en eau	capa ∈ {#flowCapa, #short, #middle, #wide} (capa détermine le type de rôle CM)				
Entrées : paramètres du modèle fixés à des valeurs particulières pour le test						
Nom	Description	Valeurs fixées				
capaPump	capacité pompe irrigant	capa	#flowCapa	#wide	#middle	#short
		capaPump (m3/h)	80	200	90	45
C	Type de culture d'une parcelle	C ∈ {M, MS, T} (M pour Maïs, MS pour Maïs Semence, T pour Tomate).				
profSol	Type de sol des parcelles	profSol = #leger pour les 6 parcelles (rfuMax = 33mm; rsuMax=17mm)				
CM	Rôle de gestion de calendrier de l'irrigant	capa	#flowCapa	#wide	#middle	#short
		CM	FM_F	TMW_F	TMM_F	TMS_F
Sorties : variables observées						
Nom	Description	Valeurs théoriques				
jSemis(C)	date de semis de la culture de type C	farmType	C=M	C=MS	C=T	
		tF	tirage normal μ =15; σ= 7.5	tirage normal μ =50; σ= 5	tirage normal μ =50; σ= 5	
		tP	retirage si jSemis ∉ [1;30]	retirage si jSemis ∉ [40;60]	retirage si jSemis ∉ [40;60]	
jIrri(C)	date de lancement de l'irrigation pour la culture de type C	tF	76	76	jSemis(T)	
		tP	86	86	jSemis(T)	
doselrri(C)	dose hebdomadaire apportée à la culture de type C (mm)	tF	jour < 90 (semaine 13)	30	30	15
			90 ≤ jour<102	30	30	35
			102 ≤ jour<139	40	30	35
			139 ≤ jour	30	30	35
		tP	semaine 11	13	13	13
			semaine 12	44	44	44
			semaine 13	48	48	48
			semaine 14	19	19	19
			semaine 15	0	0	0
			semaine 16	42	42	52
			semaine 17	49	49	56
			semaine 18	47	47	42
			semaine 19	44	44	39
			semaine 20	40	40	36
			semaine 21	27	27	24
			semaine 22	18	18	18
			semaine 23	2	2	1
jFinIrri(C)	date de fin de l'irrigation de la culture de type C	tF	jSemis(C)+156	jSemis(C)+98	jSemis(C)+90	
		tP				

Commentaires sur le protocole Les résultats théoriques donnés ont été établis en utilisant directement les équations sous-tendant les pratiques (voir tableau 38 dans le chapitre 6) et les fichiers de données climatiques dans un tableur (année climatique 1993, sols légers). Pour caler les résultats il a fallu prendre garde à ce que le jour 1 d’une semaine soit le même dans la simulation du tableur et dans GibiH (la semaine 1 commence le jour 4).

Résultats Les résultats se décomposent en 2 parties : état des parcelles et dates des actions (graphe 93), et doses apportées durant la période d’irrigation (graphe 95). Sur les histogrammes des dates des actions, les différence entre les nombres de réalisation d’une culture d’un type de comportement à un autre tiennent au fait que les 2 types d’exploitants n’ont pas le même nombre de parcelles de chaque culture

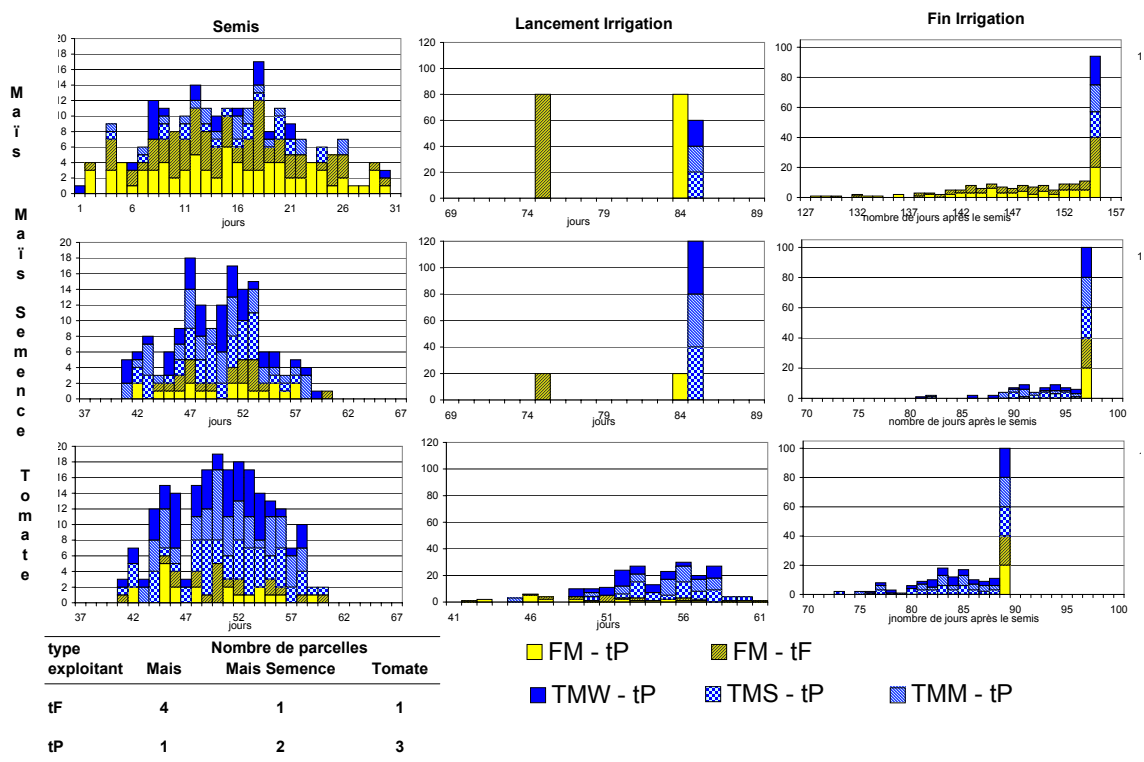


FIG. 93 – Test V3 : Dates des actions des exploitants pour chaque type de culture. Chaque graphe est un histogramme montrant le nombre de réalisations d’une action durant un jour donné

Résultats sur les dates de semis (colonne 1 graphe 93) Pour tous les comportements, les dates de semis suivent bien comme prévu une loi normale entre les bornes propres à la culture. Le test de la droite de Henry (application d’une loi normale inverse sur les variables centrées réduites) a été effectué pour chaque culture et chaque comportement (voir graphe 94). Le biais qui apparaît sur toutes les courbes (inflexion des points autour de la droite) est dû au fait que le tirage est tronqué : si une date de semis tirée sort de l’intervalle défini pour chaque culture, elle est tirée à nouveau.

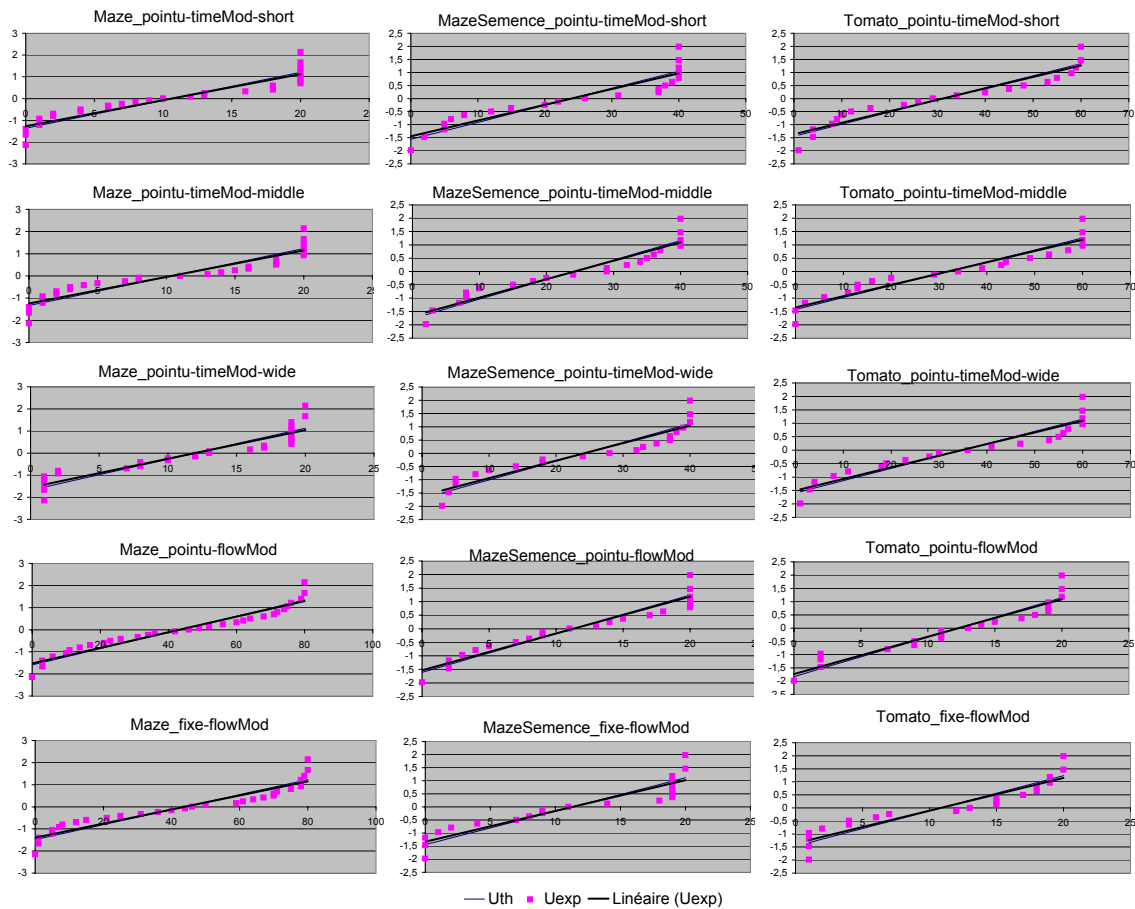


FIG. 94 – Test de la droite de Henry : Uth est la droite représentant une loi normale ; Uexp sont les points des dates de semis centrées réduites auxquels une loi normale inverse a été appliquée ; linéaire(Uexp) est la régression linéaire des points Uexp. Uth et linéaire(Uexp) sont suffisamment proches pour être confondues sur les différentes courbes.

Résultats sur les dates de lancement de l'irrigation (colonne 2 graphe 93) Les résultats sont conformes aux dates prévues à 1 ou 2 jours près, dus aux ajustements de calendrier. Pour la tomate l'étalement des dates de lancement suit bien celui des dates de semis. La déformation vers la droite est due au fait que le lancement de l'irrigation a lieu après le semis de la dernière parcelle.

Résultats sur les dates de fin de l'irrigation (colonne 3 graphe 93) Les résultats montrent le nombre de réalisations de l'action en fonction du nombre de jours après le semis de la parcelle. L'étalement est dû au fait que : si *durationIrrigation* est la durée théorique de l'irrigation d'un type de culture, la fin de l'irrigation intervient *durationIrrigation* jours après le semis de la **première** parcelle de ce type de culture, et en même temps pour toutes les parcelles. Pour chaque parcelle, si *dateSemis1* est la date de semis de la première parcelle et *dateSemis* la date de semis de la parcelle, la durée de l'irrigation est alors de $durationIrrigation - (dateSemis - dateSemis1)$. Le résultat observé est donc conforme aux comportements implémentés.

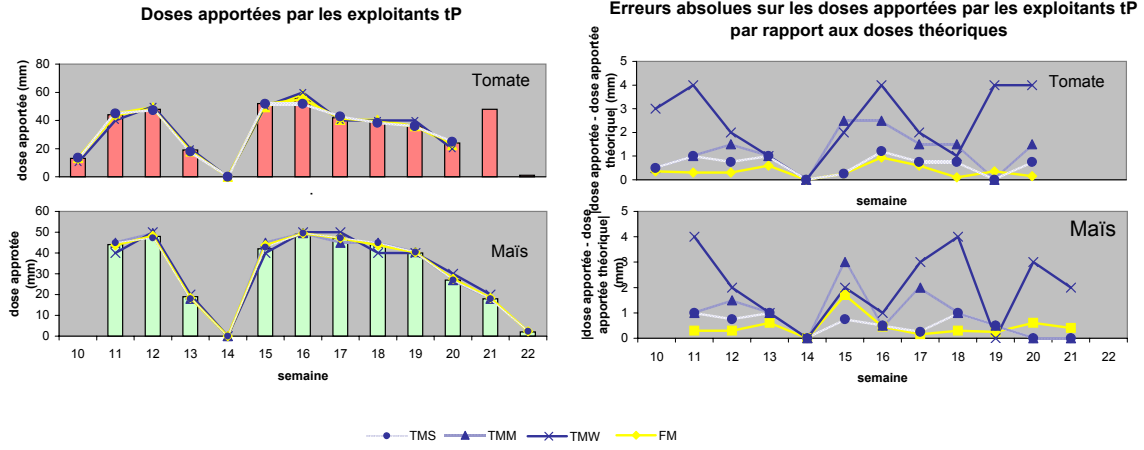


FIG. 95 – Test V3 : Doses apportées par les irrigants de type tP. Valeurs observées et erreurs absolues. Les courbes sont tracées pour toutes les simulations

Résultats sur les doses apportées (graphe 95) On vérifie ici la capacité des différents types de rôles *CalendarManager* à mettre en œuvre les doses prescrites. On ne montre donc les résultats que pour un seul type d'exploitant, et les doses pour le maïs et le maïs semence étant les mêmes, pour le maïs et la tomate seulement. On observe tout d'abord qu'il n'y a pas de variabilité sur le calcul des doses au sein d'un même comportement, ce qui est conforme aux hypothèses du modèle.

Les erreurs observées entre dose apportée et dose théorique correspondent aux répercussions de la précision donnée aux irrigants pour moduler leur irrigation.

Avec $dose (mm) = \frac{duree\ irrigation (h) * capacite\ pompe\ m^3/h}{20}$:

- dans le cas des **FlowManager** : $\Delta dose = \frac{23 * \Delta capacite}{20}$.

Et, puisque le débit des pompes ne se module que par valeurs entière de m^3/h , $\Delta dose \simeq 1.25\ mm$;

- dans le cas des **TimeManager** : $\Delta dose = \frac{\Delta duree * capacite}{20}$.

Et, puisque la durée d'irrigation ne se module qu'en heures,
pour les TMS_F (capacités de $45\ m^3/h$), $\Delta dose \simeq 2.25\ mm$;
pour les TMM_F (capacités de $90\ m^3/h$), $\Delta dose \simeq 4.5\ mm$;
pour les TMW_F (capacités de $200\ m^3/h$), $\Delta dose \simeq 10\ mm$.

Pour chacun des comportements, les erreurs observées sur les graphes de la figure 95 sont de l'ordre de $\frac{\Delta dose}{2}$, ce qui correspond à l'erreur de précision prévue.

Ces erreurs de précision tiennent bien sûr à la discrétisation de la modélisation, mais pourraient aussi permettre de rendre compte de la précision accessible dans la réalité.

Conclusion Ce test assure du fonctionnement des différents comportements des irrigants en environnement non contraint.

Il souligne aussi les défauts de certaines hypothèses des comportements : l'étalement des dates de semis sur des durées de 20 ou 30 jours notamment, qui entraîne la récolte de parcelles non mures et est de plus peu réaliste : il faudrait regrouper les semis d'un même irrigant.

Enfin, il souligne l'importance des hypothèses faites sur la précision des variables, qui se réper-

cutent sur les résultats globaux : il faut prendre garde à garder la précision des variables conforme à la précision accessible dans la réalité afin de ne pas modéliser des ajustements irréalistes.

2.3.4 Test V4 : comportements de copie

Test V4 1ere partie		
Protocole	•Système : 4 irrigants connectés à la rivière, 2 copieurs et 2 pionniers.	
Système		• Rôles des irrigants : 2 pionniers, 2 copieurs . • Les autres rôles sont ceux du scénario de référence. •Signification de la double flèche : Dans Neighbourhood, un rôle « central » commande et 3 rôles « périphériques » sont observés : l'irrigant est « central » dans un Neighbourhood et « périphérique » dans 3 autres.
Paramètres	Les valeurs de date représentent le nombre de jours depuis le 1er avril de l'année simulée, début de la campagne.	
Entrées : paramètres du test		
Nom	Description	Valeurs fixées
jlriP	Dates de lancement de l'irrigation des pionniers	Fixées par le rôle ManagerStartFixe
doselrriP	Doses hebdomadaires des pionniers	Fixées par le rôle ManagerlrriFixe
C	Type de culture d'une parcelle	C ∈ {M, MS, T} (M pour Maïs, MS pour Mais Semence, T pour Tomate).
Sorties : variables observées		
Nom	Description	Valeurs théoriques
jlriC(C)	date de lancement de l'irrigation des copieurs pour la culture de type C	jlriP(C) du premier à lancer l'irrigation sur C
doselrriC(C)	dose hebdomadaire apportée par les copieurs à la culture de type C (mm)	doselrriP du premier à avoir lancé l'irrigation sur C

Test V4 2eme partie		
Protocole	•Système : celui du scénario de référence. •Scénarios : • Initialisation avec un nombre de pionniers selon M, placés aléatoirement . Les autres irrigants sont des copieurs. •15 scénarios.	
Paramètres	Les valeurs de date représentent le nombre de jours depuis le 1er avril de l'année simulée, début de la campagne.	
Entrées : paramètres du test		
Nom	Description	Valeurs fixées
nP	Nombre de pionniers	nP ∈ {1,3,5,7,9,10,20,30,40,50,60,70,80,90,100}
Entrées : paramètres du modèle fixés à des valeurs particulières pour le test		
Nom	Description	Valeurs fixées
C	Type de culture d'une parcelle	C ∈ {M, MS, T} (M pour Maïs, MS pour Mais Semence, T pour Tomate).
Sorties : variables observées		
Nom	Description	Valeurs théoriques
nCopyStart(C)	Nombre de copieurs à avoir lancé l'irrigation sur la culture de type C	Observée en fonction du temps. Doit arriver à 100% des copieurs de plus en plus vite quand nP augmente

Commentaires sur le protocole Dans le système complet (2^{de} partie du test), le réseau de voisinage est constitué de manière à ce que chaque rive soit entièrement connexe (voir figure 82 dans le chapitre précédent). Le test vérifie la connexité du réseau sur chaque rive et évalue les temps de propagation en plaçant des pionniers au selon un tirage uniforme parmi les exploitations de la rive.

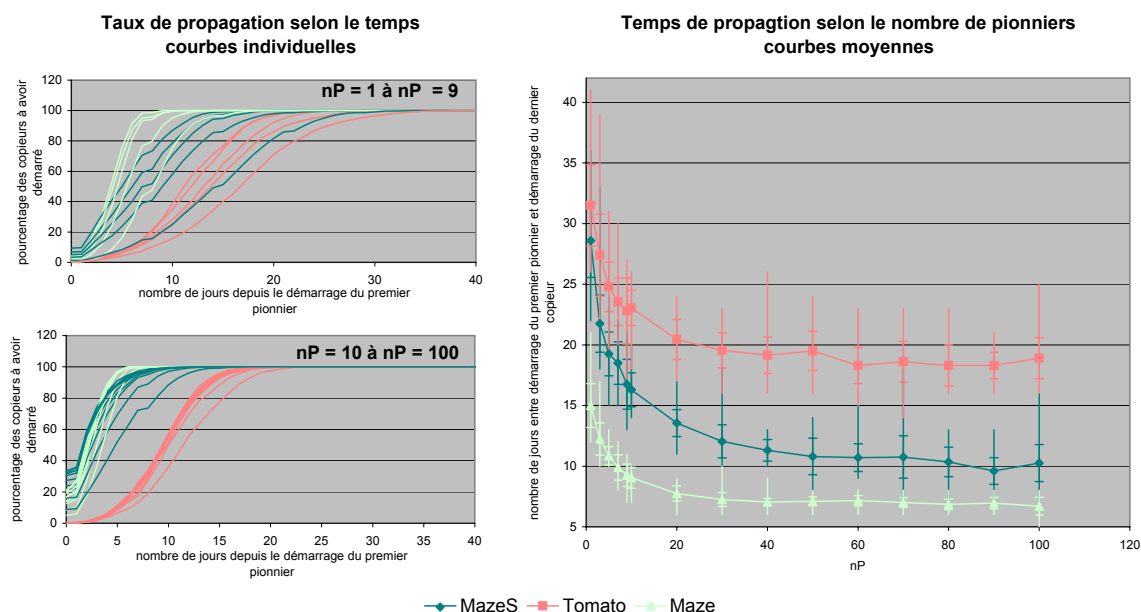


FIG. 96 – Test V4 : résultats du test de propagation du lancement de l'irrigation pour les différents types d'assolement

Résultats

Première partie du test Les résultats de la première partie du test confirment que la copie des dates de lancement et des doses d'irrigation se fait correctement à l'intérieur d'un voisinage, pour tous les types de culture.

Seconde partie du test Les résultats de la seconde partie du test sont donnés par les courbes de la figure 96.

Le temps de propagation moyen sur 20 simulations pour un type de culture tend vers une valeur seuil à partir de 40 pionniers par rive. Ceci correspond environ à environ la moitié des irrigants de la rive (il y a 87 irrigants sur la rive droite, et 93 irrigants sur la rive gauche), et au seuil à partir duquel la répartition des pionniers devient stochastiquement uniforme.

Ce seuil est de 7 jours environ pour le maïs, de 11 jours environ pour le maïs semence, et de 18 jours environ pour la tomate. La différence entre ces valeurs s'explique par le fait qu'un copieur ne lance l'irrigation d'une culture que quand il « voit » un de ses voisins irriguer cette culture. Compte tenu des contraintes de calendrier (1 parcelle irriguée chaque jour de la semaine), le lancement se propage d'autant plus vite que le nombre de parcelles d'une culture par irrigant est important. Dans ce test, tous les irrigants ont 4 parcelles de maïs, 1 parcelle de maïs semence et 1 parcelle de tomate, ce qui explique le seuil plus faible du maïs. Une autre différence est

que le lancement de la tomate est étalé sur 20 jours (il se fait au semis), alors que celui des 2 autres cultures se fait à la même date pour tous les pionniers. Or on mesure le temps entre le lancement du premier pionnier et celui du dernier copieur, si bien que le seuil est augmenté par l'étalement des lancements des pionniers.

La dispersion des résultats entre les différentes simulations, qui traduit l'influence de l'emplacement initial des pionniers, est d'autant plus importante qu'il y a moins de parcelles d'une culture par irrigant : les valeurs de seuil oscillent entre 5 et 8 jours pour le maïs, entre 8 et 15 jours pour le maïs semence, et entre 16 et 25 jours pour la tomate. On peut supposer que les valeurs les plus faibles sont obtenues pour les répartitions de pionniers les plus uniformes. Ce seuil reste cependant toujours supérieur à 5 jours, ce qui laisse supposer que l'on n'a jamais atteint une configuration où tous les copieurs ont un voisin direct pionnier qui commence à irriguer son maïs dès le premier jour.

Conclusions Le test confirme que les comportements de copie fonctionnent, et que le réseau de voisinage est bien connexe sur chaque rive. Pour aller plus loin, il faudrait explorer l'influence d'un réseau de voisinage :

- en créant des zones pionnières ;
- ou en rompant la connexité du réseau.

2.3.5 Test V5 : Comportements de crise

		Test V5																																																										
Protocole	•Système : 7 irrigants connectés à 1 réseau avec tour d'eau. •Scénario : •le gestionnaire du réseau décrète des périodes de crise suivant M(TVal). •Les irrigants mettent 30 mm sur 1 parcelle quand c'est leur tour. •Comportements des irrigants initialisé avec M(TTraj). •Règle collective de crise du réseau selon M(TTraj). •16 scénarios.																																																											
Système	Farm IrrigationAssociation Crop IrrigationNetwork Basin 7 6 1																																																											
Comportements particuliers	Ce test réutilise les rôles tests de V2. Le reste du système est initialisé avec les rôles du scénario de référence. <table><tr><td></td><td>IrrigationAssociation</td><td>Farm</td><td>Basin</td></tr><tr><td>Climate</td><td></td><td></td><td>EntryPointTest</td></tr><tr><td>Farmer</td><td>ManagerTestCompl</td><td>ManagerIrriTestCompl</td><td></td></tr></table> Hérite de Manager. Envoie contrainte tour d'eau au début. Décrète période de crise en suivant M(TVal). Ne prend que les transitions autorisées : {c0→c1; c1→c2;c1→c0;c2→c0} Hérite de ManagerIrri Pris en charge dès le début. Fixe dose quotidienne à 30 mm. Hérite de EntryPoint Fournit 200 l/s tous les jours.			IrrigationAssociation	Farm	Basin	Climate			EntryPointTest	Farmer	ManagerTestCompl	ManagerIrriTestCompl																																															
	IrrigationAssociation	Farm	Basin																																																									
Climate			EntryPointTest																																																									
Farmer	ManagerTestCompl	ManagerIrriTestCompl																																																										
Paramètres	<table><tr><th colspan="3">Entrées : paramètres du test</th></tr><tr><th>Nom</th><th>Description</th><th>Valeurs parcourues</th></tr><tr><td>cr</td><td>niveau de crise</td><td>$cr \in \{0,1,2\}$</td></tr><tr><td>ext</td><td>durée de la période de crise (jours)</td><td>$ext \in \{1,3,7,10\}$</td></tr><tr><td>MC</td><td>rôle de gestion de crise</td><td>$MC \in \{ManagerCrisisGibi, ManagerCrisisEtale\}$</td></tr><tr><td>capa</td><td>niveau de contrainte en eau</td><td>$capa \in \{\#flowCapa, \#short, \#middle, \#wide\}$</td></tr><tr><td>rCol</td><td>règle collective de crise</td><td>$regleCol \in \{\emptyset, \#tourEau\}$</td></tr></table> <table><tr><th colspan="3">Entrées : paramètres du modèle fixés à des valeurs particulières pour le test</th></tr><tr><th>Nom</th><th>Description</th><th>Valeurs fixées</th></tr><tr><td>doseMax (mm)</td><td>dose maximum dans un journée (dépend capacité)</td><td><table><tr><th>capa</th><th>#flowCapa</th><th>#wide</th><th>#middle</th><th>#short</th></tr><tr><td></td><td>92</td><td>51.7</td><td>103.5</td><td>110</td></tr></table></td></tr><tr><td>doseRef (mm)</td><td>Dose apportée dans une journée (dépend de c et de crisisRole)</td><td><table><tr><th>MC</th><th>MCG</th><th>MCE</th></tr><tr><td></td><td>30, ∀ c</td><td>$\begin{cases} 30, c = c0 \\ doseMax, c \neq c0 \end{cases}$</td></tr></table></td></tr></table> <table><tr><th colspan="3">Sorties : variables observées</th></tr><tr><th>Nom</th><th>Description</th><th>Valeurs théoriques</th></tr><tr><td>dose_{i,j}</td><td>quantité irriguée de l'irrigant i le jour j (mm)</td><td>voir figure 16 (page suivante)</td></tr></table>		Entrées : paramètres du test			Nom	Description	Valeurs parcourues	cr	niveau de crise	$cr \in \{0,1,2\}$	ext	durée de la période de crise (jours)	$ext \in \{1,3,7,10\}$	MC	rôle de gestion de crise	$MC \in \{ManagerCrisisGibi, ManagerCrisisEtale\}$	capa	niveau de contrainte en eau	$capa \in \{\#flowCapa, \#short, \#middle, \#wide\}$	rCol	règle collective de crise	$regleCol \in \{\emptyset, \#tourEau\}$	Entrées : paramètres du modèle fixés à des valeurs particulières pour le test			Nom	Description	Valeurs fixées	doseMax (mm)	dose maximum dans un journée (dépend capacité)	<table><tr><th>capa</th><th>#flowCapa</th><th>#wide</th><th>#middle</th><th>#short</th></tr><tr><td></td><td>92</td><td>51.7</td><td>103.5</td><td>110</td></tr></table>	capa	#flowCapa	#wide	#middle	#short		92	51.7	103.5	110	doseRef (mm)	Dose apportée dans une journée (dépend de c et de crisisRole)	<table><tr><th>MC</th><th>MCG</th><th>MCE</th></tr><tr><td></td><td>30, ∀ c</td><td>$\begin{cases} 30, c = c0 \\ doseMax, c \neq c0 \end{cases}$</td></tr></table>	MC	MCG	MCE		30, ∀ c	$\begin{cases} 30, c = c0 \\ doseMax, c \neq c0 \end{cases}$	Sorties : variables observées			Nom	Description	Valeurs théoriques	dose _{i,j}	quantité irriguée de l'irrigant i le jour j (mm)	voir figure 16 (page suivante)
Entrées : paramètres du test																																																												
Nom	Description	Valeurs parcourues																																																										
cr	niveau de crise	$cr \in \{0,1,2\}$																																																										
ext	durée de la période de crise (jours)	$ext \in \{1,3,7,10\}$																																																										
MC	rôle de gestion de crise	$MC \in \{ManagerCrisisGibi, ManagerCrisisEtale\}$																																																										
capa	niveau de contrainte en eau	$capa \in \{\#flowCapa, \#short, \#middle, \#wide\}$																																																										
rCol	règle collective de crise	$regleCol \in \{\emptyset, \#tourEau\}$																																																										
Entrées : paramètres du modèle fixés à des valeurs particulières pour le test																																																												
Nom	Description	Valeurs fixées																																																										
doseMax (mm)	dose maximum dans un journée (dépend capacité)	<table><tr><th>capa</th><th>#flowCapa</th><th>#wide</th><th>#middle</th><th>#short</th></tr><tr><td></td><td>92</td><td>51.7</td><td>103.5</td><td>110</td></tr></table>	capa	#flowCapa	#wide	#middle	#short		92	51.7	103.5	110																																																
capa	#flowCapa	#wide	#middle	#short																																																								
	92	51.7	103.5	110																																																								
doseRef (mm)	Dose apportée dans une journée (dépend de c et de crisisRole)	<table><tr><th>MC</th><th>MCG</th><th>MCE</th></tr><tr><td></td><td>30, ∀ c</td><td>$\begin{cases} 30, c = c0 \\ doseMax, c \neq c0 \end{cases}$</td></tr></table>	MC	MCG	MCE		30, ∀ c	$\begin{cases} 30, c = c0 \\ doseMax, c \neq c0 \end{cases}$																																																				
MC	MCG	MCE																																																										
	30, ∀ c	$\begin{cases} 30, c = c0 \\ doseMax, c \neq c0 \end{cases}$																																																										
Sorties : variables observées																																																												
Nom	Description	Valeurs théoriques																																																										
dose _{i,j}	quantité irriguée de l'irrigant i le jour j (mm)	voir figure 16 (page suivante)																																																										

Commentaires sur le protocole Le tableau de la figure 97 rend compte de la dose d'irrigation théorique appliquée par un agriculteur un jour de la semaine en fonction du niveau de crise.

		$calendarRole \in \{FM, TMS, TMM\}$	$calendarRole = TMW$
$regleCol = noRule$	c0	$\begin{cases} doseRef, \forall j \neq 0, \forall i \\ 0, j = 0, \forall i \end{cases}$	$\begin{cases} 2 * doseRef, \forall j \in \{1, 2, 3\}, \forall i \\ 0, \forall j \notin \{1, 2, 3\}, \forall i \end{cases}$
	c1/c2	$0, \forall j, \forall i$	
$regleCol = tourEau$	c0/c1	$\begin{cases} doseRef, \forall j \neq i \\ 0, \forall j = i \end{cases}$	$\begin{cases} 2 * doseRef, \forall j \notin \{i, i+1, i+2, i+3\}, \forall i \\ 0, \forall j \in \{i, i+1, i+2, i+3\}, \forall i \end{cases}$
	c2	$\begin{cases} doseRef, \forall j \notin \{i, i+1\} \\ 0, \forall j \in \{i, i+1\} \end{cases}$	

FIG. 97 – Calcul de la dose $d_{i,j}$ appliquée par l'irrigant i le jour de la semaine j selon le niveau de crise, la règle collective et le rôle de gestion du calendriers

Si il n'y a pas de règle collective, les irrigants n'arrosent pas le dimanche en temps normal, et rajoutent une irrigation le dimanche en cas de crise. La gestion de calendrier de type **TimeManagerWide** autorise 2 irrigations par jour : l'irrigation n'a lieu que 3 jours consécutifs de la semaine n'incluant pas le dimanche en temps normal, auxquels on rajoute le dimanche en cas de crise.

Si il existe une règle collective de tour d'eau, les irrigants savent dès le début de la campagne quels sont les jours d'arrêt qui leur sont attribués en cas de crise : ils irriguent tous les jours sauf le premier de leurs jours d'arrêt et leur comportement ne varie donc pas en crise c1, où le jour d'arrêt devient interdit. En c2, c'est le jour suivant qui est aussi interdit et l'irrigation y est donc annulée.

Pour les **TimeManagerWide**, les 2 jours d'arrêt sont parmi les 4 jours sans irrigation et le comportement reste donc toujours le même quelque soit le niveau de crise.

Le type de rôle **ManagerCrisis** n'intervient en fait que dans le calcul de la dose apportée en cas de crise : les **ManagerCrisisEtale** irriguent au maximum quand ils irriguent. On pourrait bien sûr imaginer d'autres rôles de gestion de crise agissant sur la programmation des doses en effectuant des reports par exemple, ou en ne respectant pas les tours d'eau.

Enfin, hormis **TimeManagerWide** qui programme 2 irrigations par jours, les différents types de **CalendarManager** ne font qu'agir sur la répartition de l'irrigation dans la journée.

Résultats Le graphe de la figure 98 reporte les doses apportées différant des doses théoriques calculées par les équations du tableau 97 pour chacune des 320 simulations. Il n'y a pas de variabilité entre les 20 simulations d'un même scénario.

Les erreurs ne se produisent que dans les scénarios sans règle collective, sur l'irrigation du dimanche, à chaque fois qu'un changement de niveau de crise a lieu un samedi ou un dimanche (jour 0 de la semaine) : en effet, les irrigations rajoutées le dimanche en cas de crise sont programmées le samedi, si bien que si le changement de crise a lieu le samedi ou le dimanche, l'irrigation du dimanche n'a pas le temps de se programmer ou de se déprogrammer.

Conclusion Le test V5 confirme le fonctionnement des rôles de gestion de crise et de la mise en œuvre des règles collectives par les différents types d'irrigants.

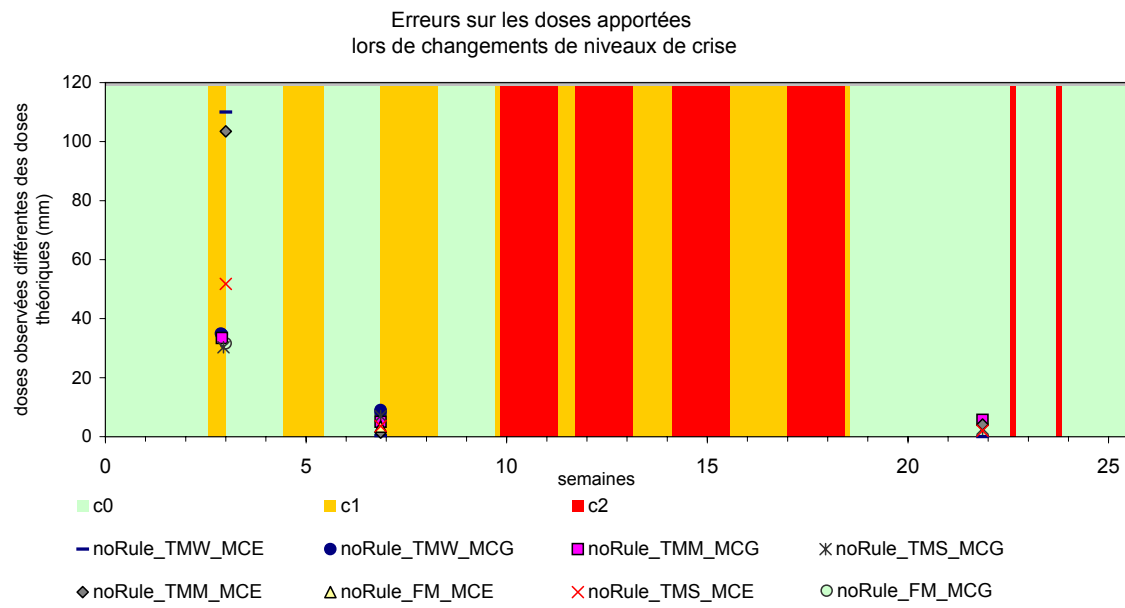


FIG. 98 – Test V5 : Erreurs lors des changements de crise

2.3.6 Test V6 : comparaison par rapport à GibiDrome

Le test consiste à comparer le scénario de référence dans GibiDrome et dans GibiAGR.

L'**observation** des sorties de manière comparée pose problème vis à vis de la gestion du temps, puisqu'une seule observation par jour est possible sur GibiDrome, alors que plusieurs sont possibles sur GibiAGR. Pour avoir des valeurs comparables, on peut observer dans GibiAGR soit le débit instantané pendant que tout le monde irrigue (à 12.00) par exemple, soit le débit moyen sur la journée. Il y a un décalage entre ces 2 valeurs parce que, afin de ménager un moment dans la journée où il n'y a pas d'irrigation, et où certaines actions interdites lorsqu'il y a des irrigations puissent se faire, les irrigation de GibiAGR se font sur 23 heures.

C'est avec le débit moyen que l'on devrait retrouver les valeurs de GibiDrome, puisque la commande des irrigations se fait par rapport à la dose quotidienne.

Lors des premiers tests, les résultats des 2 modèles étaient différents. La recherche des raisons de la différence entre les résultats des 2 modèles s'est faite en suivant successivement les pistes de

1. la vérification de GibiAGR : différence provenant d'une erreur d'implémentation ;
2. la vérification du méta-modèle : différence provenant d'un artefact introduit par AGR ou la gestion du temps par événements ;
3. la sensibilité des modèles : recherche d'un paramètre sensible qui différencierait d'un modèle à l'autre ;
4. vérification de GibiDrome : la différence venait en fait d'une erreur dans GibiDrome. En effet l'erreur ne changeait pas l'ordre ni la forme générale des résultats qui semblaient donc cohérents, et n'est apparue qu'en recherchant les raisons du décalage avec les résultats d'un autre modèle.

Lors de l'exploration de la 3eme piste, on s'est rendu compte que le dimanche ne tombait pas toujours un même jour dans les 2 modèles : le dimanche est toujours le jour 0 d'une série de 7 jours, mais les jours sont comptés à partir du début de la simulation (1er avril) dans GibiDrome, alors qu'ils sont comptés à partir du début de l'année dans GibiAGR (utilisation de dates directement dans le modèle).

On a donc mené une étude de sensibilité sur l'impact de l'index du dimanche dans GibiDrome en construisant 7 scénarios où pour chaque scénario $i, i \in [1..7]$, le dimanche est le jour i de la semaine. Chacun de ces scénarios a été simulé 20 fois.

La sensibilité a été étudiée sur le rendement potentiel final moyen des cultures du système, qui est le seul indice cumulé dont on dispose et est présentée sur la figure 99. L'influence en est non négligeable puisque alors que la variabilité au sein d'un même scénario est faible (barres d'erreur), la variabilité entre les différents scénarios est de l'ordre de 20%.

On a ensuite vérifié que l'on retrouvait les même valeurs dans GibiAGR, ce qui est le cas.

Finalement, on retrouve bien les mêmes résultats avec GibiAGR avec GibiDrome. Ceci constitue un élément de vérification du fait que, en respectant les recommandations par rapport à la programmation des actions dans le temps issue des tests V1 et V2, le formalisme AGR et la gestion du temps par événements n'induisent pas de biais dans les résultats de simulation.

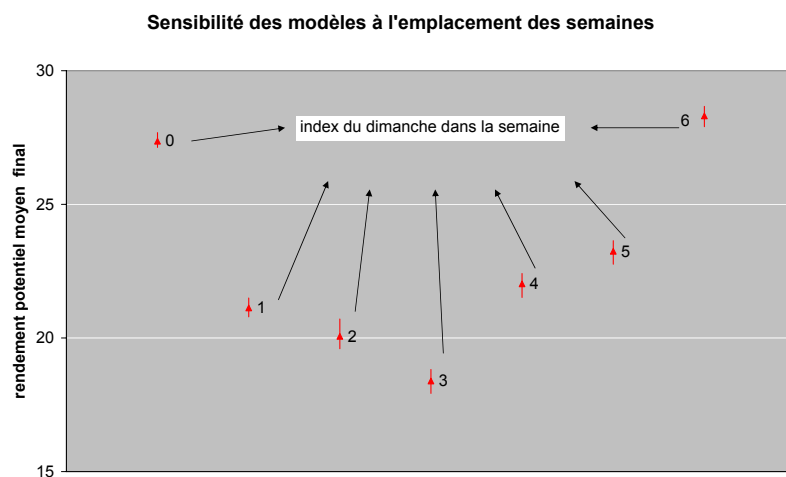


FIG. 99 – Test V6 : sensibilité de GibiDrome à l’index du dimanche. Valeurs moyennes pour un scénario + barres d’erreur min-max

3 Analyse de sensibilité

3.1 Définition des tests pratiqués

Les modèles multi-agents représentant des systèmes complexes réels comptent en général de nombreux paramètres. Les limites en temps de simulation, mais aussi et surtout en possibilité d'analyse d'un très grand nombre de scénarios font qu'une analyse de sensibilité globale, quantifiant les poids relatifs et les interactions des différents paramètres, n'est la plupart du temps pas adaptée.

Espace des valeurs des paramètres du modèle Ainsi, on examine l'espace des valeurs des paramètres induit par l'ensemble des paramètres listés dans le tableau 42 (paramètres utilisés pour définir le scénario de référence) en considérant que :

- les paramètres représentant une quantité chiffrée prennent, en plus de leur valeur de référence, une valeur haute et une valeur basse ;
- les paramètres décrivant des probabilités de réalisation des n modalités d'un paramètre prennent $n + 1$ valeurs :
 - les n valeurs menant à une distribution homogène des modalités du paramètre ;
 - la valeur menant à une distribution équiprobable des modalités du paramètre

Le décompte correspondant est détaillé dans le tableau 44.

Une analyse par plan factoriel complet impliquerait donc la simulation de $4 * 1200 * 3^3 * 18 * 9 * 6 = 125971200$ scénarios ! La méthode du plan factoriel complet est donc inapplicable. La méthode OAT³⁶ donne encore $3 + 16 + 6 + 5 + 4 + 3 + 1 = 38$ scénarios, soit 760 simulations, ce qui représente environ 90 heures de temps de calcul (une simulation dure entre 5 et 10 minutes).

Une analyse OAT complète est donc faisable, mais nous avons préféré mieux structurer notre analyse autour de questions particulières.

3.1.1 Questions abordées

On se restreint à 3 questions liées aux hypothèses sur le comportement individuel des irrigants, qui est le point sur lequel a porté la majeure partie du travail de modélisation :

S1 hypothèses sur les **stratégies des agriculteurs** : dans GibiDrome, les agriculteurs n'ont accès qu'à un seul type de culture et un seul type de stratégie de gestion de l'irrigation (doses fixes). Dans GibiH, 2 nouveaux types de culture ont été ajoutés, ainsi que 2 nouveaux mode de gestion de l'irrigation (« pointue », i.e. guidée au tensiomètre et par imitation des voisins).

Le test **S1** a pour but de déterminer si les stratégies des agriculteurs vis à vis de leur assolement et de leur irrigation telles qu'elles sont implémentées constituent un paramètre qui a un impact sur les résultats du modèle.

S2 hypothèses sur la **répartition des apports dans la journée** : dans GibiDrome, la contrainte sur la ressource au niveau individuel n'est pas représentée dans les réseaux (la ressource n'est contrainte qu'au niveau de l'entrée du réseau), et elle est la même pour tous les irrigants individuels. Et la modélisation d'un pas de temps quotidien unique revient à faire l'hypothèse que tous les irrigants répartissent leurs apports dans la journée de la même façon, en étalant leur irrigation sur toute la journée. Dans GibiH, 3 niveaux de contraintes sur la ressource individuelle ont été introduits, et la gestion du temps par événement a permis d'introduire

³⁶voir annexe H

Paramètre	Nombre de modalités	
Niveau global		
<i>clim</i>	3	quantité chiffrée : année de référence (année sèche) + 1 année très sèche et 1 année humide
<i>rCompl</i>	2	2 modalités existantes
Niveau du tableau de bord		
<i>errClim</i>	3	quantité chiffrée
<i>errKc</i>	3	quantité chiffrée
Niveau du bassin		
<i>partageRestr</i>	2	2 modalités existantes
<i>refRestr</i>	3	3 modalités existantes
<i>hObs</i>	3	quantité chiffrée : 1 heure moyenne, 1 heure creuse, et 1 heure de pointe
Niveau du réseau d'irrigation		
<i>rCol_i</i>	3	3 modalités existantes
Niveau de l'exploitation		
<i>modCal</i> , { <i>p</i> (#TMS_F) , <i>p</i> (#TMM_F) , <i>p</i> (#TMW_F)}	1+4	1 valeur pour <i>modCal</i> = #flow, 4 pour <i>modCal</i> = #time
{ <i>p</i> (MCE_F), <i>p</i> (MCG_F)}	3	2 distributions homogènes + 1 distribution équiprobable
{ <i>p</i> (MIC_F), <i>p</i> (MIF_F), <i>p</i> (MIP_F)}	4	3 distributions homogènes + 1 distribution équiprobable
{ <i>p</i> (MSA_F), <i>p</i> (MSD_F), <i>p</i> (MSM_F)}	4	3 distributions homogènes + 1 distribution équiprobable
{ <i>p</i> (MStC_F), <i>p</i> (MStCe_F), <i>p</i> (MStF_F), <i>p</i> (MStP_F)}	5	4 distributions homogènes + 1 distribution équiprobable
Niveau de la parcelle		
{ <i>p</i> (#leger) , <i>p</i> (#moyen) , <i>p</i> (#profond)}	4	3 distributions homogènes + 1 distribution équiprobable

TAB. 44 – Espace des valeurs des paramètres des modèles

des comportements de répartition des apports dans la journée différents selon le niveau de contrainte.

Le test **S2** a pour but de déterminer si une différenciation des stratégies de répartition des apports dans la journée suivant le niveau de contrainte sur la ressource individuelle constitue un paramètre qui a un impact sur le modèle.

S3 hypothèse sur la **gestion de crise** : Dans GibiDrome, il n'y a pas de règle collective de gestion de crise au niveau des réseaux, et les irrigants ont un type de comportement de crise unique, qui est de rajouter une irrigation le dimanche. Dans GibiH, deux règles collectives de gestion de crise ont été introduites au niveau des réseaux (tour d'eau et attribution de l'eau en fonction du type de sol), et une nouvelle stratégie individuelle de gestion de crise a été créée (utiliser la ressource au maximum en étalant les apports sur toute la journée ou en prenant toute la capacité).

Le test **S3** a pour but de déterminer l'impact combiné d'une règle collective et de stratégies individuelles de gestion de crise sur le modèle, et ce pour chacun des mode de gestion de calendrier représentés.

La sensibilité du modèle à la règle collective d'attribution de l'eau en fonction du type de sol ne sera cependant pas testée, son implémentation ayant été insuffisamment vérifiée.

3.1.2 Définition de l'espace des valeurs des paramètres

On se référera aux annexes **F** et **G** pour les abréviations et noms de paramètres.

S1 Les paramètres concernés sont les probabilités de réalisation des comportements de semis, de lancement et de gestion de l'irrigation. Plutôt que de pratiquer une OAT ou un plan factoriel complet sur ces paramètres, on choisit de réduire l'espace d'exploration en considérant que certains éléments de stratégie sont incompatibles avec d'autres et en créant un nouveau paramètre *typeFarmer* regroupant les 3 éléments de stratégie. On définit 3 modalités pour *typeFarmer* :

- **#maisculteur** : $MS = MSM\_F$; $MStF = MStF\_F$; $MI = MIF\_F$.

C'est la stratégie reproduisant le comportement d'un agriculteur de GibiDrome (tout maïs, irrigation à dates et doses fixes) ;

- **#audacious** : $MS = MSA\_F$; $MStF = MStP\_F$; $MI = MIP\_F$.

C'est la stratégie d'un agriculteur ayant axé son assolement sur des cultures à risque (dominante tomate) et pratiquant par conséquent une irrigation pointue (guidée par tensiomètre) ;

- **#diversified** : $MS = MSD\_F$; $MStF = MStC\_F$; $MI = MIC\_F$.

C'est la stratégie d'un agriculteur ayant diversifié son assolement et pratiquant la même irrigation que ses voisins (même dates et mêmes doses).

Les paramètres de S1 sont donc les probabilités de réalisation du paramètre *typeFarmer* : $\{p(\#maisculteur), p(\#audacious), p(\#diversified)\}$.

S2 Les paramètres concernés sont le mode de calcul des calendriers d'irrigation *modCal*, et les probabilités de réalisation des niveaux de ressource en eau $p(\#short)$, $p(\#middle)$, et $p(\#wide)$. Le test ne porte en fait que sur 1 paramètre, puisque *modCal* et les niveaux de ressources sont liés : si *modCal* = **#flow**, toutes les probabilités de réalisation sont nulles et les capacités de tous les irrigants égales à 80 l/s.

S3 Les paramètres concernés sont les règles collectives des réseaux *rCol*, le mode de calcul des calendriers d'irrigation *modCal*, et les probabilités de réalisation des comportements de crise *MC*, qui seront fixées aux cas homogènes. Pour *modCal* = **#time**, on fixera les probabilités de réalisation de *capa* au cas équiprobable. Le test porte donc finalement sur 3 paramètres à 2 modalités, dont on explorera toutes les combinaisons possibles.

Espaces des valeurs pour les paramètres représentant des probabilités de réalisation

On définit 2 types de distributions pour explorer les paramètres distribués sur les entités du modèle, et dont la valeur est fixée par des probabilités de réalisation :

- les distributions « extrêmes » : distribution homogène de chacune des modalités du paramètre³⁷ + distribution équiprobable de toutes les modalités³⁸.

L'exploration de ces distributions permet d'isoler la réponse du système à chacune des modalités, ainsi que sa réponse moyenne ;

³⁷réalisation de la modalité dans 100 % des cas

³⁸probabilité de réalisation identique pour chacune des modalités

- les distributions « locales » : petites variations autour des distributions extrêmes.

L'exploration de ces distributions permet de mesurer le poids des différentes modalités les unes par rapport aux autres en observant la sensibilité du système selon la direction dans laquelle on s'éloigne d'une distribution extrême.

Ces 2 types de distribution sont représentées sur la figure 100.

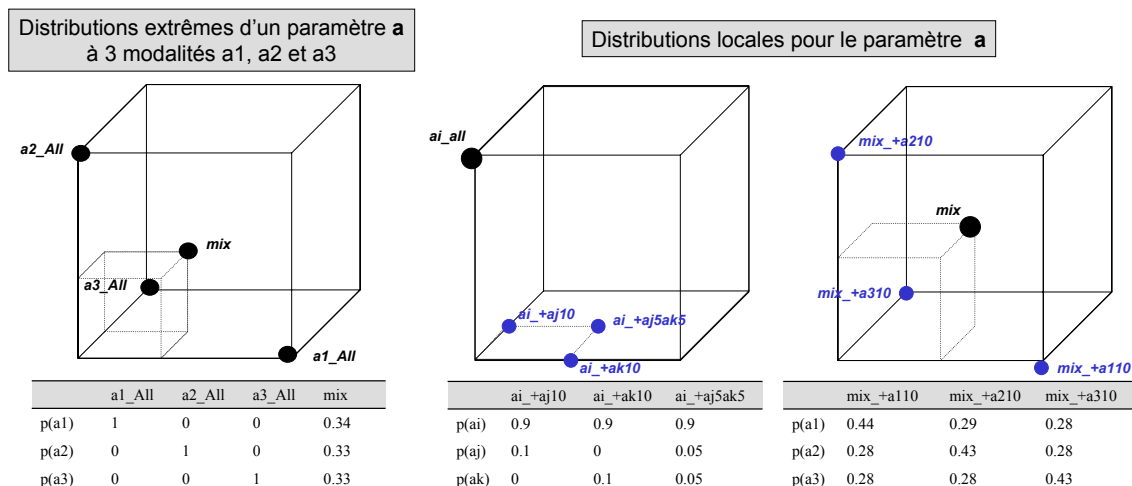


FIG. 100 – Espace des valeurs dans le cas de paramètres fixés par des probabilités de réalisation

3.1.3 Variables observées et analyse des observations

Pour chacune des questions soulevées par les tests, on pourra examiner 2 types d'indicateurs :

- indicateurs sur l'effet des prélèvements (niveau du bassin) : débits prélevés ($dPompe$), débit au seuil des PUES (à l'aval du système) ($dOut$) et jours de crise ($crise$);
- indicateurs sur l'effet des apports (niveau des exploitations) : stress hydrique moyen sur tout le bassin ($stress$).

- S1 On observera les débits prélevés moyens $QPompe$, les niveaux de crise $crise$, et les stress hydriques $stress$, afin de connaître les effets d'un paramètre à la fois au niveau individuel (stress des cultures) et au niveau global (débits prélevés et niveau de crise).
- S2 Afin de mesurer les effets du pas de temps infra-quotidien introduit à ce test, et notamment sur le déclenchement des crises, on s'intéressera aux jours de crise $crise$, et plus particulièrement aux différentes valeurs que peut prendre le débit au seuil des PUES dans la journée : débit journalier moyen $Qout$, débit de pointe haut $QiOutMax$, débit de pointe bas $QiOutMin$, débit à midi $QiOut12$ (débit instantané observé au niveau du bassin pour décider du passage en crise). On observera aussi les débits pompés moyens $QPompe$ et de pointe $QiPompeMax$ afin de connaître la forme des prélèvements, ainsi que les stress hydriques $stress$ pour connaître l'impact de la répartition des apports au niveau individuel.
- S3 On observera l'effet des modes de gestion de crise au niveau individuel (stress hydrique $stress$). Les réseaux réduisent leurs prélèvements au niveau du bassin de la même manière quelque soit leur règle collective. On observera cependant aussi les sorties au niveau du bassin ($QPompe$, $crise$ et $Qout$), parce que les différents modes de gestion de crise peuvent modifier la durée des périodes de crise.

Tous les paramètres observés étant enregistrées à la fin de chaque cycle de simulation par Cormas, le calcul des valeurs de débits journalières, de pointe ou à une certaine heure fait partie du travail de traitement de données.

Pour tous les tests, les résultats seront donnés pour les **sorties moyennes d'un scénario**, c'est à dire la valeur moyenne d'une sortie sur l'ensemble des simulations d'un scénario. Sur les graphiques, les **barres d'erreur** représentent les valeurs minimum et maximum de la sortie sur l'ensemble des simulations d'un scénario, ainsi que la déviation standard de la sortie sur l'ensemble des scénarios. Les niveaux de crise seront représentés par des codes de couleur : couleur pleine quand toutes les simulations du scénario sont au même niveau, et dégradé quand différents niveaux coexistent dans les simulations. Les niveaux de crise étant déterminés par un effet de seuil, les différences entre les simulations d'un scénario sont aplanies, et on n'a jamais eu à représenter la coexistence des 3 niveaux de crise.

Finalement, les tests de sensibilités correspondants sont résumés dans le tableau 45.

Paramètres		Variables observées
Description	Modalités	
S1 : Sensibilité aux stratégies des agriculteurs		
probabilités de réalisation de <i>typeFarmer</i> , <i>typeFarmer</i> ∈ {#maisculteur, #audacious, #diversified}	4 distributions extrêmes + 12 scénarios locaux	<i>QPompe</i> <i>crise</i> <i>stress</i>
S2 : Sensibilité à la répartition des apports dans la journée		
<i>modCal</i>	#time #flow	<i>Qout</i> <i>QiOutMax</i>
probabilités de réalisation de <i>capa</i> , <i>capa</i> ∈ { #short, #middle, #wide}	4 distributions extrêmes + 12 scénarios locaux pour <i>modCal</i> = #time, <i>capa</i> = #capaFlow pour <i>modCal</i> = #flow	<i>QiOutMin</i> <i>QiOut12</i> <i>QPompe</i> <i>QiPompeMax</i> <i>crise</i> <i>stress</i>
S3 : Sensibilité à la gestion de crise		
probabilités de réalisation de <i>MC</i> , <i>MC</i> ∈ {MCG_F, MCE_F}	2 distributions homogènes	<i>stress</i>
<i>rCol</i>	∅ #tourEau	<i>crise</i>
<i>modCal</i>	#time #flow	<i>QOut</i>
<i>capa</i>	distribution homogène de #capaFlow et distribution équiprobable de {#short, #middle, #wide}	<i>QPompe</i>

TAB. 45 – Description synthétique des tests de sensibilité

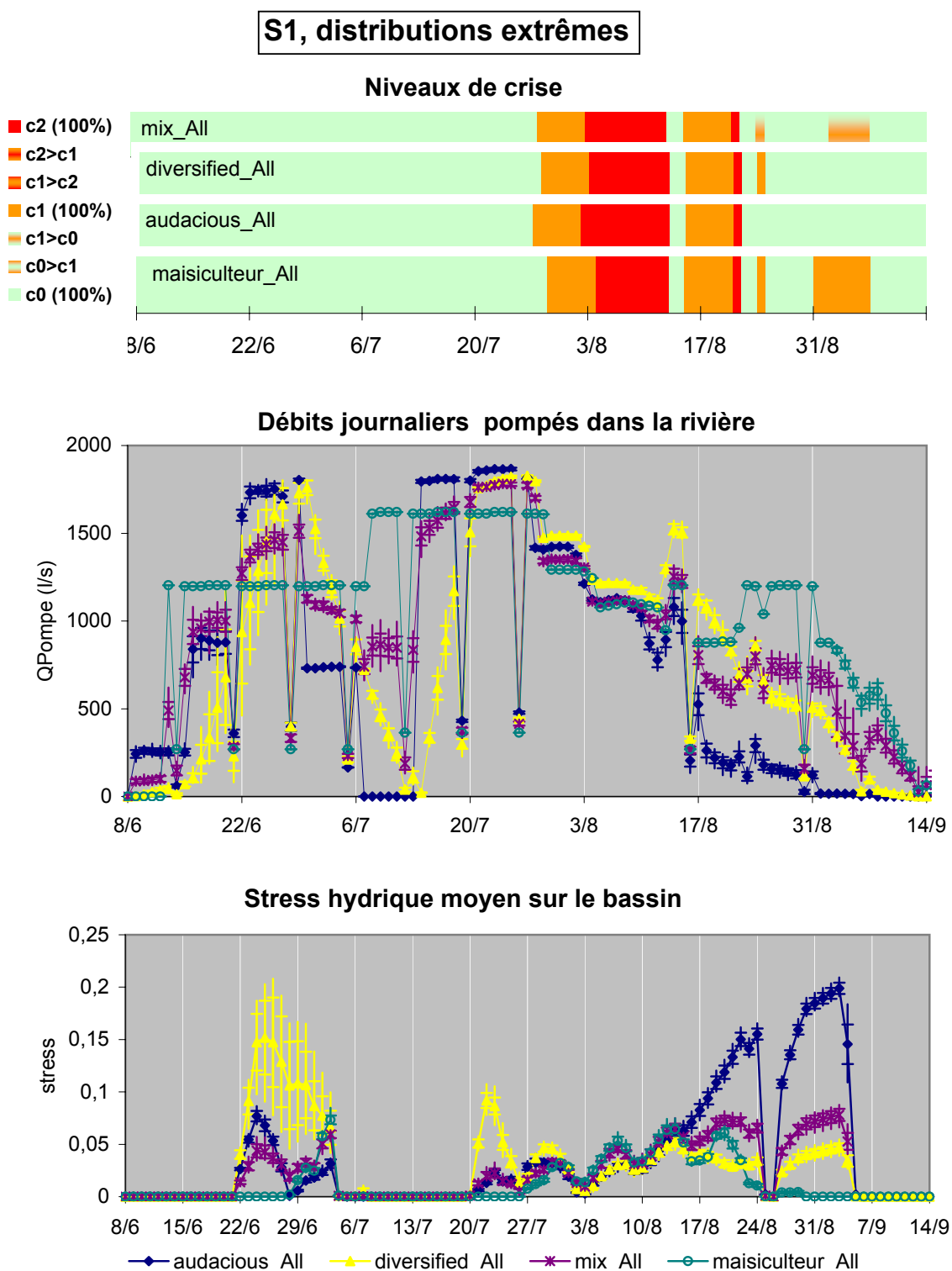


FIG. 101 – Résultats du test S1 pour les distributions extrêmes

Pic de stress au lancement Tous les *typeFarmer* ont un pic de stress à la fin du mois de juin. Ce pic, qui s'observait aussi dans GibiDrome [Barreteau *et al.*, 2003], est dû à un retard sur le lancement de l'irrigation.

pour les *diversified* ce pic est accentué par leur comportement de copie : dans la situation *diversified_{All}*, il n'y a qu'un pionnier (*audacious*) sur chaque rive, et le retard de lancement de l'irrigation observé sur la courbe des débits correspond bien à l'étalement sur 1 mois prévu par les courbes de vérification de la figure 96.

pour les *audacious*, le pic est plus important que pour les *maisculteurs*. En effet les *audacious* ne lancent l'irrigation que lorsque leurs cultures ont commencé à stresser (c'est à dire quand l'ETP augmente), alors que les *maisculteur* lancent l'irrigation à date fixe, au 15 juin. Or sur l'année climatique utilisée pour les tests de sensibilité, l'ETP ne se met à augmenter qu'après le 15 juin, et les *maisculteurs* sont donc favorisés.

Reste de la saison Pendant le reste de la saison, les *audacious* n'ont de meilleurs résultats que les *maisculteurs* que durant les 2 premières semaines du mois d'août. Ces « mauvais » résultats sont dus à la combinaison de 3 facteurs :

- **limite posée par l'information** : les *audacious* fixent leurs doses en utilisant les valeurs moyennes d'ETP et de kc de la semaine en cours. Si l'ETP ou le kc monte pendant la semaine, il sont alors en dessous de la dose nécessaire ;
- **interférences stratégie d'irrigation / assolement** : les *audacious* ont 4 parcelles de tomates alors que les *maisculteur* n'en ont pas du tout. Or le kc de la tomate est très important durant les 2 dernières semaines de juillet, et les doses apportées sont de l'ordre de 60 mm, ce qui est supérieur à la RFU des sols légers et moyens et n'empêche donc pas les cultures de tomate situées sur ce type de sol de stresser.
Par ailleurs l'irrigation des tomates s'arrête autour du 15 août. Les valeurs de stress apparaissant alors sont donc normales ;
- **limite dans la disponibilité de la ressource au niveau des réseaux** : enfin les apports sont limités par la capacité des réseaux, et cette limite est atteinte durant la première semaine d'août.

Pics bas de prélèvements Les pics bas de prélèvements observés pour tous les *typeFarmer* correspondent aux dimanches où, hors crise, les irrigants des réseaux collectifs n'irriguent pas. Les individuels qui sont soumis à un tour d'eau en cas de crise placent leur jour sans irrigation le premier jour de leur tour d'eau et irriguent donc le dimanche : la valeur de *debitPompe* du dimanche correspond au prélèvement de 6/7eme des individuels (1/7eme d'entre eux a son jour d'arrêt le dimanche).

Variabilité intra-scénario On observe peu de variabilité intra-scénario, sauf pour le scénario *diversified_{All}*, dont les résultats sont sensibles à l'emplacement du pionnier. Les autres paramètres pouvant amener de la variabilité intra-scénarios sont :

- la profondeur des sols : au niveau des débits, ce paramètre n'intervient pas pour les *maisculteur* qui irriguent à doses et dates fixe. Il intervient par contre sur le stress hydrique dans toutes les configurations.

Cependant les sols sont répartis de manière équiprobable et il faudrait donc mener un test spécifique pour mesurer l'influence de ce paramètre ;

- les dates de semis : ce paramètre n'intervient que sur les stress hydriques, et dans toutes les configurations. Là encore, les dates de semis étant tirées de manière aléatoire, il faudrait mener un test spécifique pour évaluer l'influence de ce paramètre.

On peut considérer que tous les scénarios sont stables.

Résultats sur les scénarios locaux Les résultats des simulations pour les scénarios locaux sont donnés sur les graphes de la figure 102 pour la sortie *dPompe*.

Les distributions extrêmes sont peu sensibles à de petites variations, sauf *diversified_All*. C'est en effet les *diversified* qui implémentent des comportements de copie et sont donc sensibles aux stratégies de leurs voisins. On constate que :

- quand il y a des *maisculteur*, la plupart des *diversified* les suivent pour leur assolement en maïs. En effet (1) les *maisculteur* commencent en moyenne plus tôt leur irrigation (et les copieurs suivent le premier de leur voisin à partir) (2) les *maisculteur* ont 6 parcelles de maïs et ont donc plus de chances d'être suivis pour le maïs. Puisque les *diversified* ont 4 parcelles en maïs, cet effet est dominant sur les prélèvements. Cependant, les *diversified* ont une parcelle de maïs semence et suivent donc obligatoirement un *audacious* pour cette parcelle ;
- les effets de l'assolement restent dominants : il y a peu de différence entre la situation *diversified_All*, équivalente à une situation avec 1 seul pionnier, et la situation *diversified_* + 10a, équivalente à une situation avec 9 pionniers (voir figure 96). On peut supposer que ce tassement de la propagation des comportements dans le système est dû au fait que les *audacious* n'ont qu'une parcelle de maïs.

Conclusions Ce test montre la sensibilité du modèle aux différents modes de calculs des doses d'irrigation, ainsi qu'à la répartition de l'assolement dans les exploitations. Cependant :

- le type de culture interagit avec la stratégie d'irrigation : il faudrait maintenant mener des tests sur les différents types de cultures séparément ;
- de même, il faudrait discriminer les résultats selon le type de sol
- il semble toutefois que la précision sur les doses d'irrigation n'amènera pas d'amélioration sur les résultats si elle n'est pas couplée avec un comportement d'adaptation de l'irrigation aux sols : ne pas mettre de tomate sur des sols légers, ou réduire l'espacement des irrigation sur des sols légers.

Ces premiers résultats montrent que GibiAGR correspond à la première étape dans un processus de modélisation et d'intervention. Pour aller plus loin, il serait indispensable d'effectuer un retour sur le terrain afin que les agriculteurs eux-même pointent les incohérences du modèle et les points à creuser ou améliorer plus particulièrement.

L'approche AGR fait que la structure du modèle est très explicite. Cela facilite la construction de scénarios de tests mais aussi la localisation des modifications et ajouts à effectuer à la demande. Pour introduire l'adaptation de l'assolement aux types de sols, il suffirait par exemple de modifier les rôles *ManagerSow*, alors que pour réduire l'espacement d'irrigations, il suffirait de modifier les rôles *CalendarManager*.

S1, scénarios locaux pour les débits journaliers pompés dans la rivière

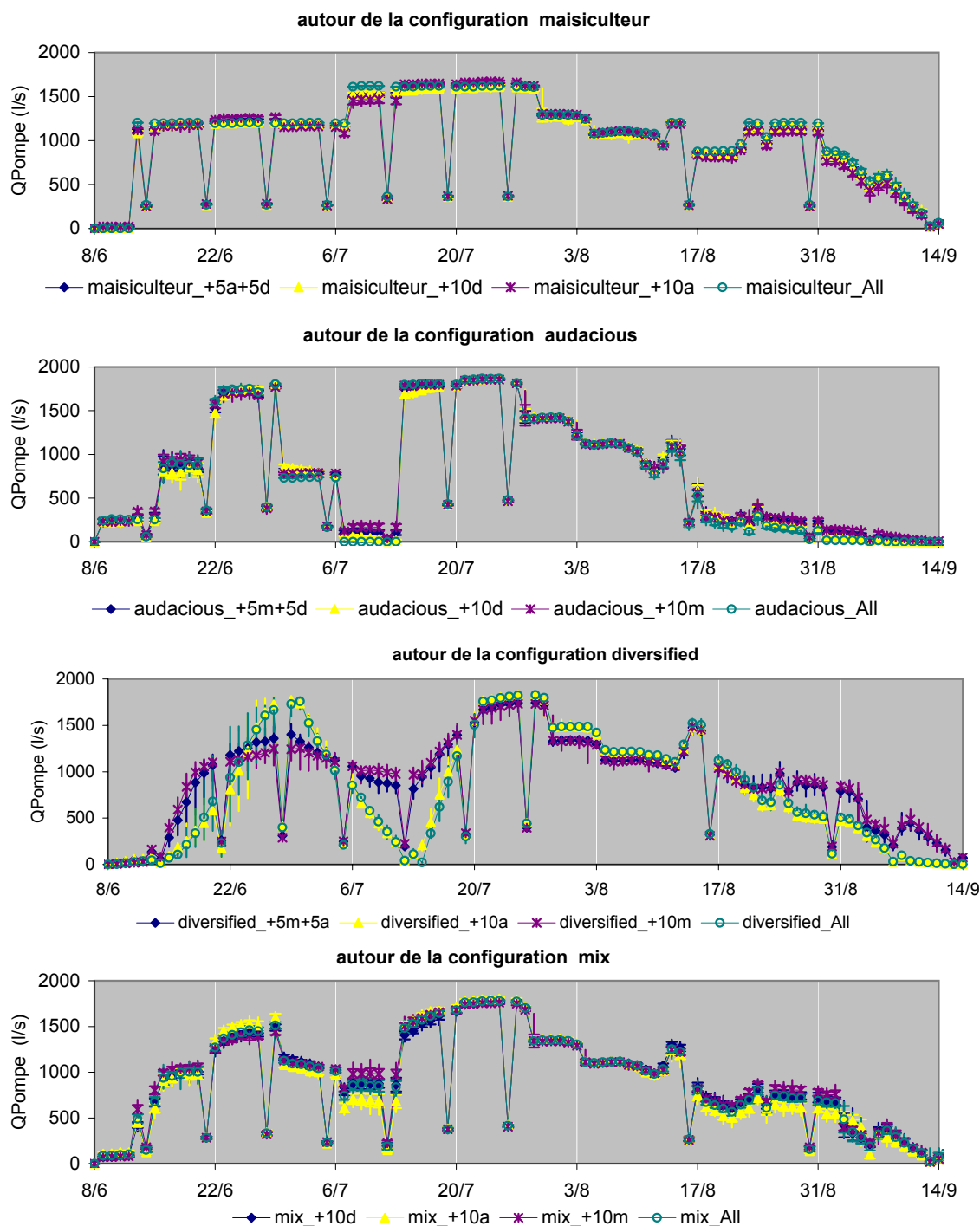


FIG. 102 – Résultats du test S1 sur les débits pompés dans la rivière pour les scénarios locaux

3.2.2 Test S2 : sensibilité au mode de calcul du calendrier et à la contrainte sur la ressource

Test S2						
Protocole		Scénarios : • Parcours de toutes les valeurs d'un paramètre + scénario de référence. • 17 scénarios.				
Paramètres						
Entrées : paramètres du test						
Nom	Description	Valeurs fixées				
modCal	Mode de mise en oeuvre des calendriers d'irrigation	modCal ∈ {#flow, #time}				
p(capa)	Probabilité de réalisation de capa= {#capaFlow, #short, #middle, #wide}		p(#short)	p(#middle)	p(#wide)	p(#capaFlow)
		Si modCal = #flow alors				
		flowMod	0	0	0	1
		Si modCal = #time alors				
		short_All	1	0	0	0
		middle_All	0	1	0	0
		wide_All	0	0	1	0
		mix	0.34	0.33	0.33	0
		short_+10m	0.9	0.1	0	0
		short_+10w	0.9	0	0.1	0
		short_+5m5w	0.9	0.05	0.05	0
		middle_+10s	0.1	0.9	0	0
		middle_+10w	0	0.9	0.1	0
		middle_+5s+5w	0.05	0.9	0.05	0
		wide_+10s	0.1	0	0.9	0
		wide_+10m	0	0.1	0.9	0
		wide_+5s5m	0.05	0.05	0.9	0
		mix_+10s	0.44	0.28	0.28	0
		mix_+10m	0.29	0.43	0.28	0
		mix_+10w	0.29	0.28	0.43	0
Sorties : variables observées						
Nom	Description					
stress	Stress hydrique moyen sur l'ensemble des parcelles du système. Compris entre 0 (sans stress) et 1 (stress maximal). Correspond au rapport etr/etm.					
crise	valeur du niveau de crise. crise ∈ {c0(100%), c0>c1,c1>c0,c1(100%),c1>c2,c2>c1,c2(100%)}. c0 (100%) signifie que toutes les simulations du scénario sont au niveau c0. c0>c1 signifie qu'une majorité de simulations du scénario sont au niveau c0.					
QPompe	débit pompé dans la rivière journalier (valeur moyenne sur la journée) en l/s.					
QiPompeMax	débit instantané pompé dans la rivière maximal de la journée en l/s.					
QOut	débit journalier au seuil des PUES (valeur moyenne sur la journée) en l/s.					
QiOutMax	débit instantané maximum de la journée au seuil des PUES en l/s.					
QiOutMin	débit instantané minimum de la journée au seuil des PUES en l/s.					
QiOut12	débit instantané à midi au seuil des PUES en l/s.					

Résultats sur les configurations extrêmes Les résultats sur les configurations extrêmes pour les sorties concernant les niveaux de crise et les débits au seuil des PUES sont donnés d'abord sur les figure 103.

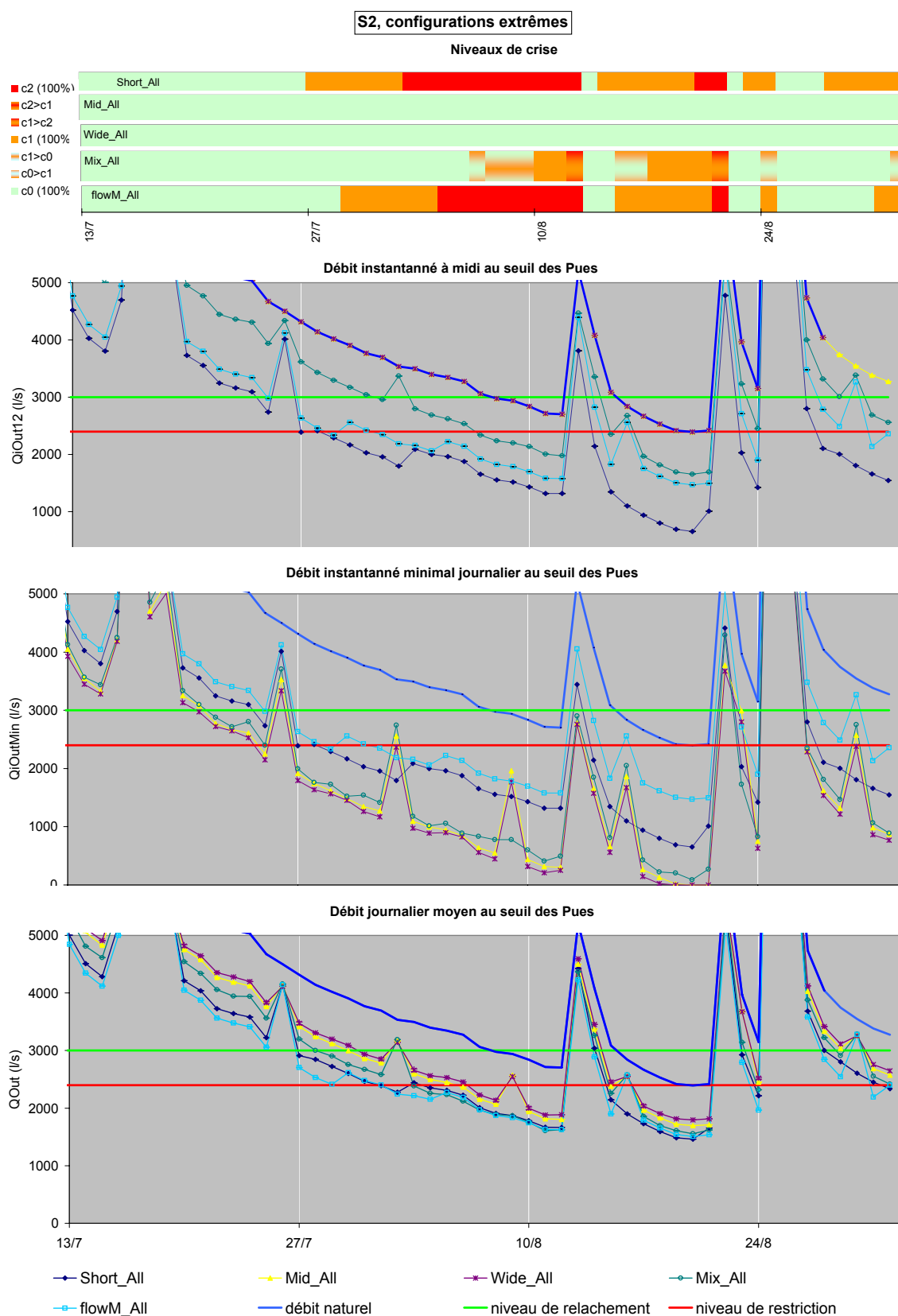


FIG. 103 – Résultats du test S2 pour les niveaux de crise et les débits instantanés sur les distributions extrêmes

Effet de la répartition des irrigations sur les niveaux de crise Les graphes de la figure 103 permettent principalement d’observer l’effet de la répartition des irrigations sur le déclenchement des crises. La mesure qui sert de référence au déclenchement des crises est celle du débit instantané au seuil des PUES à midi. Dans les configurations *Wide_All* et *Middle_All*, tous les irrigants ont fini leurs irrigations à midi, si bien que le débit instantané est égal au débit naturel de la rivière et qu’il n’y a jamais de passage en crise. Pourtant dans ces configurations, la rivière est asséchée au moment de la journée où les prélèvements sont à leur maximum (graphe des débits instantanés minimal).

Dans la configuration *Short_All* par contre, les irrigants n’ont jamais fini leurs prélèvements à midi, tout en ayant une demande instantanée supérieure à ceux de la situation *Flow_All*. Ceux sont donc ceux qui subissent le plus de jours de crise. Les irrigants de la situation *Mix_All* sont dans une configuration intermédiaire.

La figure 104 fournit le profil des débits instantanés observés lors d’une journée type pour chacune des configurations. Les données sont celles d’une simulation de chacun des scénarios le 17 juin et le 10 juillet (journées sans crise).

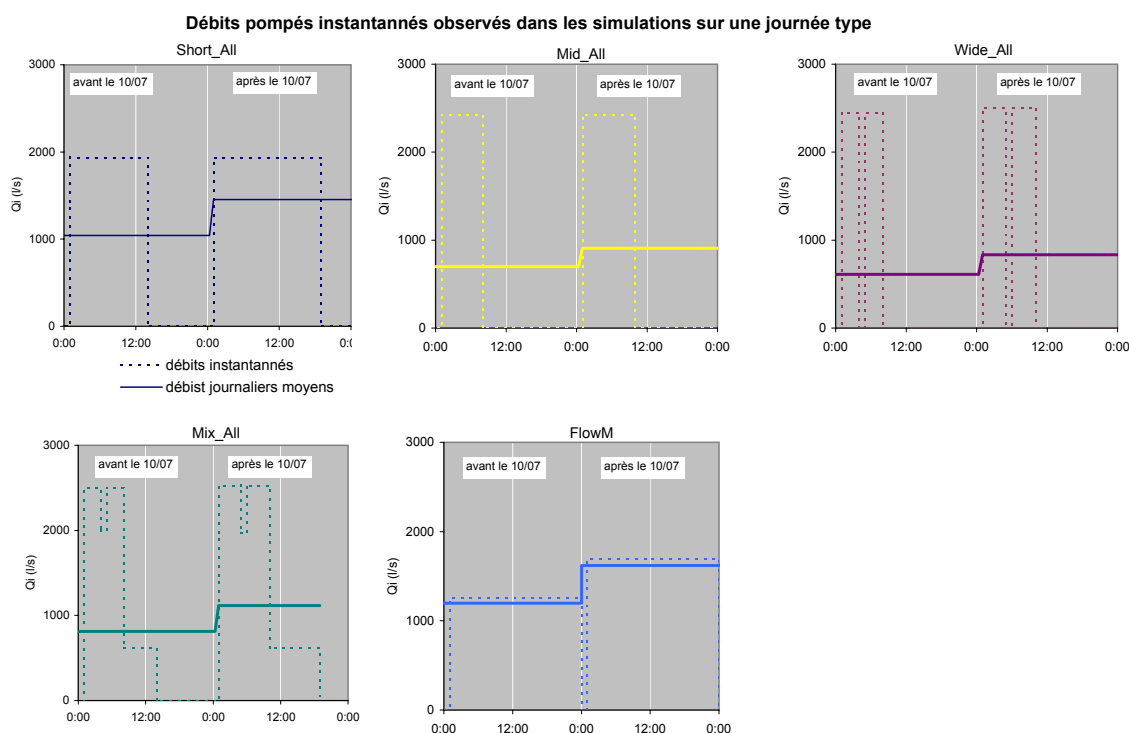


FIG. 104 – Débits pompés sur une journée type (journées du 17/06 et du 10/07)

On peut observer que, bien que les doses demandées chaque jour soient les mêmes dans chacune des configurations, les débits journaliers (proportionnels à la dose reçue) sont différents.

Effet de la répartition des irrigations sur les prélèvements Les graphes de la figure 105 permettent de mieux comprendre la réalité des prélèvements :

- l’**augmentation des volumes prélevés** au 10 juillet n’est visible sur les débits instantanés que pour la configuration *flow_All*, où les prélèvements sont modulés par le débit d’irrigation. Dans les autres configurations, les prélèvements sont modulés par la durée

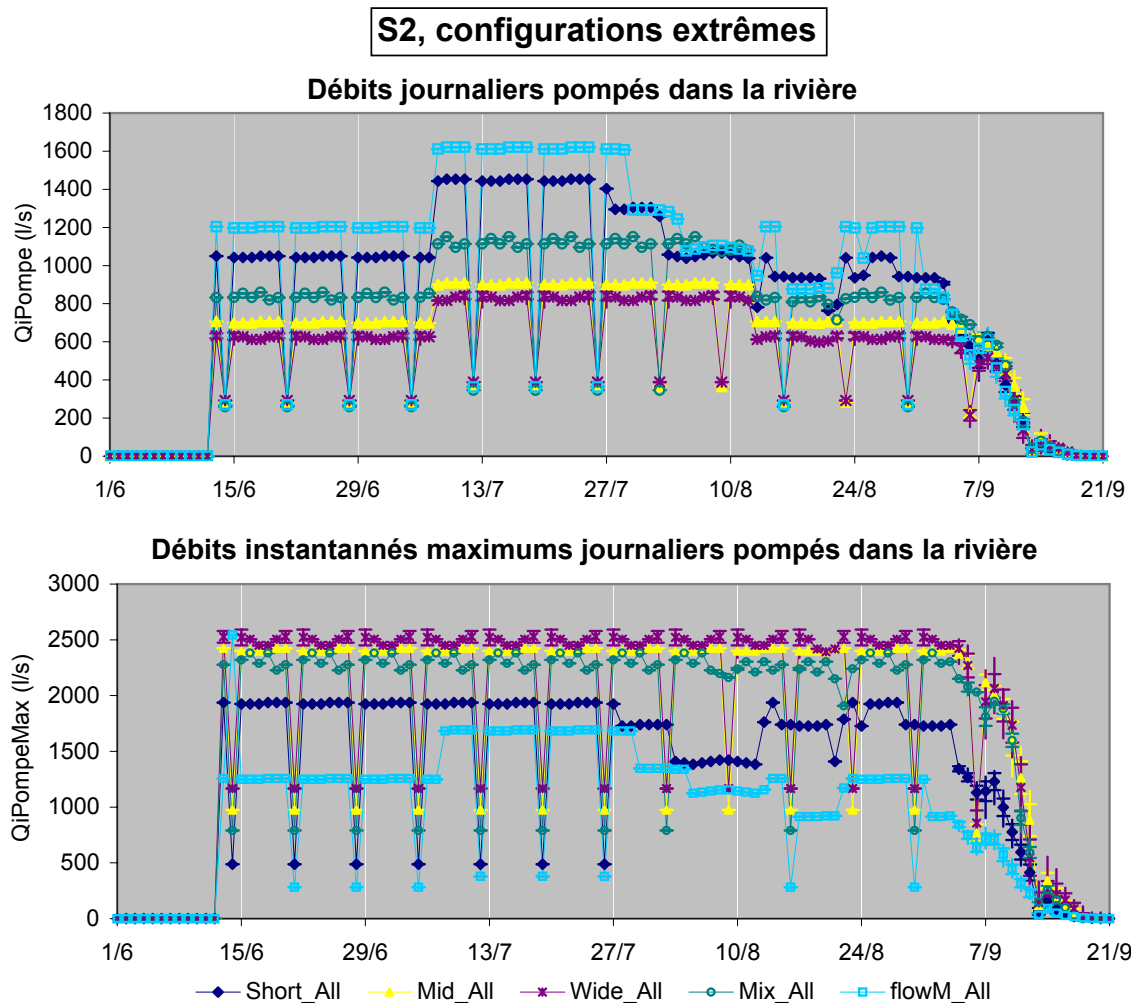


FIG. 105 – Résultats du test S2 pour les débits journaliers sur les distributions extrêmes

d'irrigation, à débit instantané constant, et leur augmentation n'est donc visible que sur les débits moyens ;

- des baisses de prélèvements apparaissant pour les configurations *Short_All* et *flow_Mod*, et dans une moindre mesure pour *Mix_All* les jours de crise (les autres configurations ne connaissent pas de crise).

En effet, alors que pour les irrigants collectifs, les restrictions se traduisent par une réduction de la capacité d'entrée des réseaux et sont donc indépendantes du niveau des volumes prélevés, pour les irrigants individuels, elles se traduisent par un tour d'eau et conduisent donc à une réduction proportionnelle au niveau des volumes prélevés.

- on observe une **saturation des débits instantannés maximum** autour de 2500 l/s alors qu'ils devraient augmenter avec les capacités des *Wide_All* et des *Mid_All*. Cette saturation correspond aux limites de capacité des réseaux, qui ne sont pas dimensionnés pour que toutes les prises y fonctionnent en même temps. Les graphes de la figure 106 représentent l'effet de ces limites de manière isolée. La demande de pointe (demande instantanée maximum) totale des irrigants collectifs y est représentée pour chacun des jours d'une semaine de fin juillet.

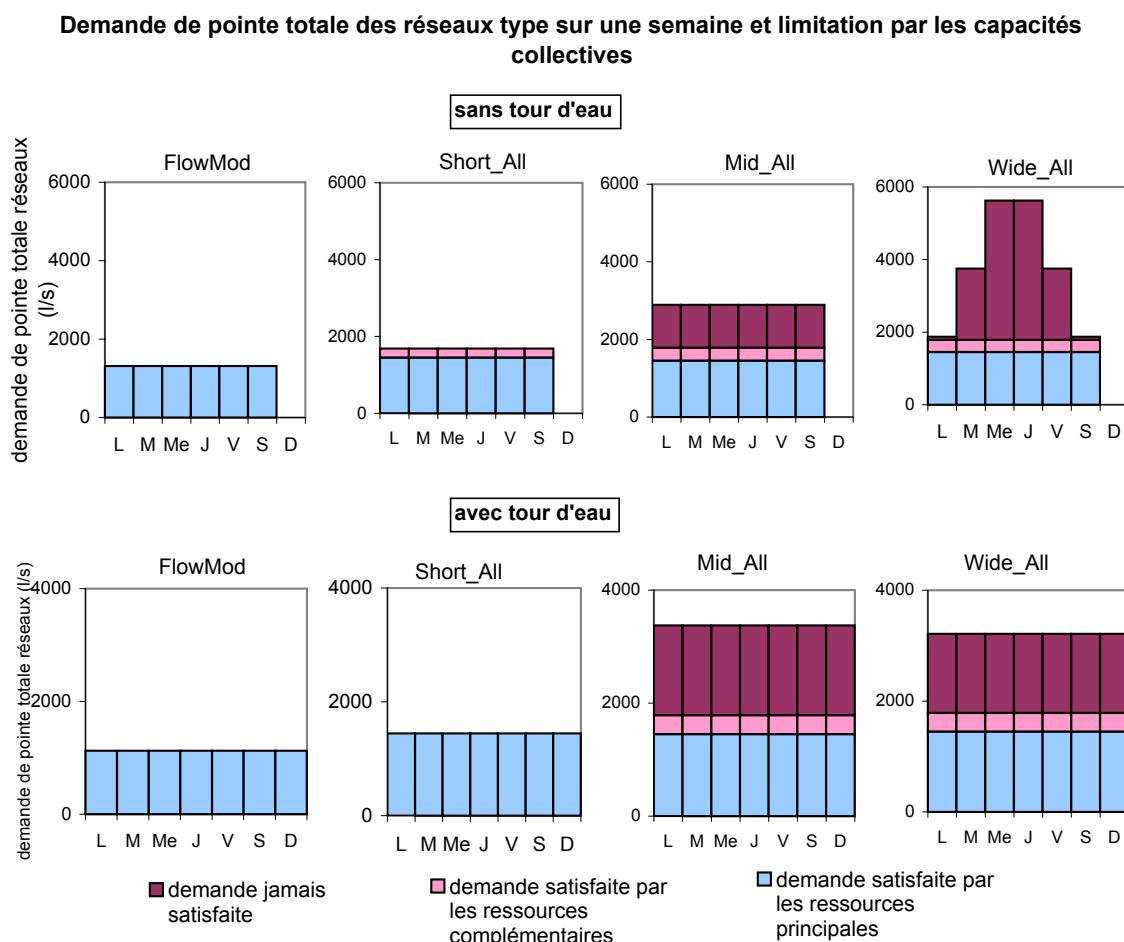


FIG. 106 – Profils des demandes collectives sur une semaine

Hormis dans la configuration *Wide_All*, si les réseaux n'imposent pas de tour d'eau, cette demande est toujours la même, sauf le dimanche où elle est nulle (demande de 40 mm pour chaque irrigant chaque jour). La forme particulière de la courbe de demande de la configuration *Wide_All* est due au fait que dans cette configuration, les irrigants n'irriguent que 3 jours dans la semaine. Ces 3 jours doivent être consécutifs et ne pas inclure le dimanche, et leur choix se fait de manière aléatoire (comportement des rôles de type *TimeManagerWide*). Les graphes de la figure 107 illustrent alors la forme de la courbe.

Si les réseaux imposent un tour d'eau, alors les irrigants adaptent leur cycle d'irrigation à leurs jours d'arrêt dans le tour si bien que les demandes sont étalées sur toute la semaine. Ainsi en cas de tour d'eau, seuls 6/7ème des irrigants effectuent une demande chaque jour (3/7ème dans le cas *Wide_All*, voir figure 107).

La demande de pointe pour les configurations où $modCal = \#time$ ne dépend que de la capacité des prises et reste le même quelque soit le jour de la campagne d'irrigation.

Dans les configurations *Mid_All* et *Wide_All*, la demande est toujours largement au-dessus de la capacité totale des réseaux. Dans la configuration *Short_All*, la demande est légèrement au-dessus de la capacité totale hors-crise (quand les ressources complémentaires ne sont pas activées), mais parvient à être satisfaite quand les ressources complémentaires sont activées. Dans la configuration *flowM_All*, la demande est toujours satisfaite.

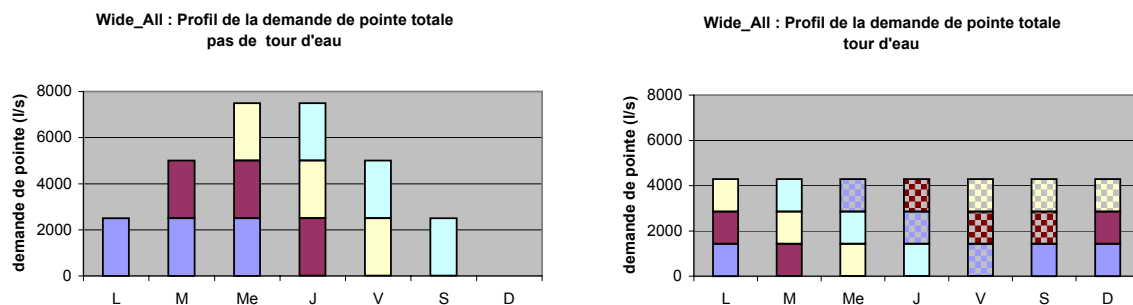


FIG. 107 – Profils de la demande totale des irrigants de type TimeManagerWide. Chaque couleur représente les demandes dues à l'un des cycles d'irrigations possibles pour les irrigants de la situation *Wide_All*

Ceci explique les saturations apparaissant sur les graphes des débits instantanés de la figure 105, où se sont ajoutées les demandes des irrigants individuels, qui ne sont limitées que par l'assèchement de la rivière. Les débits instantanés pour les configurations *Wide_All* et *Mid_All* sont malgré tout sensiblement égaux parce que les individuels fonctionnent en tour d'eau : chaque jour, seuls 3/7ème d'entre eux irriguent pour *Wide_All* (voir graphe 107) contre 6/7ème pour *Mid_All*.

Au total, ce sont les configurations *Wide_All* et *Mid_All*, fortement limitées par les capacités des réseaux, où le volume prélevé chaque jour est le plus faible (figure 105).

Enfin, il faut bien noter que les capacités des irrigants dans la configuration *Wide_All* sont largement irréalistes et provoquent donc une situation extrême.

Effet de la répartition des irrigations sur les stress hydrique Les effets des limites des capacités collectives se retrouvent sur les courbes de stress (figure 108) : les stress sont très importants dans les configurations *Wide_All* et *Middle_All* où environ la moitié des demandes ne peut être satisfaite.

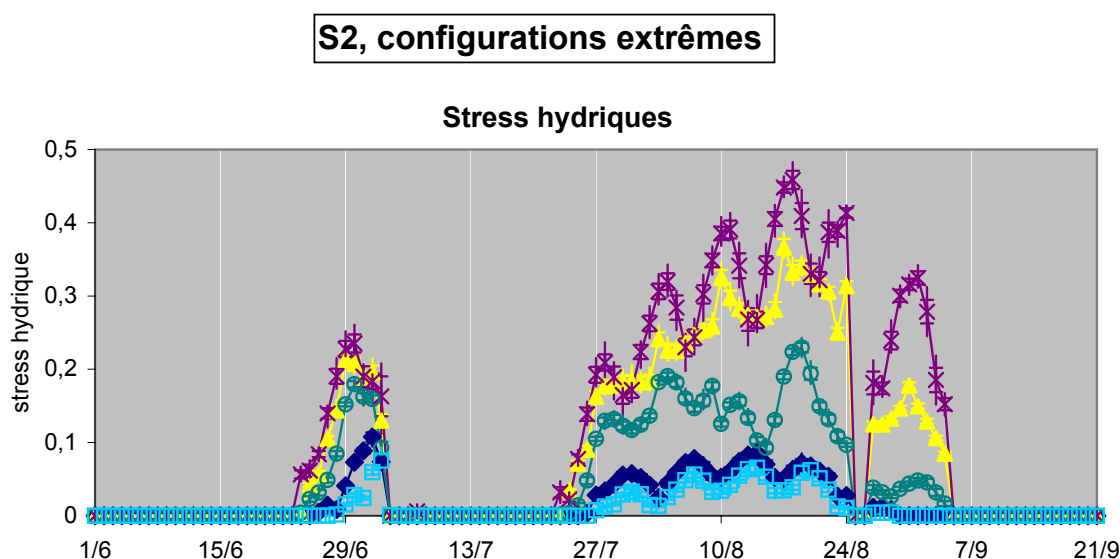


FIG. 108 – Résultats du test S2 pour les stress hydriques sur les distributions extrêmes

Les configurations qui stressent le plus sont celles pour qui la demande instantanée est la plus élevée, c'est à dire celles qui ont les plus grosses capacités !

Les différences de phase entre les oscillations des différentes courbes sont sans doute dues en partie à l'occurrence ou à l'absence de périodes de crise, qui rajoutent une irrigation le dimanche et modifient la forme de la courbe de stress.

Variabilité intra-scénarios La variabilité intra-scénarios est insignifiante pour les configurations homogènes. En effet, l'irrigation se fait à date et dose fixes, si bien qu'il n'y a pas d'aléa sur les prélèvements. Seule la configuration *Wide_All*, où les irrigants tirent l'emplacement de leur cycle d'irrigation dans la semaine montre un léger aléa. Les aléas - faibles - apparaissant sur les stress sont dus aux types de sols et aux dates de semis.

La variabilité supplémentaire apparaissant pour la configuration équiprobable est due au tirage des modes de répartition.

Résultats sur les scénarios locaux On observe le stress hydrique, qui est la sortie où l'effet de la répartition des apports dans la journée apparaît le mieux (figure 109).

Les effets des variations sont peu importants autour des distributions homogènes mais apparaissent autour de la distribution équiprobable, où les valeurs de stress divergent autour du 10 août entre 2 groupes : *Mix_All* et *Mix_+Short10* d'une part, et *Mix_+Mid10* et *Mix_+Wide10* d'autre part. Il apparaît en effet un seuil dans la distribution à partir duquel les débits à midi sont suffisant bas pour que les périodes de crise soient diminuées (voir graphe de la figure 110). Or tant que le système est en crise 1, l'irrigation supplémentaire du dimanche compense la réduction de prélèvements sur les résultats de stress globaux, si bien que les scénarios en crise 1 souffrent moins de stress que ceux en crise 0.

Conclusions Le test est « injuste » vis à vis des configurations où la modulation de l'irrigation se fait en durée et on ne peut conclure sur le réel effet des règles de répartition de l'irrigation :

- les effets dus aux capacités sont trop dominants : il faudrait pouvoir tester différents niveaux de capacités d'une part, et différentes règles de répartition des irrigations d'autre part ;
- l'effet des crises n'est pas clair parce que l'année climatique utilisée est trop sèche.

Pour obtenir des résultats plus intéressants, les comportements de répartition des irrigations sont à retravailler, et donc de nouveaux rôles éventuellement à introduire, de manière à ce que tous les irrigants ne débutent pas leurs irrigations en même temps : introduction de paramètres d'aversion au risque, apprentissage...

Ce test soulève la question de la confrontation entre volumes et débits instantanés :

- d'une part l'hypothèse de propagation instantanée des demandes et des débits dans le système, qui est valable pour un pas de temps à la journée, est à revoir et des résultats plus réalistes pourraient être obtenus en lissant les courbes de demandes au niveau des entrées des réseaux ;
- d'autre part, le comportement de la CLE pourrait être modifié de manière à ce que ce ne soit plus le débit instantané à une certaine heure de la journée qui soit regardé mais un débit moyen horaire ou journalier, une ou plusieurs fois par jour³⁹.

³⁹Dans la réalité, il est prévu que les débits soient relevés toutes les heures, et il est envisagé de mettre au point un système d'observation dynamique, qui lève une alerte dès que le débit de la rivière passe sous un certain seuil

S2, scénarios locaux pour les stress hydriques

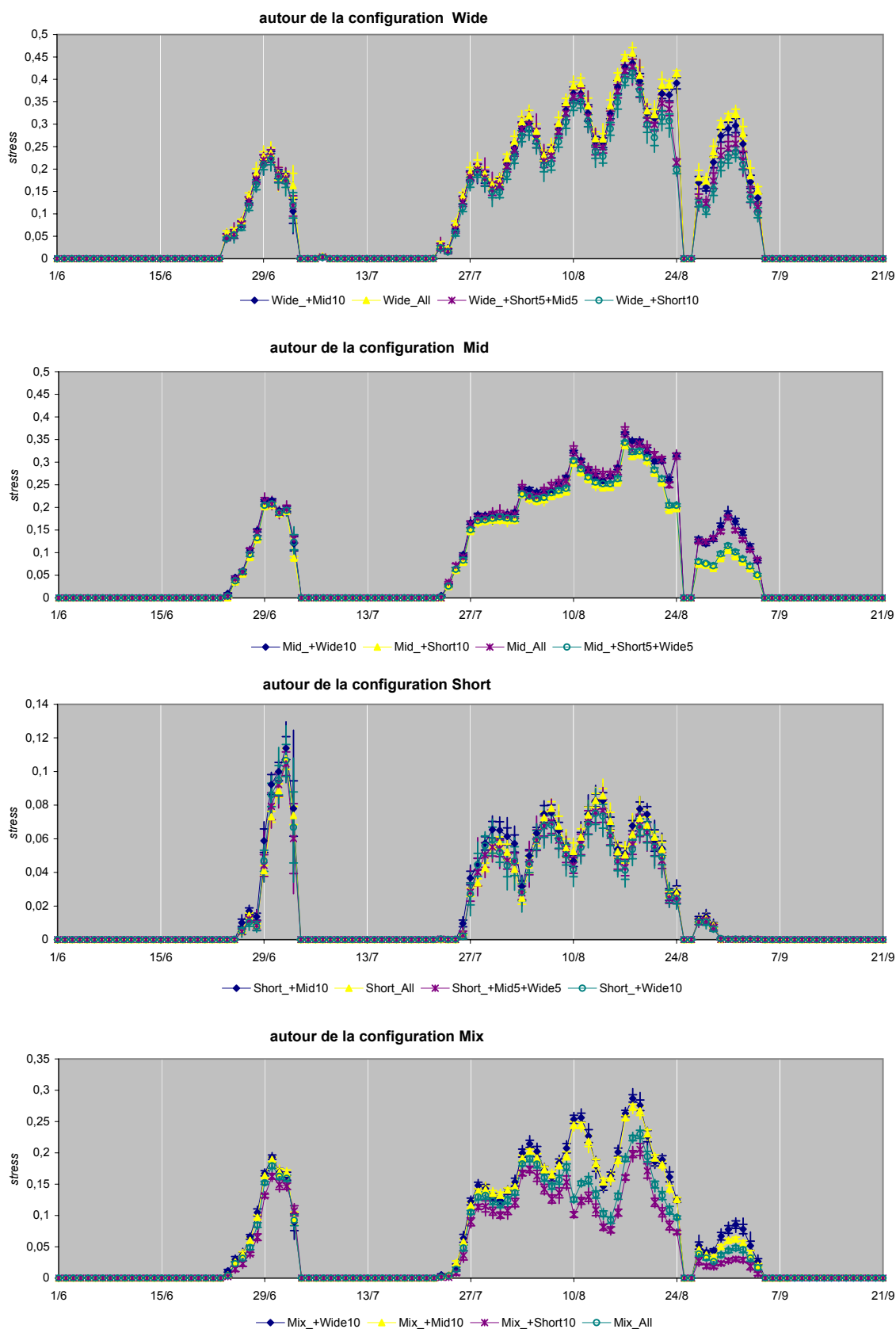


FIG. 109 – Résultats du test S2 pour les stress hydriques sur les scénarios locaux

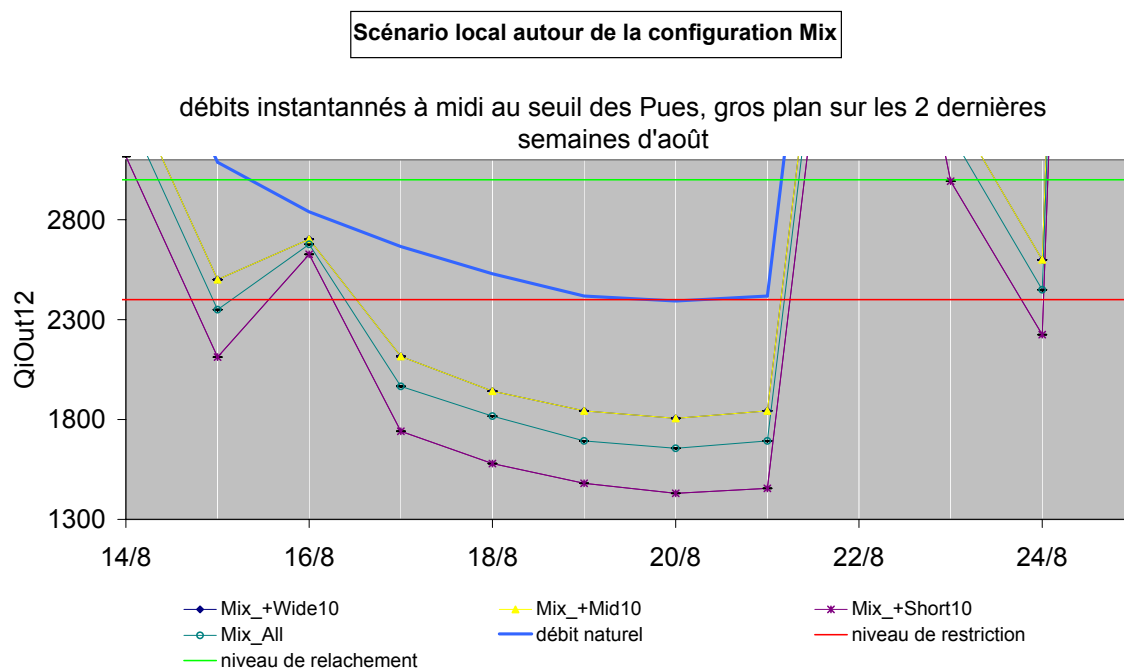


FIG. 110 – Résultats du test S2 pour les débits instantannés sur les scénarios locaux autour de la configuration *Mix*

Globalement, la possibilité de jouer sur la répartition des irrigations à un pas de temps infra-quotidien est riche de possibilité mais demande un travail supplémentaire sur les hypothèses de modélisation pour savoir comment gérer cette nouvelle marge de manœuvre.

3.2.3 Test S3 : sensibilité à la gestion de crise

Test S3

Protocole

Scénarios :

Plan factoriel complet sur 3 paramètres à 2 modalités.

8 scénarios.

Paramètres

Entrées : paramètres du test

Nom	Description	Valeurs fixées				
<i>modCal</i>	Mode de mise en oeuvre des calendriers d'irrigation	<i>modCal</i> ∈ {#flow, #time}				
<i>p(capa)</i>	Probabilité de réalisation de <i>capa</i> ∈ {#capaFlow, #short, #middle, #wide}		p(#short)	p(#middle)	p(#wide)	p(#capaFlow)
	Si <i>modCal</i> = #flow alors	0	0	0	1	
	Si <i>modCal</i> = #time alors	0.34	0.33	0.33	0	
<i>rCol</i>	Règle collective dans les réseaux	<i>rCol</i> ∈ {#tourEau #noRule} (#noRule pour réseaux sans règle collective)				
<i>p(MC)</i>	Probabilité de réalisation de <i>capa</i> ∈ {MCG_F, MCE_F}		p(MCG_F)	p(MCE_F)		
	MCG (distribution homogène 1)	1	0			
	MCE (distribution homogène 2)	0	1			

Sorties : variables observées

Nom	Description
<i>stress</i>	Stress hydrique moyen sur l'ensemble des parcelles du système. Compris entre 0 (sans stress) et 1 (stress maximal). Correspond au rapport etr/etm.
<i>crise</i>	valeur du niveau de crise. <i>crise</i> ∈ {c0(100%), c0>c1, c1>c0, c1(100%), c1>c2, c2>c1, c2(100%)}. c0 (100%) signifie que toutes les simulations du scénario sont au niveau c0. c0>c1 signifie qu'une majorité de simulations du scénario sont au niveau c0.
<i>QPompe</i>	débit pompé dans la rivière journalier (valeur moyenne sur la journée) en l/s.
<i>QOut</i>	débit journalier au seuil des Pues (valeur moyenne sur la journée) en l/s.
<i>QiOut12</i>	débit instantané à midi au seuil des Pues en l/s.

Effets des paramètres sur les niveaux de crise Les résultats des simulations des 8 scénarios du test S3 pour les niveaux de crise et les débits instantanés à midi au seuil des Pues sont donnés sur la figure 111.

modCal est le seul paramètre discriminant pour les niveaux de crise. On voit sur les graphes du débit instantané aval à midi que les autres paramètres du test S3 modulent les niveaux de prélèvements mais pas suffisamment pour modifier le franchissement des seuils de restriction et de relâchement qui provoquent le déclenchement et l'arrêt des crises.

Pour aller plus loin dans la compréhension de l'influence relative des 3 paramètres utilisés dans ce test, on a tracé les effets principaux de chacun de ces paramètres ainsi que leurs interactions 2 à 2 [Campolongo *et al.*, 2000] par rapport au stress hydrique (figure 112) ainsi qu'aux débits pompés journaliers (figure 113).

Effets comparés des 3 paramètres sur le stress et les débits pompés journaliers

Effets principaux Les courbes représentant les effets principaux d'un paramètre sont construites à partir de la valeur moyenne des sorties de l'ensemble des simulations des scénarios

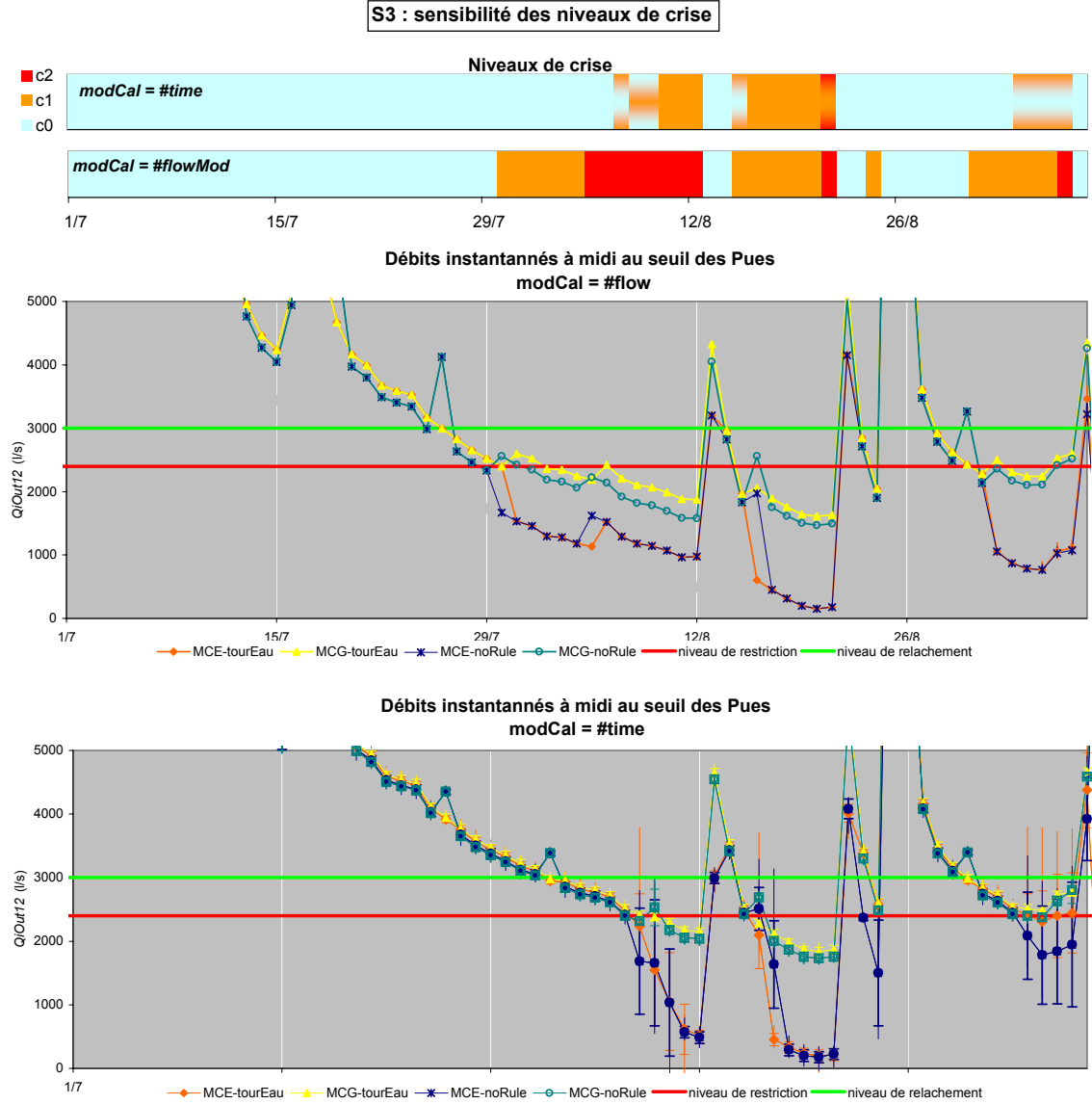


FIG. 111 – Résultats du test S3 pour les niveaux de crise et les débits instantanés

où le paramètre a la même valeur : pour le paramètre MC par exemple, la courbe MCG représente la moyenne des sorties des simulations pour lesquelles $MC=MCG$.

Les paramètres $modCal$ et MC modifient directement le niveau des volumes prélevés : $modCal$ en plaçant les débits instantanés demandés largement en dessus et largement en dessous de la limite posée par la capacité du système, et MC en augmentant les volumes demandés jusqu'à leur niveau maximal durant les crises. Ces deux paramètres ont donc des effets importants sur les 2 sorties, et conduisent à une réduction du stress lorsque les volumes prélevés augmentent.

$rCol$ n'agit que sur la répartition des prélèvements pendant la semaine : quand $rCol = \#noRule$, tous les prélèvements sont concentrés sur 6 jours alors que quand $rCol = \#tourEau$, les prélèvements sont répartis sur toute la semaine. Ainsi même si le volume global prélevé est plus bas dans le cas $\#tourEau$, les parcelles irriguées chaque jour sont moins nombreuses, et le volume apporté au niveau individuel reste donc au pire identique, puisque tous les irrigants

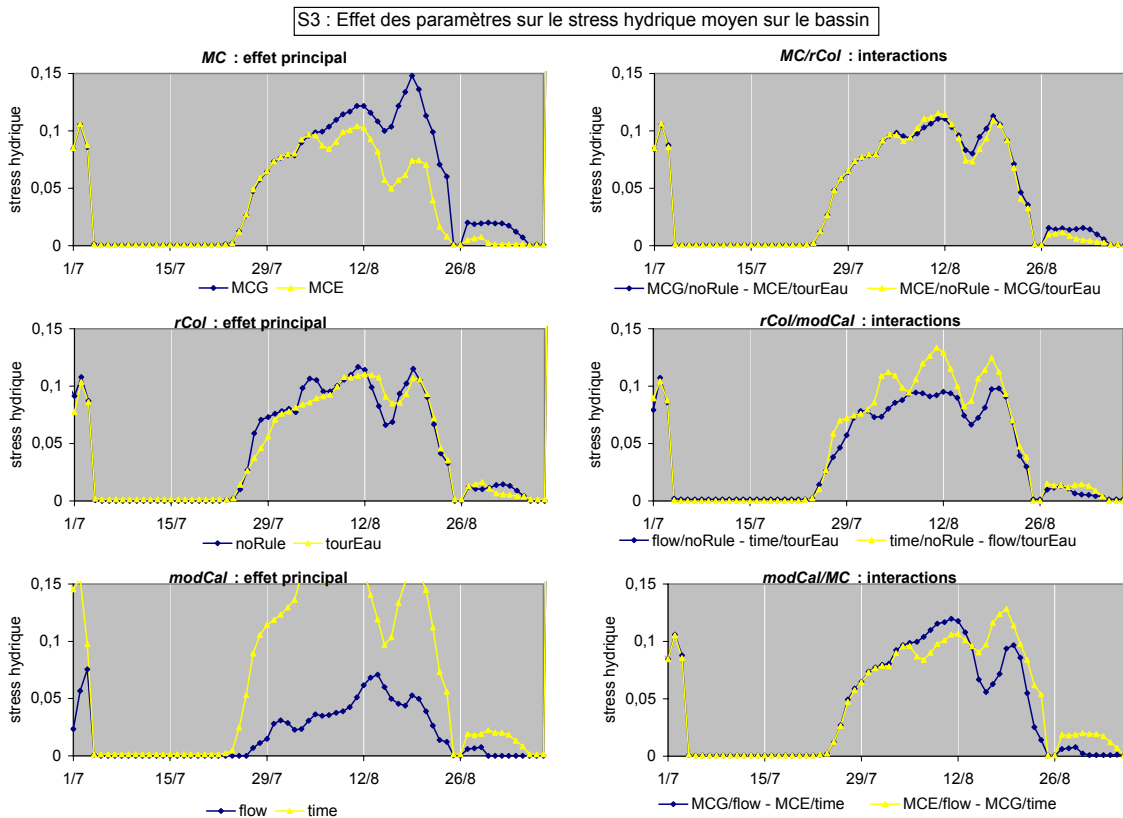


FIG. 112 – Effets des paramètres du test S3 sur le stress hydrique

ont naturellement un jour sans irrigation dans leur cycle d'irrigation hebdomadaire. Les courbes de stress suivent donc des niveaux similaires, sauf que la courbe de stress du cas #tourEau est lissée, puisque les oscillations hebdomadaires de stress de chaque exploitation, dues au jour sans irrigation, sont déphasées sur toute la semaine.

Interactions entre *rCol* et *modCal* Les courbes représentant les interactions entre 2 paramètres sont construites sur les moyennes des sorties des simulations des scénarios croisant les valeurs de ces paramètres : pour l'interaction *MC/rCol* par exemple, la courbe (*MCG/noRule*, *MCE/tourEau*) représente la moyenne des sorties des simulations pour lesquelles *MC*=*MCG* et *rCol* = *noRule*, et des simulations pour lesquelles *MC* = *MCE* et *rCol* = *tourEau*.

Des effets sont visibles sur les interactions entre le type de règle collective et le mode de gestion des calendriers d'irrigation. En effet :

- dans le cas *modCal* = #flow le tour d'eau a seulement pour effet de réduire le volume global prélevé chaque jour ;
- dans le cas *modCal* = #time, où les demandes instantanées se situent au delà de la capacité du système, le tour d'eau, en réduisant le nombre de parcelles irriguées chaque jour, a pour effet de réduire la distance entre la capacité du système et les demandes instantanées : le volume global prélevé reste le même, mais les volumes reçus individuellement sont plus important et donc le stress plus bas.

C'est cet effet d'interaction qui apparaît sur le graphe de la figure 112, où on voit que les résultats moyens sur le stress incluant les scénarios où *modCal* = #time et *rCol* = #tourEau sont plus

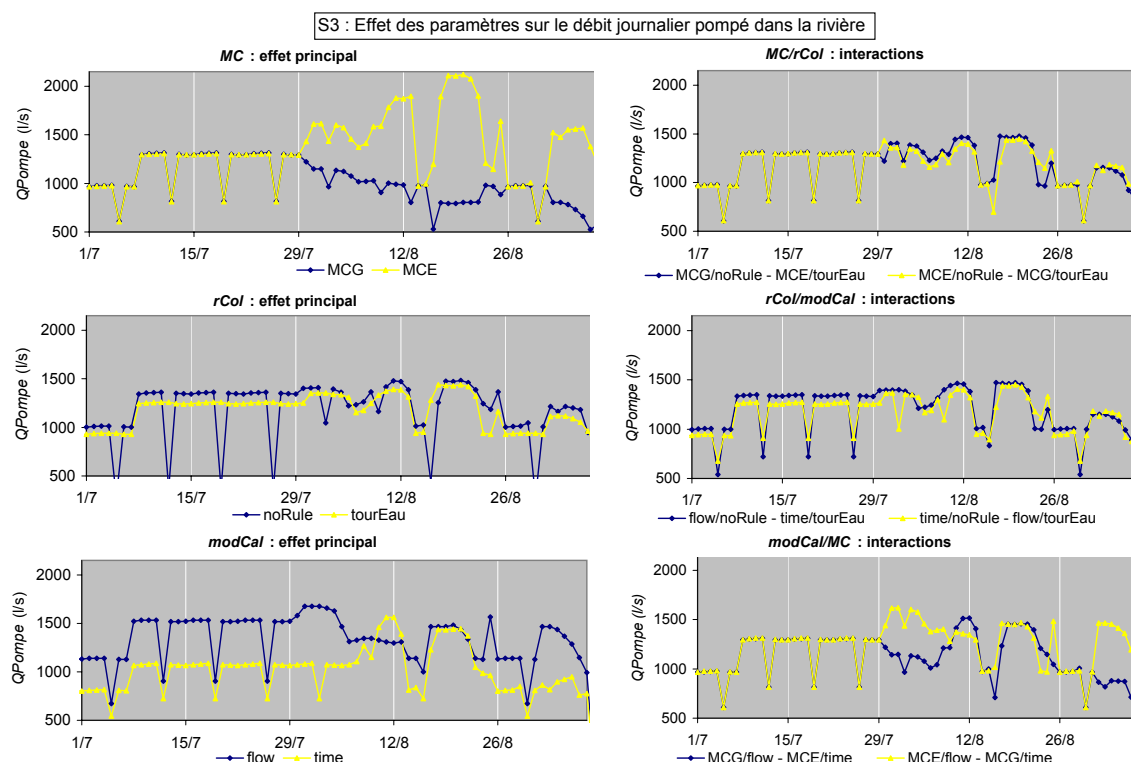


FIG. 113 – Effets des paramètres du test S3 sur le débit journalier pompé

bas.

Interactions entre MC et $modCal$ Les interactions apparaissant entre le paramètre MC et le paramètre $modCal$ sont dus à l'effet du décalage des jours de crise entre les 2 valeurs de $modCal$ alors que MC , qui modifie le comportement individuel de gestion de crise n'est sensible que durant les périodes de crises : durant la période où seuls les scénarios $modCal = \#flow$ sont en crise, la réduction du niveau de stress due à $MC = MCE$ n'apparaît que pour ces scénarios ; quand les deux types de scénarios $modCal$ sont en crise, la réduction du niveau de stress est valable pour les 2 types de scénarios, mais elle est plus sensible pour les $modCal = \#time$ qui subissaient un niveau de stress plus important à cause du dépassement de la limite capacitaire du système.

Conclusions Ce test permet d'éclairer les effets des interactions entre les règles de gestion utilisées dans les différents niveaux du système :

- la règle utilisée au niveau du bassin, qui décide des jours de crise, est très discriminante quant à l'effet des règles des niveaux plus élémentaires en introduisant des seuils : les effets de toutes les autres règles sont alors invisibles au niveau des jours de crise si ils ne modifient pas le franchissement des seuils ;
- la règle de gestion collective de la ressource au niveau des réseaux voit ses effets largement dominés par les règles de gestion individuelles : les comportements individuels modélisés sont des comportements extrêmes, et les règles collectives qui sont celles utilisées dans la réalité ne parviennent pas à balancer les effets de ces comportements.

Il aurait été intéressant de tester l'effet d'une règle de tours d'eau proportionnels aux capacités individuelles comme il en existe sur le terrain (voir chapitre 3). Mais l'instauration d'une telle règle, qui imposerait 2 jours d'arrêts hebdomadaires durant toute la campagne aux irrigants dont la ressource est au niveau *middle*, aurait demandé à se lancer dans une réflexion plus fine sur la gestion des calendriers d'irrigation, puisque ces irrigants seraient alors obligés de reporter une de leurs 6 irrigations dans un autre jour de la semaine.

CONCLUSION DU CHAPITRE

Enseignements méthodologiques par rapport à AGR L'utilisation du formalisme AGR permet de bien discerner les différents niveaux sur lesquels peuvent porter les tests, alors que l'utilisation de rôles permet de construire facilement et de manière lisible différents scénarios en regroupant les paramètres dans des éléments de comportement.

Durant les tests de vérification, il est possible de mettre à profit le formalisme AGR pour construire des systèmes simplifiés en construisant des rôles qui encapsulent des comportements simplifiés.

Enseignements méthodologiques sur l'expérimentation des modèles en général Des campagnes de tests de vérification et de sensibilité sont à mener aussi souvent que possible et de manière extensive tout au long du processus de développement d'un modèle afin d'une part de maintenir son niveau de compréhension des comportements du modèle, et d'autre part de fournir des éléments pour guider le dialogue avec les thématiciens et le développement des hypothèses de modélisation.

Il est pour cela important que ces tests soient faciles à mener. Si l'utilisation des rôles tend à rendre le paramétrage des modèles plus lisible et donc à améliorer le processus de construction de scénarios, les temps de calcul (il faut entre 5 et 10 minutes pour réaliser la simulation d'une campagne) résultant de la gestion du temps par événements sont un facteur limitant pour réaliser souvent des tests extensifs sur un grand nombre de paramètres.

Validation du méta-modèle Les différents tests de vérification permettent d'affirmer que l'utilisation du formalisme AGR pour la modélisation est possible et n'induit pas de biais. Cependant, l'utilisation conjointe de rôles et d'événements rend parfois la gestion de la complexité problématique puisqu'il faut distribuer les comportements des agents à la fois dans le temps et dans les différents rôles. Cette complexité est apparue plus particulièrement dans la modélisation de la distribution de l'eau par une architecture de type arcs-nœuds (voir plus loin). Une utilisation plus importante des groupes pour centraliser le contrôle sur certains processus pourrait être une solution à la gestion de cette complexité.

3 niveaux de temps sont apparus dans les modèles :

- un temps utilisé pour gérer les mécanismes internes du modèle comme l'envoi et le décalage d'influences pour synchroniser des processus, qui est de l'ordre de la seconde ;
- le temps sur lequel raisonnent les entités des modèles, qui est de l'ordre de l'heure ;
- un temps intermédiaire permettant d'effectuer des ajustements afin d'éviter la simultanéité de certains événements, qui est de l'ordre de la minute.

Ainsi, on assure la stabilité du modèle en décalant les actions des différents niveaux dans le temps :

- les actions d'irrigation sont programmées à l'heure pile ;
- les actions modifiant l'irrigation sont programmées à l'heure + 5 minutes ;
- les actions du niveau des réseaux sont programmées à l'heure + 10 minutes ;
- les actions du niveau du bassin sont programmées à l'heure + 20 minutes.

Validation des hypothèses de modélisation Quelques éléments concernant les hypothèses de modélisation issus des différents tests :

- l'utilisation conjointe d'un formalisme de type arcs-nœuds pour modéliser la distribution de l'eau et d'événements pour gérer le temps a posé de nombreux problèmes pour maintenir l'intégrité du système tout en gardant un niveau de genericité élevé, et le résultat est « bricolé » et assez instable ;
- la modélisation de systèmes hydrauliques plus compliqués amènerait aussi sans doute à revoir l'hypothèse de propagation instantanée, qui si elle ne posait pas problème dans un modèle à pas de temps journalier, peut s'avérer perturbatrice dans un système où les pas de temps peuvent descendre à la seconde et où les débits instantanés sont pris en compte par certains agents ;
- les comportements individuels de gestion de l'irrigation sont trop grossiers pour que le système soit sensible aux règles de gestion collective. De manière générale, il faudrait repenser des règles simples de construction de calendriers d'irrigation tenant mieux compte des types de sols, des contraintes posées par les règles collectives, d'une aversion au risque...

Pour conclure, à la condition de respecter les règles de décalage des actions dans le temps, tous les scénarios simulés sont stables, ce qui confirme le faible niveau de stochasticité du modèle.

Chapitre 8

Bilan et discussions

CONTENU DU CHAPITRE

La thèse a exploré l'utilisation d'une méthode de représentation formalisée et explicite des niveaux d'organisation d'un système comme support de modélisation pour la gestion de bassins versants irrigants. La première phase du travail a constitué à adapter le formalisme multi-agent AGR à une problématique de modélisation. Le mémoire a décrit (1) comment le formalisme AGR a été successivement spécifié (a) en un méta-modèle conceptuel qui redéfinit les objets représentés par les agents, les groupes et les rôles dans le cadre d'une application à la modélisation (b) en un méta-modèle opérationnel, qui propose une implémentation appropriée des groupes et des rôles dans CormasAGR (2) la méthodologie ORIGAMI, constituée d'un jeu de diagrammes destinés à accompagner la construction de modèles utilisant le formalisme AGR (3) les différents modèles ainsi produits à partir des données de terrain et du SMA GibiDrome (4) les opérations de vérification et d'analyse de sensibilité de ces modèles. La figure 114 resitue cette démarche générale et les apports essentiels de la thèse, dont ce chapitre a pour objet de faire le bilan, à travers chacun des 3 axes de développement de la thèse.

Le recours au formalisme AGR répondait à des objectifs d'amélioration de l'expressivité et de la modularité du support de modélisation multi-agent. La première partie de ce chapitre dressera un bilan critique d'ORIGAMI en discutant notamment de la variété des vues offertes par les différents diagrammes, de la réutilisation des diagrammes sur d'autres plate-formes de développement, et enfin des limites et des manques de la méthodologie.

La seconde section du chapitre s'intéressera aux développements conceptuels de la thèse, définis par le méta-modèle et mis à l'épreuve par les modèles. Elle reviendra d'abord sur la représentation des niveaux d'organisation offerte par le concept de groupe, puis sur la représentation d'éléments de comportements ou de points de vue sur un objet offerte par la concept de rôle. Puis elle évoquera plus spécifiquement, sous l'appellation de composition de rôles, les différents aspects de la prise en charge de rôles multiples par une entité.

Dans la dernière section consacrée aux aspects opérationnels, après un bref bilan sur CormasAGR, on détaillera quelques questions liées à la mise en œuvre dans les modèles de la gestion du temps par événements, et de la circulation de l'eau par une architecture arcs-nœuds. Puis on discutera de l'impact de l'utilisation d'AGR sur la mise en œuvre de simulations.

Enfin, on conclura sur la synthèse de ces apports en terme d'expressivité, de modularité et de généralité, principes qui ont guidé notre approche.

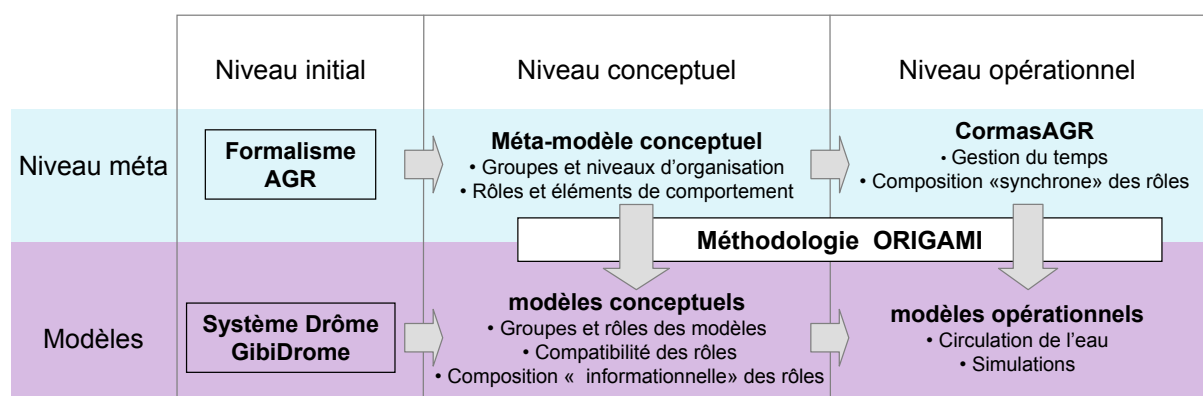


FIG. 114 – Démarche générale : instantiation et spécification du formalisme AGR

Sommaire

1	Retour critique sur la méthodologie ORIGAMI	280
1.1	Gestion de la complexité par ORIGAMI	281
1.1.1	Points de vue sur la structure du modèle	281
1.1.2	Points de vue sur la dynamique du modèle	282
1.2	Raffinage	283
1.3	Ouverture	284
1.4	Expressivité	284
2	Bilan des développements conceptuels	285
2.1	Groupes et niveaux d'organisation	285
2.1.1	Structure de groupe génériques	286
2.1.2	Liens entre les groupes	287
2.1.3	Propriétés exprimées au niveau des groupes	288
2.2	Rôles et éléments de comportement	289
2.2.1	Spécialisation horizontale et verticale	289
2.2.2	Rôles génériques	290
2.2.3	Multiplication des rôles et rôles artificiels	291
2.3	Prise en charge de rôles multiples	293
2.3.1	Compatibilité des rôles	293
2.3.2	Compositions temporelle et informationnelle	294
2.3.3	Ajout de rôles	296
3	Aspects opérationnels	298
3.1	Niveau méta : retour sur CormasAGR	298
3.2	Impact de la gestion du temps par événements	298
3.3	Le cas particulier de la distribution de l'eau	300
3.4	Construction de scénarios et mise en œuvre de simulations	301

1 Retour critique sur la méthodologie ORIGAMI

[Arlabosse *et al.*, 2004] définissent un ensemble de critères d'évaluation des langages et notations dans les méthodes de conception de logiciels :

- l’accessibilité mesure la facilité à comprendre et apprendre les notations ;
- la précision mesure l’ambiguïté laissée dans l’interprétation des notations ;
- l’expressivité mesure la capacité des notations à exprimer tout ce qui est nécessaire au développement du système ;
- la consistance mesure la capacité des notations à vérifier la consistance interne du système ;
- la traçabilité mesure la capacité de la méthodologie à enregistrer des modifications et à les propager dans les différents aspects du système ;
- la modularité mesure le fait que l’ajout de nouveaux besoins ne remet pas en cause ce qui est déjà spécifié ;
- l’ouverture mesure l’indépendance des notations d’une architecture ou d’un langage de programmation particulier ;
- le raffinement mesure la capacité de la démarche à guider la construction du système ;
- la gestion de la complexité mesure la capacité des notations à fournir plusieurs vues du système à différents niveaux de détails.

Parmi ces 9 critères destinés à des objectifs de génie logiciel, on en retient 4, qui nous ont paru appropriés pour effectuer un retour critique sur ORIGAMI et la modélisation :

- la gestion de la complexité : le formalisme AGR doit favoriser la modélisation de différents types de niveaux d’organisation, et donc de différents points de vue sur un système. Il est donc important qu’une méthode et des notations soient à même de concevoir et de représenter ces points de vue ;
- le raffinement : les différents diagrammes proposés ont été rassemblés dans la méthodologie ORIGAMI afin d’accompagner le processus de modélisation avec AGR depuis la construction du modèle de conception jusqu’à l’implémentation du modèle AGR. Il est donc important de vérifier cette propriété ;
- l’ouverture : l’identification et la représentation des niveaux d’organisation d’un système peut être un support utile d’analyse du système, sans qu’elle soit forcément suivie d’une modélisation AGR. Il est donc intéressant d’évaluer quels sont les diagrammes d’ORIGAMI réutilisables hors d’une perspective de modélisation AGR ;
- l’expressivité : le critère d’expressivité nous permettra d’évaluer les limites d’ORIGAMI, et les représentations manquantes.

On pourra se reporter aux schémas de synthèses 18 et 19 du chapitre 4 pour avoir une vue globale des différents diagrammes d’ORIGAMI.

1.1 Gestion de la complexité par ORIGAMI

On expose ici les différents points de vue et les différents niveaux de détails représentés dans les diagrammes d’ORIGAMI.

1.1.1 Points de vue sur la structure du modèle

Une partie des diagrammes d’ORIGAMI est consacrée à décrire la structure d’un modèle AGR.

Vues globales sur les structures de groupes et les agents Le tableau structures/fonctions apporte un point de vue global sur l’identification des types de niveaux d’organisation du système, et donc des structures de groupe du modèle.

Une représentation des différents agents du système et de leur hiérarchie peut être apportée par un diagramme des classes UML classique.

Vues sur la structuration groupes/rôles Un point essentiel d'ORIGAMI est de pouvoir représenter la structuration du modèle créée par les structures de groupe et leurs rôles. Différents diagrammes représentant différents niveaux de détails sont proposés à cet effet :

- le diagramme fonctionnel global représente les liens fonctionnels entre les différentes structures de groupe du système ;
- le diagramme swimlane représente dans un même diagramme les différentes structures de groupe et les différents agents du modèle. Pour chacune de ces structures groupe, il permet de décrire les différents rôles qui y sont définis, leurs liens fonctionnels, et les agents susceptibles de les prendre en charge. Les liens entre les groupes sont aussi représentés à travers les liens « de composition » (entre les rôles susceptibles d'être portés simultanément par un même agent).

Les diagramme swimlane peuvent être construits pour représenter la totalité d'un modèle, ou bien seulement certaines de ses structures de groupe ou de ses processus.

Le diagramme swimlane est sans doute le diagramme le plus intéressant et le plus explicite d'ORIGAMI, puisqu'il présente de manière synthétique la structuration AGR d'un modèle en décrivant les différents rôles définis dans les différentes structures de groupe, les liens fonctionnels entre ces rôles, et les agents susceptibles de prendre en charge ces rôles. Il propose en cela un découpage original de la complexité d'un système.

Le diagramme swimlane peut de plus être construit pour la totalité d'un modèle, ou pour seulement certains de ses processus ou de ses structures de groupe.

Le diagramme fonctionnel global est aussi intéressant en ce qu'il offre une représentation très synthétique des relations entre les différents types de niveaux d'organisation pris en compte dans un modèle.

1.1.2 Points de vue sur la dynamique du modèle

Les autres diagrammes d'ORIGAMI proposent de décrire les dynamiques des modèles selon différents points de vue.

Vue globale Le diagramme dynamique global apporte une représentation globale des différents processus représentés dans un modèle : ces différents processus sont représentés par la circulation des flux d'information qu'ils provoquent au travers des différentes structures de groupe du modèle, avec leur inscription dans le temps.

Les diagrammes dynamiques locaux ne proposent pas une représentation réellement formalisée, mais répondent à un manque plus classique vis à vis de la représentation de l'agencement des processus dans le temps.

Vue sur les processus Les diagrammes dynamiques locaux, ainsi que les diagrammes d'activité organisationnels proposent des vues centrées sur la description du déroulement d'un processus dans le modèle, à travers les différentes structures de groupe concernées par ce processus. Ils représentent donc la succession d'actions ayant lieu dans un cycle de simulation, après l'activation d'un événement.

Les diagrammes dynamiques locaux ne représentent que les structures de groupe et les agents traversés par les processus, alors que les diagrammes d'activité organisationnels descendent au

niveau des activités des rôles. Les diagrammes dynamiques locaux sont donc plus adaptés à la communication sur les types de niveaux d'organisation mobilisés par la représentation d'un processus, alors que les diagrammes d'activité organisationnels fournissent des détails d'implémentation.

Vue sur les structures de groupe Les « role models » proposent une vue centrée sur les structures de groupe : les différents processus pouvant avoir lieu dans un groupe sont décrits par les activités qu'ils déclenchent dans les rôles définis dans la structure du groupe, et les contenus des informations transmises entre ces rôles, et entre les agents qui les prennent en charge.

Les role models n'ont d'autre but que de faire une synthèse des différentes activités que les rôles doivent prendre en charge : ils sont tournés vers la spécification et non vers la communication.

Vue sur les agents : dynamiques organisationnelles Les diagrammes de composition des rôles ont été créés afin d'offrir une vue d'une part sur les échanges ayant lieu entre les différents rôles pris en charge par un agent, et d'autre part sur les changements de rôles subis par un agent durant une simulation.

Ce type de diagramme avait pour objet à la fois d'offrir une représentation des changements d'état d'un agent plus adaptée au formalisme AGR qu'un diagramme d'état UML, et d'offrir une représentation de la composition de rôles plus souple qu'un diagramme de séquence organisationnel, où le temps est représenté linéairement. Il reste toutefois peu lisible et serait sans doute à améliorer.

1.2 Raffinage

En plus d'offrir des représentations des modèles à différents niveaux de détails et selon différents points de vue, la méthodologie ORIGAMI répond à un besoin de guider la conception d'un modèle AGR, depuis un modèle du domaine jusqu'à l'implémentation.

Ainsi le tableau structures/fonctions accompagne l'identification des types de niveaux d'organisation d'un système d'abord, le diagramme fonctionnel global permet de décrire les liens entre ces types de niveaux d'organisation, puis le diagramme swimlane accompagne l'identification des rôles décrivant les dynamiques dans ces types de niveaux d'organisation, et de leurs liens.

Une fois la structure AGR d'un modèle décrite, les différents diagrammes dynamiques guident le modélisateur par affinages successifs depuis la définition de l'inscription des processus dans le temps et dans les différentes structures de groupe du modèle avec le diagramme dynamique global, puis processus par processus avec les diagrammes dynamiques locaux et les diagrammes d'activité organisationnels jusqu'à la spécification des actions élémentaires des rôles et des agents par les « role models » et les diagrammes de composition des rôles.

La construction progressive du modèle jouet décrite dans le chapitre 5 montre l'intérêt de la méthodologie ORIGAMI. Si le déroulement de l'intégralité des diagrammes peut être fastidieux, il permet de guider de bout en bout et de documenter complètement la spécification d'une première version d'un modèle. Lors de l'évolution du modèle, il est alors possible de n'utiliser que certains diagrammes, au coup par coup, quand c'est nécessaire.

1.3 Ouverture

Un besoin exprimé vis à vis de la méthodologie ORIGAMI était aussi, notamment par rapport aux diagrammes proposés par [Durand, 1996], d’offrir des notations qui ne soient pas spécifiques à une implémentation particulière.

Les 4 diagrammes statiques d’ORIGAMI, destinés à établir la structure AGR d’un modèle, ainsi que le diagramme dynamique global, peuvent être utilisés pour décrire et analyser un système en terme de niveaux d’organisation, sans pour autant recourir par la suite à une modélisation AGR.

Les autres diagrammes, destinés à représenter les dynamiques se rapprochent de l’implémentation AGR. On pourrait toutefois imaginer les utiliser comme dans Gaïa [Wooldridge *et al.*, 2000] uniquement à un niveau conceptuel et à regrouper les rôles dans des agents au moment de l’implémentation. Il manquerait alors des vues pour effectuer cette opération.

Le diagramme swimlane En formalisant un découpage fonctionnel du système, le diagramme swimlane oblige à expliciter des hypothèses de modélisation fortes souvent implicites dans les SMA classiques : quels sont les niveaux d’organisation pris en compte et comment une entité y participe-t-elle (dénomination des rôles et détermination des liens).

Son utilisation tout au long de la thèse, sur les modèles développés comme sur d’autres systèmes, a montré que c’est un support de discussion fécond pour communiquer sur un modèle avec des chercheurs, ou pour appuyer l’analyse d’un système. En effet, en mettant à plat les comportements des entités selon les échelles et les processus, le diagramme swimlane est une représentation offrant un gain de lisibilité sur l’organisation d’un système.

1.4 Expressivité

Bien qu’ORIGAMI propose un jeu de diagrammes offrant des points de vues et des niveaux de détail variés, on peut relever certaines limites :

- il manque sans doute une vue plus précise des rôles et des agents pour décrire sans ambiguïté les comportements individuels qui seront implémentés. Le mode de représentation des rôles proposé par [Amiguet, 2003] semble particulièrement adapté : le comportement d’un rôle y est décrit par un diagramme de transition documentant les messages reçus et envoyés par le rôle, et par un cartouche listant les compétences utilisées par le rôle ainsi que les méthodes qu’il définit ;
- la mise en œuvre de règles collectives a été représentée par l’interprétation de contraintes par des rôles de type **Manager**. Les contraintes définies dans les modèles et les comportements d’interprétation de ces contraintes ont été répertoriés dans des tableaux. Il serait utile de disposer d’un mode de représentation plus adapté afin de mieux expliciter les différentes règles collectives, et les différentes options de mise en œuvre de ces règles collectives présentes dans un modèle.

La méthodologie ORIGAMI fournit des diagrammes offrant des points de vues et des niveaux de détails complémentaires qui permettent de guider le développement d'un modèle AGR.

Parmi ces diagrammes, le diagramme swimlane est ressorti comme particulièrement fécond pour discuter d'un modèle ou dégrossir l'analyse d'un système par le point de vue structurant qu'il amène.

Les limites principales de la méthode ORIGAMI se trouvent dans :

- la représentation précise des comportements d'un rôle, ainsi que des messages qu'il envoie et reçoit. Sans une meilleure documentation, les rôles ne peuvent devenir des composants réutilisables, et le passage des diagrammes à l'implémentation ne peut se faire sans ambiguïté ;
 - la représentation des règles collectives, et des comportements de mise en œuvre des règles collectives dans un modèle.
-

2 Bilan des développements conceptuels

Le formalisme AGR a été utilisé en vue de supporter l'explicitation des différents niveaux d'organisation d'un système, des comportements et interactions au sein de ces niveaux, et des interactions entre ces niveaux. Cette section dresse un bilan de la production « conceptuelle » de la thèse : quelle forme a pris cette explicitation ?

2.1 Groupes et niveaux d'organisation

L'utilisation du formalisme AGR a d'abord été motivée par la volonté de pouvoir manipuler de manière explicite et modulaire les niveaux d'organisation d'un système. Cette section a pour objet de revenir sur les groupes qui ont été définis dans les modèles : représentent-ils des niveaux d'organisations, ont-ils une portée générique, quels sont leurs liens et comment ont été représentées leurs interactions, et enfin, quels sont les propriétés et les comportements qui ont été définis au niveau des groupes ?

Au chapitre 1, on a défini la notion de niveau d'organisation comme l'expression du point de vue d'un modélisateur sur un ensemble d'entités du système accomplissant une certaine fonction à l'intérieur d'une unité structurelle jugée pertinente.

Examinons les groupes des modèles :

- les niveaux d'organisation représentés par les groupes de type **Farm**, **IrrigationAssociation** et **BasinManagement** sont des niveaux de gestion : la fonction qui y est accomplie est celle de la prise de décision concernant l'usage de la ressource dans une unité structurelle définie par les objets dont le gestionnaire du groupe est directement responsable. Ces objets interviennent dans le niveau d'organisation en donnant accès à des informations sur leurs caractéristiques visibles depuis ce niveau.

Dans les niveaux collectifs (de type **IrrigationAssociation** et **BasinManagement**), les usagers interviennent en récupérant les contraintes sur l'usage de la ressource auxquelles le niveau d'organisation les soumet ;

- les niveaux d'organisation représentés par les groupes de type **Crop**, **IrrigationNetwork** et **Basin** sont des unités fonctionnelles : la fonction qui y est accomplie est celle de la

circulation de l'eau dans une unité structurelle définie par une échelle hydraulique. La circulation de l'eau y résulte de la conjonction des processus naturels et des fonctions d'usage appliquées par les responsables de leur gestion.

Au niveau de la parcelle, la circulation de l'eau inclut la consommation de l'eau par la culture et la croissance de celle-ci en résultant ;

- les niveaux d'organisation représentés par les groupes de type **MailingList** et **Neighborhood** sont des niveaux de distribution d'information : la fonction qui y est accomplie est celle du transfert d'information depuis des entités émettrices vers des entités réceptrices. Ce transfert a lieu dans une unité structurelle propre au circuit de l'information dans le niveau d'organisation ;
- enfin, le niveau d'organisation représenté par le groupe de type **DashBoard** est un niveau de traitement d'information : la fonction qui y est accomplie est celle la transformation d'informations observées en des informations de plus haut niveau utilisables par d'autres acteurs du système. L'unité structurelle est définie par les objets observés.

Des évolutions du modèle pourraient être tournées vers la prise en compte de niveaux d'organisation explicitant des contraintes sur l'assolement :

- îlots semenciers : la culture de maïs semence pourrait être conditionnée par l'appartenance à un îlot semencier. Un îlot semencier étant défini par des critères spatiaux, il faudrait pour représenter un tel niveau aborder les questions liées à la prise en compte de l'espace dans un modèle AGR, questions qui ont été évacuées de la problématique de la thèse ;
- filières : les décisions concernant l'adoption d'un assolement pourrait être conditionnées par des aspects économiques d'accès à des filières d'écoulement des productions. Les filières pourraient être représentées par des groupes définissant un certain quota de production pour un type de culture, et acceptant autant de fournisseurs que ce quota le permet. Les agriculteurs n'ayant pu obtenir une place de fournisseur dans une filière pourraient alors prendre une décision concernant leur assolement selon des caractéristiques d'aversion au risque qui leur seraient propres ;
- niveaux d'organisation informels : la prise de décision pourrait aussi dépendre de l'appartenance à des groupes informels colportant des informations, ou donnant accès à du partage de matériel.

2.1.1 Structure de groupe génériques

Les structures de groupe utilisées pour représenter des niveaux de gestion et des unités fonctionnelles ont un caractère générique tel qu'elles ont pu être regroupées dans des hiérarchies (diagramme 115) :

- les structures de groupe définissant des unités fonctionnelles héritent de la classe **FunctionalUnit**. Elles ont en commun de représenter la circulation de l'eau à une échelle donnée depuis un ou plusieurs points d'entrée vers un point de sortie ou un réservoir. Ces structures de groupes, qui modélisent la circulation de l'eau par un formalisme arcs-nœuds sont suffisamment génériques pour être réutilisées directement dans d'autres modèles de gestion de l'eau, puisqu'il suffit de définir les branches et les points d'entrée et de sortie instanciés selon la topologie du système que l'on souhaite modéliser. Il faudrait toutefois retravailler cette architecture arcs-nœuds pour y simplifier la mise en œuvre de la propagation des débits et des demandes et en stabiliser les dynamiques (voir 3.3) ;
- les structures de groupe définissant des niveaux de gestion héritent de la classe **ManagementInstitution**. Elles sont caractérisées par l'unité fonctionnelle correspondante (**territory**), ainsi que par leur gestionnaire (**head**).

On pourrait bien sûr imaginer par la suite des niveaux de gestion responsables de plusieurs unités fonctionnelles ou ayant plusieurs gestionnaires.

Ces structures de groupe sont génériques et modulaires, mais doivent être spécialisées à nouveau (redéfinition des règles des **Manager** et des objets **Constraint**) pour être utilisées dans d'autres systèmes.

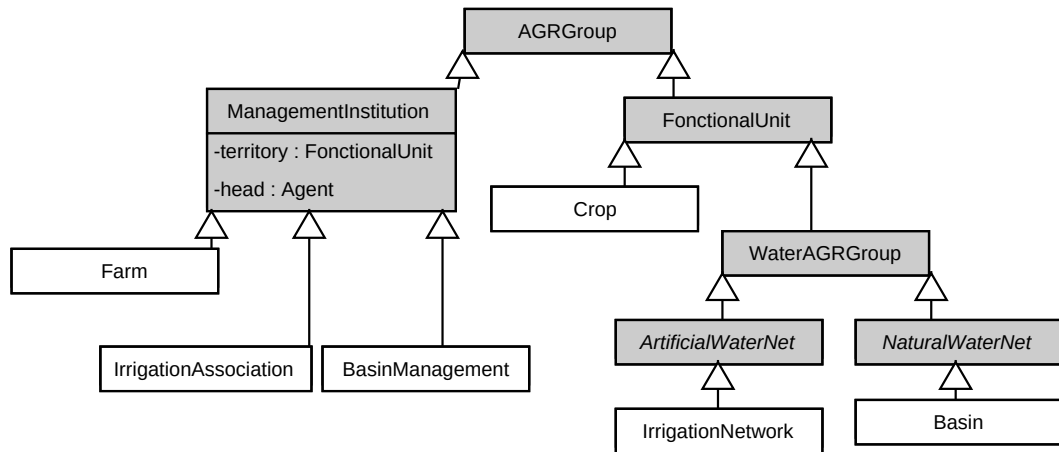


FIG. 115 – Diagramme de classe : hiérarchie des structures de groupe du modèle jouet

Ainsi les structures de groupe représentant la circulation de l'eau sont réutilisables indépendamment les unes des autres, et suffisamment génériques pour être reprises dans d'autres systèmes. Il en va de même des structures définissant la liste de diffusion et le réseau de voisinage. Les structures de groupe représentant des niveaux de gestion sont génériques et modulaires, mais c'est le contenu des rôles et des contraintes qu'il faudrait redéfinir pour passer à d'autres systèmes.

Les autres structures de groupe des modèles ont aussi un caractère générique, sans toutefois avoir été regroupées dans des hiérarchies. On pourrait considérer notamment que **MailingList** et **Neighborhood** constituent deux spécialisation d'une structure de groupe plus générique de diffusion de l'information, caractérisée par la forme des réseaux de diffusion et leur origine, ainsi que par la variété des actions des émetteurs et des transmetteurs. Ces structures de groupe sont suffisamment génériques pour être réutilisées directement dans d'autres systèmes.

2.1.2 Liens entre les groupes

Les interactions entre les différents niveaux d'organisation sont représentées par des liens entre les structures de groupe correspondantes, apparaissant sur les diagrammes fonctionnels globaux, et matérialisées par la prise en charge de rôles de ces structures de groupe par un même agent. Les interactions possibles entre les groupes des modèles sont de différents types :

- liens entre des groupes de gestion : transfert des règles collectives depuis les niveaux collectifs vers les niveaux plus élémentaires. Des remontées d'information n'ont lieu que dans le cas de la règle d'attribution préférentielle des débits aux sols les plus légers, où les abonnés du réseau déclarent chaque jour leur irrigation du lendemain ;
- liens entre des unités hydrauliques : transfert de débit ou de demande par le biais des objets (pompes) faisant le lien entre les unités ;

- lien entre un groupe de gestion et une unité hydraulique : observation, par le biais des objets observés dans un sens, contrôle, par le biais de l'agent gestionnaire dans l'autre. Les rôles **Technician** et **PumpControl** ont été localisés dans les unités hydrauliques parce qu'on a estimé que l'actionnement des objets relève plus des processus physiques que du jeu social ;
- liens induits par des groupe d'informations (type **Neighborhood** et **MailingList**) : un groupe d'information ne s'occupe que de transférer de l'information entre ses membres, et donc entre les groupes auquel il est lié ;
- lien entre le groupe de type **DashBoard** et les parcelles : le groupe expert observe individuellement les parcelles et en recueille de l'information. Les parcelles viennent y prendre des rôles représentant l'information accessible au groupe.

On a bien pu représenter toutes les interactions inter-niveaux d'organisation par la prise en charge de rôles multiples par une entité commune aux niveaux.

Il est à noter que la prise en charge de rôles par un groupe est autorisée dans **CormasAGR**, sans qu'on ait jamais eu besoin d'y avoir recours. Pour aller plus loin, on peut s'interroger sur la nécessité de cette structure holonique et les cas où on pourrait y avoir recours :

- pour des groupes sociaux, les changements de niveau peuvent toujours passer par le biais d'un individu, représentant ou délégué. La prise en charge d'un rôle par un groupe social pourrait se justifier dans une perspective d'identification de nouveaux rôles à travers des motifs de comportement qui s'observent au niveau du groupe. Ces motifs de comportements représenteraient alors bien une propriété collective du groupe, et donc exprimée par le groupe lui-même et rendue utilisable en donnant la possibilité au groupe de prendre en charge des rôles ;
- pour les groupes physiques, on pourrait de même imaginer des cas où on confie au groupe la définition de propriétés ou de comportements collectifs :
 - on pourrait par exemple imaginer demander à un groupe représentant le parcellaire du bassin de fournir des informations agrégées lorsqu'il prend en charge un rôle de « photo aérienne » dans un groupe de type **DashBoard** qui pourra utiliser les informations ainsi fournies à ses fins ;
 - la définition de propriétés collectives pourrait devenir nécessaire si on désagrègeait certains processus physiques : modélisation des boules d'eau, comme chez [Servat, 2000], ou bien modélisation des plants de maïs individuels, alors que l'agriculteur n'a accès qu'à des indices globaux sur une parcelle. Il faudrait alors représenter la parcelle par un groupe responsable de distribuer l'irrigation à ses composants (les plants de maïs), et de calculer des indices ou un rendement agrégé. Ce niveau de détail permettrait par exemple de représenter l'hétérogénéité des apports sur une parcelle. Il serait intéressant dans le cadre d'un modèle physique pour la décision individuelle mais trop précis pour un modèle destinés au support de la décision collective.

2.1.3 Propriétés exprimées au niveau des groupes

Dans les modèles développés, les groupes ne sont en charge que de leur propre initialisation.

Les perspectives de la section précédente ont illustré les possibilités et l'intérêt qu'il y aurait à représenter des propriétés ou des comportements collectifs au niveau des structures de groupe.

On pourrait également imaginer utiliser les groupes comme des niveaux de coordination inter-médiaires, pour centraliser certaines informations ou comportements. Par exemple, les groupes de circulation de l'eau pourraient s'occuper de transférer demandes et débits des sorties vers les entrées et inversement plutôt que de recourir à une propagation arcs-nœuds coûteuse en temps

et génératrice d'instabilités, la perte de généralité étant compensée par un gain en efficacité.

Un objectif du recours à AGR était de fournir des objets permettant une représentation explicite des niveaux d'organisation d'un système et de leurs interactions. Le développement des 3 modèles a bien fourni des structures de groupe modulaires, et il a été toujours possible de représenter leurs interactions par le biais d'agents communs.

Des structures de groupe à portée générique apparaissent même dans les modèles :

- structures de groupe représentant la circulation de l'eau à une échelle donnée, directement réutilisables pour des modèles d'autres bassins versants ;
- structures de groupes représentant des structures de propagation d'information, directement réutilisables pour des modèles de gestion de ressources en général ;
- structures de groupe représentant des niveaux de gestion, réutilisables pour des modèles de gestion de ressources en général, par la redéfinition des comportements des gestionnaires et des règles collectives.

Enfin, des perspectives de réflexion s'ouvrent autour de l'expression de propriétés et de comportements au niveau des structures de groupe, voir de la prise en charge de rôles par des groupes.

2.2 Rôles et éléments de comportement

Une autre motivation de l'utilisation du formalisme AGR était de pouvoir représenter les comportements et les modes d'action des entités du système relativement aux niveaux d'organisation auxquelles ces entités prennent part.

Dans le chapitre 2, une définition de la notion de rôle issue de la sociologie était proposée : un rôle est un registre de comportements correspondant à une fonction dans un système. Les rôles qui ont été construits dans les différents modèles sont de 2 types : les rôles actifs sont bien des registres de comportements correspondant à la fonction d'une entité dans un niveau d'organisation, alors que les rôles passifs représentent les caractéristiques d'une entité visibles depuis un niveau d'organisation.

L'objectif de cette section est de revenir sur les rôles définis dans les modèles. On commencera par qualifier les comportements qu'ils représentent, puis on statuera sur leur portée générique. Enfin on discutera des incidences sur le travail de modélisation qu'amène la décomposition du comportement des entités d'un système en rôles.

2.2.1 Spécialisation horizontale et verticale

Pour aller plus loin dans la qualification des rôles développés dans les modèles on utilisera les notions de spécialisation horizontale et verticale proposées par [Odell *et al.*, 2003].

La spécialisation horizontale d'un rôle qualifie le nombre et la complexité des actions prises en charge par ce rôle. La spécialisation horizontale qualifie donc la manière dont s'effectue la décomposition des tâches dans le modèle d'un système. Pour [Odell *et al.*, 2003], et dans le cadre de l'ingénierie des logiciels, un rôle spécialisé horizontalement est plus modulaire, et donc plus aisé à modifier : il peut être pris en charge et mis en œuvre par un agent indépendamment de ses autres rôles, et indépendamment des autres rôles dans le système. Les rôles spécialisés sont

plus adaptés pour représenter des actions répétitives et bien définies, mais il peut être nécessaire de définir des rôles plus complexes pour coordonner l'action de rôles spécialisés.

La spécialisation verticale qualifie le degré de contrôle qu'un rôle a sur ses actions et les actions des autres. La spécialisation verticale qualifie donc la manière dont s'effectue l'administration des tâches dans le modèle d'un système. Des rôles de gestion « larges » verticalement sont en charge de l'administration et du contrôle de rôles plus spécialisés.

Dans les modèles de la thèse, tous les rôles sont spécialisés horizontalement (ils sont chargés d'une tâche précise) sauf les rôles **Manager**, qui sont aussi les seuls à avoir un niveau de contrôle sur les autres rôles. Les rôles **Manager** définissent un niveau de spécialisation verticale, puisqu'ils s'occupent de la coordination des autres rôles modélisant la décision de manière spécialisée :

- dans les groupes de type **IrrigationNetwork** et **Basin**, les rôles de circulation de l'eau prennent en charge le transfert et la distribution de l'eau entre leurs entrées et sorties. Ils sont indépendants les uns des autres (si il n'y a pas de sortie, le débit propagé « remonte ») ;
 - dans la structure de groupe **Crop** les différents rôles sont chargés respectivement de commander une demande en eau, d'amener de l'eau, de la stocker, de la transformer. Ils peuvent fonctionner indépendamment les uns des autres, sauf le rôle **WaterTransformation**, qui ne peut effectuer un bilan hydrique sans stock d'eau (ce qui correspond à une réalité physique!), et le rôle **Technician** qui ne peut agir sans **PumpControl** ;
 - dans les structures de groupe qui représentent des niveaux de gestion, les rôles **Manager** sont moins spécialisés, puisqu'ils sont responsables de la prise de décision de gestion. Ils ne peuvent parfois pas fonctionner sans les informations fournies par les rôles d'observation. De même le rôle **Expert** dans la structure de groupe **Dashboard** dépend des rôles lui fournissant des informations. Les rôles de type **User** ne font que relayer des informations.
- Dans un groupe de type **Farm**, les rôles **ManagerIrri** et **CalendarManager** ne peuvent fonctionner l'un sans l'autre, et c'est **ManagerIrri** qui commande. Les rôles **ManagerCrisis** ne fonctionnent que par rapport au **CalendarManager** ;
- dans la structure de groupe **MailingList** les rôles sont chargés de transférer de l'information et sont indépendants les uns des autres, mais dans la structure de groupe **Neighborhood**, le rôle central ne fonctionne pas sans ses 3 voisins.

Ces constatations permettent d'évaluer la modularité des différents rôles du modèle. Pour que les rôles soient réutilisables indépendamment les uns des autres, il faudrait toutefois que leurs entrées et sorties soient spécifiées et documentées clairement, ce que ne propose pas ORIGAMI (voir 1.4).

2.2.2 Rôles génériques

Des rôles génériques ont émergé du développement des différents modèles de la thèse. Ces rôles génériques définissent des motifs de comportement que l'on pourrait transposer et redéfinir dans d'autres modèles de gestion de ressources.

Rôles d'observation et de contrôle Ils sont dédiés à représenter l'interface entre l'utilisateur et les objets sur lesquels il exerce sa gestion (diagramme 116) :

- dans les groupes représentant des niveaux hydrauliques, des rôles de contrôle héritant de la classe **ControlRole** encapsulent l'accès aux caractéristiques modifiables de l'objet ;
- dans les groupes représentant des niveaux de gestion, des rôles d'observation, héritant de la classe **ObservationRole**, encapsulent l'accès aux caractéristiques observables de l'objet. On distingue les rôles modélisant l'observation des objets directement gérés au niveau concerné de ceux modélisant l'observation des objets gérés par les usagers du niveau.

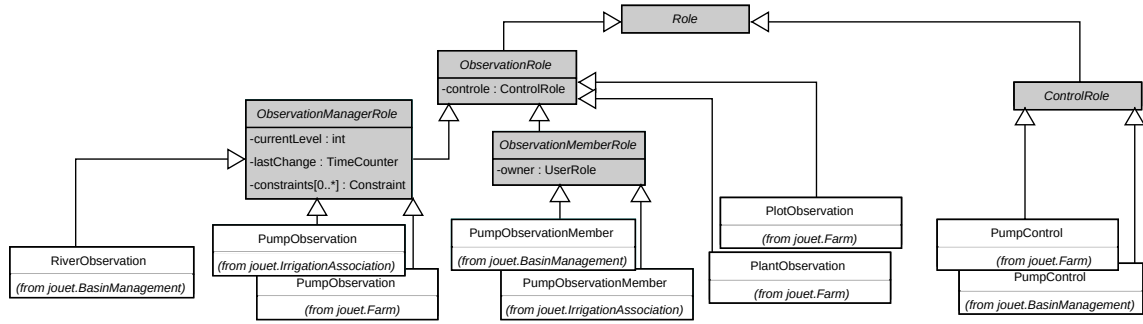


FIG. 116 – Diagramme de classe : hiérarchie des rôles d'observation et de contrôle du modèle jouet

Les premiers héritent de la classe **ObservationManagerRole**. Ils sont caractérisés par le niveau de restriction portant sur l'objet observé (**currentLevel**), la date de mise en place de ce niveau (**lastChange**), ainsi que par les contraintes portant sur cet objet (**constraints**), qui sont les règles collectives imposées par le niveau de gestion supérieur, dans lequel le gestionnaire du groupe est usager.

Les seconds héritent de la classe **ObservationMemberRole**. Ils sont caractérisés par le gestionnaire de l'objet observé (**owner**), qui est usager dans le groupe.

Ces rôles peuvent être utilisés pour représenter des *instruments de mesure ou de contrôle*, et les distorsions éventuelles entre caractéristiques perçues et caractéristiques réelles.

Rôles de gestionnaire, d'utilisateur et de technicien Dans un niveau de gestion, un agent est soit gestionnaire (rôle héritant de **ManagerRole**), soit usager (rôle héritant de **UserRole**), chargé de transmettre les règles collectives du niveau de gestion au niveau dont il est gestionnaire. Les gestionnaires connaissent l'ensemble de leurs usagers (**users**), l'ensemble des objets qu'ils gèrent (**obsManaged**), ainsi que l'ensemble des objets gérés par leurs usagers et dépendant du niveau de gestion du groupe (**obsMember**).

Les usagers connaissent le gestionnaire du groupe (**manager**). Ils ont accès aux objets qu'ils gèrent dans leur propre niveau gestion. L'arbre des classes résultant est représenté dans le diagramme 117.

Ce sont les rôles de gestionnaire qui prennent en charge les prises de décision concernant la gestion des objets dont ils sont responsables. On pourra donc représenter les différents modes de gestion à l'aide de différents types de rôles de gestionnaire.

Les rôles de technicien (de type **Technician**) sont le pendant des rôles de contrôle puisqu'ils encapsulent les actions élémentaires qu'un agent peut effectuer sur les objets qu'il contrôle. Ils peuvent donc modéliser un savoir-faire technique. On peut d'ailleurs imaginer une organisation plus complexe où gestionnaire et technicien correspondent à des agents différents.

2.2.3 Multiplication des rôles et rôles artificiels

La décomposition du système en groupes et en rôles, et l'obligation de toujours exprimer la participation d'un agent à un groupe par un rôle et de restreindre les interactions entre agents aux interactions via des rôles pris en charge dans un même groupe a pour conséquence de multiplier le nombre de classes à définir pour développer un modèle.

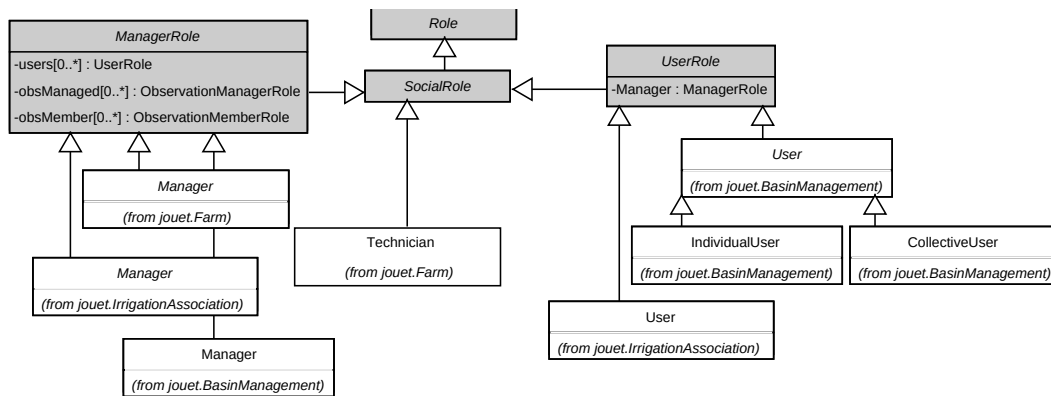


FIG. 117 – Diagramme de classe : hiérarchie des rôles sociaux du modèle jouet

Ainsi certains rôles ne sont créés que par la nécessité d'exprimer la participation d'un agent à un groupe : le rôle **Technician** par exemple ne fait rien d'autre qu'exécuter les actions définies au niveau du groupe de gestion dans le groupe physique. On peut cependant toujours penser que l'introduction d'un nouveau rôle n'est jamais inutile, puisqu'on pourrait par exemple utiliser différents rôles **Technician** pour représenter des manières d'agir différentes. De même les rôles de contrôle ou d'observation peuvent être utilisés pour représenter la défaillance d'outils de mesure ou de contrôle.

Cette multiplication d'objets à définir, qui représente une complexité initiale accrue pour le modélisateur est sans doute le prix à payer pour forcer à l'explicitation d'hypothèses sur les modes d'action des agents dans les différents niveaux d'organisation. Le formalisme AGR apporte donc un supplément descriptif dans la structure même du modèle, et sans doute est-il propice à la construction de modèles « KIDS - Keep It Descriptively Stupid » : pour [Edmonds and Moss, 2004] il peut être utile, dans la modélisation de systèmes complexes, de recourir à une approche « KIDS », qui se propose de représenter de manière explicite toutes les informations disponibles sur un système, quitte à éliminer par la suite celles qui s'avèrent ne pas avoir d'importance, plutôt qu'à une approche « KISS - Keep it Simple Stupid », qui fait le choix initial de ne représenter que les hypothèses apparaissant strictement nécessaires, au risque de passer à côté d'interactions importantes. Le choix d'utiliser un formalisme structuré tel qu'AGR repose donc sur un équilibre entre exigence de simplicité et exigence d'explicitation des hypothèses sur un système.

Un objectif de l'utilisation du formalisme AGR était de fournir des objets permettant de représenter de manière explicite la participation d'une entité à un niveau d'organisation.

Les rôles permettent de représenter des éléments de comportement, ou des points de vue relatifs à un niveau d'organisation. Tous les rôles développés dans les 3 modèles sont très spécialisés, dédiés à la représentation d'une ou deux actions élémentaires, sauf les rôles de type **Manager**, qui ont la charge de prendre des décisions sur les niveaux d'organisation dont ils sont responsables. La modularité amenée par les rôles permet ainsi de pouvoir définir plusieurs types de stratégies de décisions que les agents peuvent prendre en charge indépendamment de leurs autres rôles et faire évoluer.

Les rôles d'observation, de contrôle, de gestionnaire et d'utilisateur ont une portée générique : leurs liens forment des motifs réutilisables et ils peuvent être redéfinis pour d'autres applications à la gestion de l'eau ou d'autres ressources.

Enfin, le niveau de complexité initial qu'ajoute la décomposition de comportements en différents rôles est le prix à payer pour gagner en explicitation et en modularité.

2.3 Prise en charge de rôles multiples

Une dernière motivation de l'utilisation du formalisme AGR était de pouvoir rendre compte de l'interaction de niveaux d'organisation enchevêtrés. Ces interactions se résolvent alors dans la prise en charge simultanée de rôles par un agent et la composition de ces rôles.

On revient dans cette section sur toutes les questions liées à la prise en charge de rôles multiples par un agent. On distinguera :

- les questions liées à la compatibilité des rôles pris en charge par un agent durant une simulation, qui rendent compte d'hypothèses de modélisation sur les stratégies des acteurs ;
- les questions liées à la composition de rôles, c'est à dire à la prise en charge simultanée de différents rôles. On pourra encore distinguer :
 - la composition « temporelle » : comment faire en sorte que des rôles actifs en même temps ne se contredisent pas ou ne provoquent pas conflit. Cette composition peut se résoudre par des mécanismes contrôlés au niveau de la plate-forme ;
 - la composition « informationnelle » : comment faire en sorte que les informations fournies par différents rôles soient utilisées. Cette composition ne peut se résoudre seulement au niveau de la plate-forme. Elle doit être réglée localement par les rôles concernés ;
- les conséquences de la composition de rôles sur la modularité des rôles et l'ajout de nouveaux rôles dans un modèle.

2.3.1 Compatibilité des rôles

Le comportement des agents se construit par le choix d'un ensemble de rôles spécialisés décrivant chacun un élément de ce comportement. Si la composition de ces différents rôles ne pose pas de problèmes au niveau informatique, les contraintes portant sur ce choix ne relèvent plus que d'hypothèses faites sur la compatibilité des différents éléments de comportement dans le système.

Cette question de compatibilité des rôles ne concerne dans les modèles que l'Agent **Farmer** et ses différents rôles **Manager** correspondant aux différentes phases de culture : le profil de comportement d'un agent **Farmer** est construit par le choix de (1) son rôle de semis (2) son rôle

de lancement de l'irrigation (3) son rôle de détermination des doses d'irrigation (4) son rôle de gestion du calendrier d'irrigation (5) son rôle de gestion de crise.

Le modèle est construit de manière à ce que les différentes variantes de ces rôles puissent toutes fonctionner ensemble. Le choix des variantes de ces différents rôles revient donc à un travail sur la construction de typologies de comportements à partir des briques décrivant des variantes de décisions individuelles ou de réaction à des contraintes collectives. Cette construction de typologies peut s'envisager en perspective comme une bonne base de dialogue avec les thématiciens ou les acteurs en étendant les variantes à d'autres rôles.

Le gain en modularité au sein d'un même modèle apporté par le concept de rôle se mesure à la facilité accrue pour définir des types d'individus par la donnée de l'ensemble des variantes de rôles qu'ils prendront en charge durant la simulation. Ce travail est effectué « à la main » par l'utilisateur, mais une perspective serait de simuler plusieurs campagnes et définir des critères permettant aux agents de changer de variante de rôle entre 2 campagnes.

2.3.2 Compositions temporelle et informationnelle

La composition de rôles portés simultanément représente un enjeu important puisque c'est ainsi que se traduit la superposition de niveaux d'organisation. La question est de faire en sorte d'assurer que les différents rôles portés par un agent ne créent pas de conflits, ne se contredisent pas et puissent agir ensemble. Cette composition prend 2 formes :

- coordination des rôles agissant simultanément : afin de limiter les problèmes de coordination, CormasAGR n'autorise pas les entités à traiter plus d'un événement, défini par l'agent ou par un de ses rôles, par cycle de simulation. Ce mécanisme est limité car les rôles d'une entité peuvent être activés au cours d'un cycle de simulation sans qu'il y ait traitement d'un événement, et le modélisateur doit donc recourir à l'envoi d'influences pour mettre en œuvre ce type de coordination.

Dans MOCA il est proposé un mécanisme plus évolué, où les agents peuvent bloquer certaines de leurs compétences sous des conditions de leur choix. Il serait intéressant de pouvoir utiliser ce mécanisme dans la gestion de la circulation de l'eau, qui est le point essentiel des modèles où l'on rencontre des problèmes de coordination. Cependant ce genre de coordination est utile principalement lorsqu'il faut gérer beaucoup d'imprévisible, ce qui n'est pas vraiment le cas dans nos modèles ;

- assimilation de l'information issue de différents rôles, et planification des actions dans différents rôles. Le problème est alors d'ordre cognitif et ne peut se réduire à de la coordination temporelle. Au niveau de développement actuel de CormasAGR, on ne peut alors agir qu'au cas par cas, en définissant des règles spécifiques au niveau des agents, ou de rôles non spécialisés comme les rôles **Manager**.

Ainsi, si on étendait les modèles à des exploitations possédant plusieurs pompes leur donnant accès à différentes sources d'approvisionnement, il faudrait doter les rôles **Manager** de nouvelles méthodes capables de planifier l'irrigation sur plusieurs ressources, ou créer un nouveau type de rôle dédié à cet effet, comme des rôles **CalendarManager** ont été créés pour gérer la planification des irrigations dans la journée.

Composition des niveaux individuel et collectif Les contraintes ont été une solution pour modéliser la mise en œuvre de règles collectives, ce qui revient à la composition des rôles liant niveau collectif (rôles **User**) et individuel (rôles **Manager**).

Les contraintes sont les objets utilisés pour stocker les règles de gestion collective. Ces contraintes sont définies au niveau d'un groupe de type **ManagementInstitution** et relatives

aux objets gérés par les usagers du groupe (rôles **ObservationMemberRole**). En début de simulation, ces contraintes sont envoyées aux gestionnaires des objets sur lesquelles elles s'appliquent, c'est à dire des agents prenant en charge les rôles **User** du groupe.

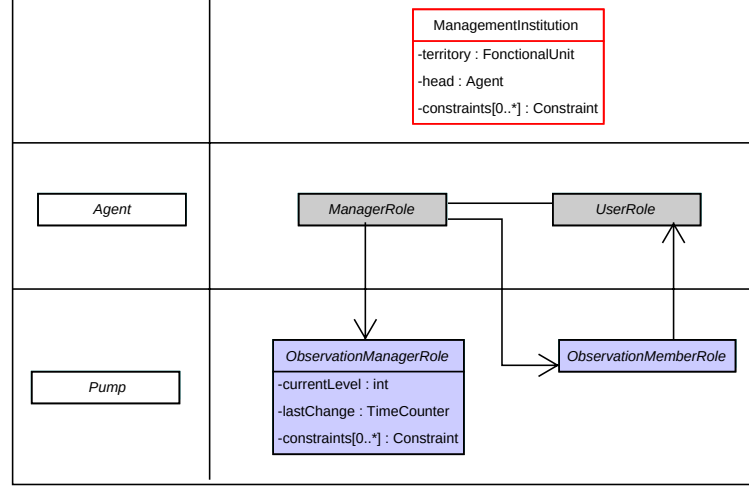


FIG. 118 – Diagramme swimlane d'un groupe de type **ManagementInstitution** (Farm, IrrigationAssociation et Basin)

Réciproquement, les objets gérés par le groupe (rôles **ObservationManagerRole**) ont aussi reçu des contraintes des niveaux supérieurs. (voir diagramme 118).

Les règles individuelles de gestion sont portées par les rôles **Manager** avec les méthodes de mise en œuvre des contraintes. Le recours à un objet **Calendar** est spécifique à notre application à l'irrigation, mais la formalisation de règles de gestion collective dans des objets **Constraint** et de règles individuelles dans des rôles **Manager** peut être valable pour la modélisation AGR de tout système de gestion de ressource.

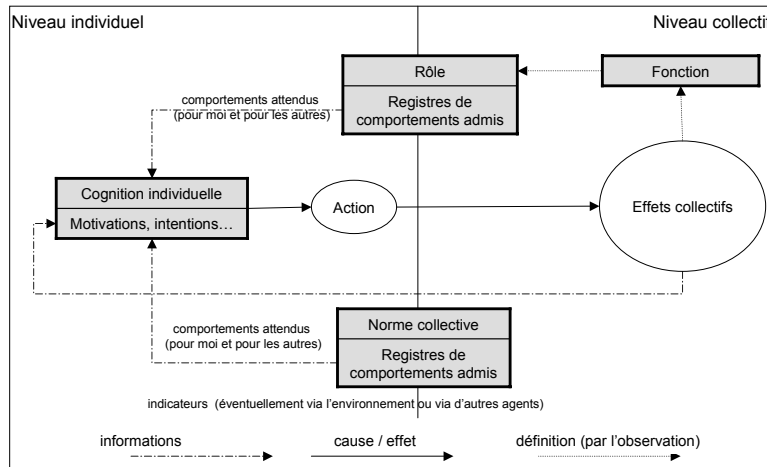
La représentation des contraintes d'une part et des rôles de gestion d'autre part a pour conséquence une double modularité : sur les règles collectives et sur les comportements de mise en œuvre de ces règles collectives, et il ainsi possible de jouer facilement sur les combinaisons.

Un cycle de décision alternatif Cette composition informationnelle montre que le formalisme AGR permet de définir un cycle de décision alternatif, où la perception de l'environnement ou des règles collectives, la prise de décision, et l'action sont représentés dans des rôles spécialisés, alors que l'agent est responsable du choix de ces rôles spécialisés (voir figure 119).

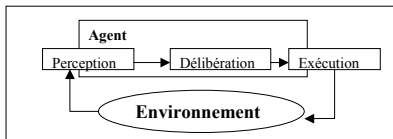
On peut rapprocher le schéma de cycle de décision ainsi obtenu du schéma présenté dans le chapitre 2 illustrant une approche sociologique du lien entre l'individuel et le collectif par les concepts de rôle, de norme et de fonction :

- les indicateurs sur l'environnement ou des effets collectifs sont fournis par les rôles d'observation ;
- les normes collectives sont représentées sous la forme de contraintes distribuées par les rôles **User** ;
- les registres de comportements sont définis par les rôles à la disposition des agents. Les rôles constituent ainsi des éléments de la décision individuelle, et la complexité individuelle se décompose entre des modalités d'actions ou de délibération (les rôles) et le choix de ces

Vue schématique de l'insertion individuelle dans le collectif (rappel du chapitre 2)



Cycle de décision classique des agents (d'après [Woolridge, 1999])



Cycle de décision des agents dans les modèles développés

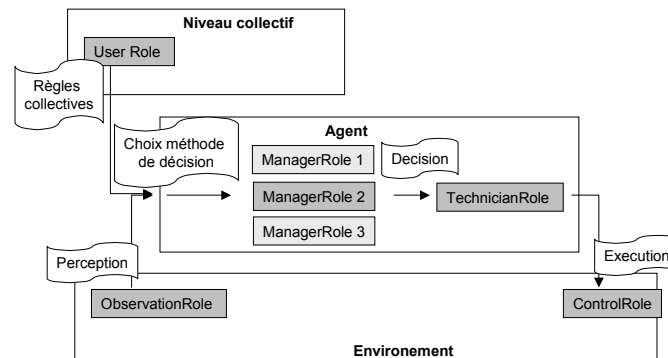


FIG. 119 – Cycle de décision d'un agent induit par l'utilisation d'AGR

modalités pour les agents.

Le retour du collectif vers la définition de rôles correspondant à des fonctions reviendrait à identifier des nouveaux rôles au cours des simulations, comme il l'a été évoqué au 2.1.2.

2.3.3 Ajout de rôles

Il s'agit ici d'examiner les conséquences qu'a cette composition de rôles sur la capacité à introduire de nouveaux rôles dans un modèle. L'introduction de nouveaux rôles peut prendre deux formes :

- définition d'une nouvelle variante à un type de rôle déjà existant. Ce type d'ajout ne pose pas de problèmes dans la plupart des cas, puisque les rôles amènent précisément une modularité permettant de définir facilement de nouvelles variantes de comportements.

Il est cependant des cas où la définition d'une nouvelle variante de rôle demande à propager des modifications dans d'autres éléments des modèles. Ainsi lors de l'introduction de nouveaux rôles de semis diversifiant les assolements disponibles, il a fallu redéfinir les

conditions de prise en charge et d'abandon des rôles représentant les différentes phases de la saison de culture afin de parvenir à gérer plusieurs types d'assolements.

On peut généraliser : des difficultés apparaissent quand l'introduction d'une nouvelle variante d'un rôle modifie l'ordre de prise en charge d'autres types de rôles. Il faut alors propager des modifications au niveau des agents, ou au niveau d'autres rôles responsables de décisions de gestion ;

- définition d'un nouveau type de rôle, pour représenter des hypothèses de comportement non encore prises en compte. Il devient de plus en plus difficile de rajouter (et encore plus d'enlever) un nouveau type de rôle, ou de règle collective, au fur et à mesure que le modèle se complexifie puisqu'il y aura plus de rôles avec lesquels ce comportement est susceptible de rentrer en interaction à qui propager des modifications. Ainsi on a vu au chapitre 6 qu'il a fallu revoir entièrement la manière dont se faisait la gestion de l'irrigation en la décomposant en plusieurs types de rôles pour rajouter des modalités concernant la gestion des calendriers ou la gestion des crises.

Un dernier objectif de l'utilisation du formalisme AGR était de pouvoir rendre compte de l'interaction de niveaux d'organisation enchevêtrés. Cette interaction se résout dans la composition de rôles par les agents.

Les modes de composition de rôles sont de 2 types :

- coordination temporelle des rôles agissant simultanément : activation d'un seul événement autorisée par cycle et par entité, recours à l'envoi d'influence ;
- composition « informationnelle » : des méthodes spécifiques doivent être définies dans des agents, des rôles existants, ou de nouveaux rôles spécialement dédiés à cet effet pour mettre en œuvre l'assimilation d'informations issues de différents rôles ou distribuer des actions à différents rôles.

La mise en œuvre des règles collectives de gestion par les rôles *Manager* et la planification des irrigations qui en résulte par les rôles *CalendarManager* illustre ce type de composition.

Des objets intermédiaires (contraintes et calendrier d'irrigation) ont été utilisés pour appuyer cette composition.

La prise en charge de rôle multiples par un agent peut aussi s'étudier en terme de compatibilité des différents rôles pris en charge durant une simulation : la stratégie d'un agent peut alors être définie par la donnée des différentes variantes de rôles qu'il prendra en charge durant la simulation.

Cette possibilité de définir des stratégies par la donnée d'une combinaison de rôles illustre le gain en modularité amené par le formalisme AGR : il est aisé d'exprimer des nouvelles variantes de stratégies en définissant de nouvelles variantes de rôles. L'insertion de nouvelles variantes de rôles peut toutefois entraîner des modifications dans le comportement des agents ou des autres rôles pris en charge par les agents si les nouvelles variantes modifient les conditions de prise en charge ou l'ordre d'exécution d'autres rôles.

L'ajout de nouvelles hypothèses de comportement par l'insertion de nouvelles familles de rôles dans un modèle existant est possible mais peut s'avérer de plus en plus problématique au fur et à mesure que le modèle se complexifie, car il faut alors propager des modifications aux différents rôles pris en charge par les agents concernés.

3 Aspects opérationnels

3.1 Niveau méta : retour sur CormasAGR

Le choix d'implémenter une couche AGR sur Cormas a été motivé par les raisons suivantes :

- la plate-forme Madkit est implémentée avec un noyau AGR mais les rôles n'y sont pas destinés à contenir des définitions de comportement ;
- la plate-forme MOCA n'était pas disponible au début de la thèse, et n'offrait pas d'outils adaptés à la mise en œuvre de simulations (interface spatiale, moteur de définition de séries de simulations, sondes d'observation des résultats).

CormasAGR répond bien à nos attentes et présente des développements assez similaires à ceux de MOCA (compétences, influences), mais aussi des services supplémentaires (gestion du temps par événements). En vue d'une utilisation pour le génie logiciel, MOCA présente une implémentation du formalisme AGR incluant des primitives pour la coordination temporelle des agents plus évoluées :

- verrouillage des échanges entre agents : il n'est pas possible de faire communiquer des agents ne partageant pas un même groupe. La rigueur de la structure AGR est donc assurée, ce qui n'est pas le cas dans CormasAGR, où cette rigueur est laissée à la responsabilité du modélisateur ;
- récursivité du formalisme : les procédures d'admission et de départ d'un groupe sont gérées par des groupes spécialisés dans la gestion de groupe. Ceci permet de définir de manière modulaire des modalités d'admission.

Cette propriété prend de l'importance dans des systèmes où les dynamiques organisationnelles sont importantes et imprévisibles, ce qui n'est pas le cas de nos modèles ;

- mécanismes génériques de gestion des conflits de rôles : MOCA fournit des primitives permettant de définir différents modes de blocage des compétences accédées par un rôle. Là encore, ce type de service prend toute son importance dans un système imprévisible ;
- utilisation systématique des influences pour modéliser l'action. Ceci permet d'avoir un mécanisme de gestion de conflits de rôles évolué mais nous a paru peu adapté à des applications de modélisation où chaque événement entraîne la mise en œuvre d'un grand nombre d'interactions et l'avancée du temps doit être simulée : comment alors combiner temps d'exécution (qui avance pour chaque envoi d'influence) et temps simulé (la durée simulée d'un processus n'est pas liée au nombre d'interactions mises en jeu par ce processus) ?

Ces différents éléments ouvrent la voie à des réflexions sur des évolutions possibles de CormasAGR, ou éventuellement sur des tests de MOCA pour la simulation. Le projet de développement d'une plate-forme de modélisation multi-agent commune aux principales équipes de recherches françaises impliquées dans la simulation multi-agent (projet MIMOSA⁴⁰) est dans cette optique très prometteur, puisque MIMOSA offrira les fonctionnalités disponibles sur Cormas, MOCA et Madkit.

3.2 Impact de la gestion du temps par événements

La mise en œuvre d'une gestion du temps par événements résulte d'une volonté d'une modularité la plus importante possible : avec une gestion du temps par événements, les différents groupes et rôles peuvent travailler à leur propre échelle de temps. Mais la gestion par événements entraîne des difficultés :

⁴⁰<http://lil.univ-littoral.fr/Mimosa/>

- lors de la modélisation : il faut dater tous les événements que l'on veut programmer, et ce choix contient forcément une part d'arbitraire (pourquoi instaurer le rafraîchissement du débit tous les jours à 1.00 plutôt qu'à 15.30 ?).
Le choix d'une heure particulière peut être motivée par l'ordre dans lequel on souhaite que les événements programmés dans une journée aient lieu. Mais il faudra alors prendre garde à bien documenter ces dates afin de maîtriser l'ajout de nouveaux événements ;
- lors des simulations : durant la phase de vérification, il peut s'avérer ardu de comprendre l'occurrence d'un comportement : on peut remonter la simulation jusqu'à l'événement ayant provoqué le comportement, mais il est plus difficile d'avoir accès aux conditions qui ont provoqués la programmation de l'événement.

Gestion du temps et stabilité des modèles On peut utiliser la latitude laissée dans la datation des événements pour contourner des problèmes de coordination en faisant en sorte que certains événements n'aient jamais lieu en même temps. On a vu au chapitre 7 que ce n'est qu'ainsi que l'on a pu assurer la stabilité des modèles vis à vis de la circulation de l'eau.

On a ainsi défini 3 échelles de temps virtuel utilisables dans la modélisation :

- une échelle correspondant à la gestion de mécanismes internes comme l'envoi et le décalage d'influences qui est de l'ordre de la seconde ;
- l'échelle sur laquelle raisonnent les entités des modèles qui est de l'ordre de l'heure ;
- un échelle intermédiaire pour organiser le séquençement de certains événements afin d'éviter qu'ils soient simultanés. Cette échelle est de l'ordre de la minute.

Ces échelles de temps seraient bien sûr à remettre en question si on incluait dans le modèle des entités raisonnant sur des échelles de l'ordre de la seconde ou de la minute.

Événements et circulation de l'eau Une représentation plus rigoureuse de la circulation de l'eau demanderait sans doute à réviser l'hypothèse de propagation instantanée des demandes et des débits. Cette hypothèse, faite dans GibiDrome, est parfaitement justifiée à un pas de temps journalier mais devient plus gênante quand les pas de temps peuvent descendre à la seconde et que les débits instantanés peuvent être pris en compte par certains agents.

Une première amélioration, facile à mettre en œuvre serait de linéariser le débit entrant. Une perspective d'évolution pourrait être de rajouter des temps de propagation dans les éléments hydrauliques : au niveau des connections entre réseau et rivière d'une part (dans la réalité, les réservoirs situées à l'entrée des réseaux lissent les variations des demandes des irrigants) ; au niveau des éléments eux-même d'autre part afin de prendre en compte les temps de propagation liés à la taille du bassin.

Les chronogrammes de la figure 120 présentent ces différentes situations.

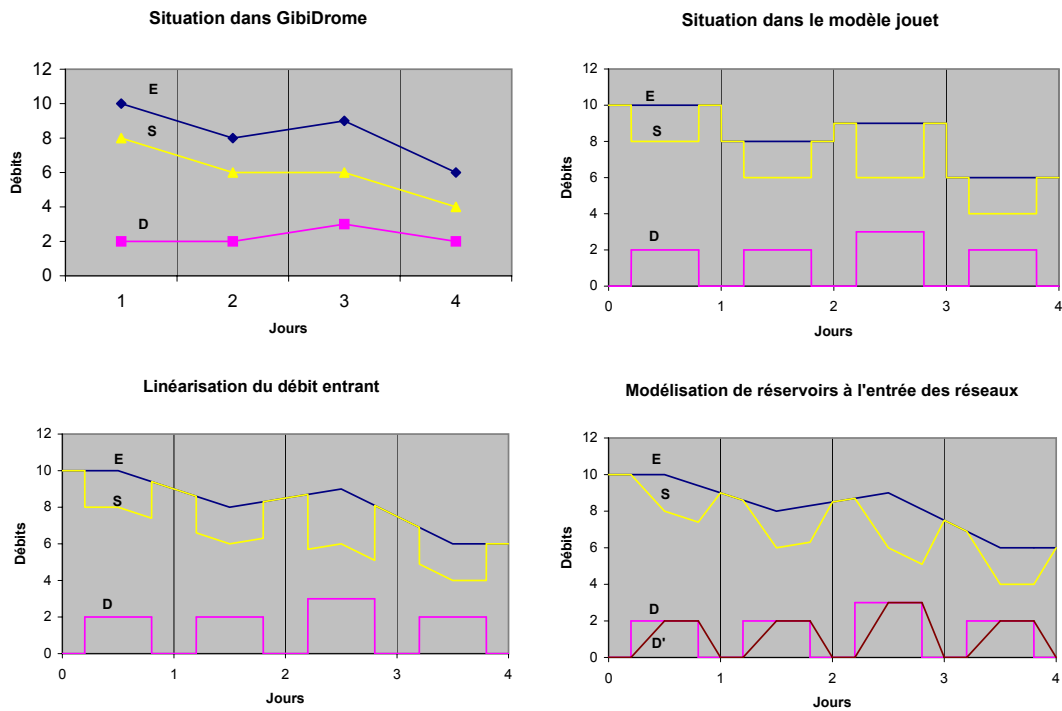


FIG. 120 – Chronogrammes illustrant la simulation du temps dans GibiDrome et dans le modèle jouet, ainsi que les améliorations envisagées.

E représente le débit entrant, **S** le débit sortant, **D** le total des demandes sur la rivière, et **D'** le total des prélèvements. Si aucun retard n'est introduit entre réseaux et rivière, les demandes sont égales aux prélèvements

3.3 Le cas particulier de la distribution de l'eau

Les contraintes qu'on s'était posées en terme de généricité ont conduit à modéliser la distribution de l'eau dans le système par une architecture de type arcs-nœuds. L'utilisation conjointe de cette architecture arcs-nœuds et d'événements pour gérer le temps dans le cas de la distribution en charge (dans les réseaux) a demandé de nombreux ajustements pour garder un niveau de généricité élevé au fur et à mesure que les modèles sont devenus plus complexes.

La modélisation de la distribution en charge de l'eau par propagation dans une structure arcs-nœuds quand toutes les prises desservies sont égales par rapport à la saturation du réseau n'est pas utile. Dans ce cas, il est suffisant d'accorder aux pompes un débit proportionnel à leurs demandes et à la capacité du système, sans représenter la propagation de la demande et du débit. Cette distribution centralisée peut alors être prise en charge par le groupe (voir 2.1.2). Tant que la structure du réseau reste simple, même dans le cas d'une distribution prenant mieux en compte l'emplacement des prises les unes par rapport aux autres, il serait sans doute plus efficace d'utiliser les équations de l'hydraulique en charge de manière centralisée, au niveau des groupes.

Si la représentation distribuée de la propagation s'avère plus avantageuse, il pourra être plus intéressant d'utiliser des « fonctions d'objectif » [Pouget *et al.*, 2003] au niveau des nœuds du système afin de répartir la demande au moment où elle se propage selon des règles et les objectifs de gestion du système. Des fonctions d'objectif pourraient facilement être mises en place par la

définition de nouveaux rôles des pompes.

3.4 Construction de scénarios et mise en œuvre de simulations

On s'intéresse pour finir à l'impact du formalisme AGR sur la construction de scénarios et la mise en œuvre de simulations.

Le chapitre 7 a permis de montrer un impact positif de la modularité amenée par le formalisme AGR sur la conception de plans d'expériences :

- lors de la phase de vérification, il est possible de représenter des situations simplifiées en définissant des rôles tests, qui permettent d'adapter le comportement de certaines entités à ces situations simplifiées sans modifier les modèles ;
- lors de la phase d'analyse de sensibilité, il est très facile de définir des scénarios variés en définissant des stratégies par des combinaisons de variantes de rôles d'une part, et en définissant des règles collectives par des variantes de contraintes d'autre part.

Enfin, lors de l'analyse des résultats de simulation, il est possible d'observer les entités selon les différents niveaux d'organisation auxquelles elles participent en sondant leurs différents rôles.

Si CormasAGR offre bien les fonctionnalités correspondant à nos objectifs d'utilisation d'AGR, certains mécanismes demanderaient à y être renforcés pour une utilisation viable. L'arrivée annoncée de la plate-forme MIMOSA qui inclut à la fois une implémentation rigoureuse du formalisme AGR et les fonctionnalités de Cormas vis à vis de la simulation est une alternative très prometteuse.

CormasAGR présente la spécificité d'offrir une gestion du temps par événements. Cette gestion du temps amène de la souplesse et renforce la modularité mais augmente la difficulté de programmation et de vérification des modèles.

Le gain en modularité amené par l'implémentation de rôles s'illustre lors de la mise en œuvre des simulations d'un modèle par la grande facilité à définir des scénarios variés par la donnée de combinaisons de rôles et de contraintes.

CONCLUSION DU CHAPITRE

Ce dernier chapitre a présenté de manière linéaire un bilan des développements de la thèse dans chacun des axes méthodologique, conceptuel et opérationnel. En guise de conclusion, on revient sur ce bilan de manière plus transversale, en se rapportant aux principes d'expressivité, de modularité et de généricité qui ont guidé ce travail.

L'expressivité mesure la propension du formalisme à fournir des modes de représentations variés. Le formalisme AGR amène bien un gain en expressivité en introduisant de nouveaux « mots » dans le vocabulaire du modélisateur (les rôles et les groupes) pour décrire niveaux d'organisation et participation des entités à ces niveaux. La méthodologie ORIGAMI permet de guider le modélisateur dans la conception d'un modèle AGR, depuis l'identification des niveaux d'organisation du système jusqu'à la description des actions élémentaires des rôles et des agents. Le diagramme swimlane en particulier permet une mise à plat de la complexité d'un système en décrivant une structure AGR. Ce gain en expressivité se traduit aussi par une augmentation du nombre d'objets à définir dans un modèle, puisqu'il faut définir un nouveau rôle pour toute intervention d'un agent dans un niveau d'organisation. Ceci a pour conséquence de contraindre le modélisateur à expliciter des hypothèses sur les modes d'interaction des entités qui n'apparaîtraient pas dans un SMA classique. Cette explicitation « forcée » peut être positive mais peut aussi amener une complexité initiale qui n'est pas forcément souhaitable (modélisation de rôles d'observation et de contrôle par exemple).

La modularité mesure la propension du formalisme à fournir des composants autonomes, ou du moins dont les interactions sont explicitées clairement. Disposer de composants modulaires permet de :

- définir facilement différents scénarios à partir d'un même modèle en jouant sur le choix de composants à instancier ;
- faciliter les modifications, qui sont localisées dans des composants ;
- favoriser la réutilisation d'éléments des modèles développés.

Structures de groupe et rôles amènent un gain de modularité qui se traduit très clairement dans la souplesse accrue de définition de scénarios à partir d'un modèle : la prise en compte d'un niveau d'organisation se traduit par l'instanciation d'un groupe, et le choix de la manière dont une entité participe à un niveau d'organisation par la spécification d'un rôle que l'entité prendra en charge. Plus globalement, c'est tout le cycle de décision d'une entité qui peut être défini par un ensemble de briques, de l'observation à l'action.

La modularité induite par les rôles est toutefois limitée par la composition qui doit être réalisée par les agents prenant en charge des rôles multiples. Ainsi, l'ajout de nouveaux types de rôles correspondant à de nouvelles hypothèses de comportement peut devenir plus difficile au fur et à mesure qu'un modèle grossit. Il faut souligner que la composition de rôles peut être effectuée par un rôle. La localisation des décisions concernant les compositions de rôles dans des rôles spécifiques est sans doute une solution pouvant encore augmenter la modularité puisque les modifications entraînées par l'ajout d'un type de rôle sont alors localisées dans ces rôles spécifiques, et qu'il devient alors possible de disposer de plusieurs types de composition de rôles.

La généricité mesure la propension du formalisme à fournir des objets qui peuvent être utilisés dans d'autres systèmes. C'est une propriété qui découle à la fois de l'expressivité du formalisme (variété des objets) et de sa modularité (interdépendance des objets). Les structures de groupe représentant la circulation de l'eau via une architecture arcs-nœuds sont génériques et directement réutilisables pour d'autres modèles de gestion de l'eau, sous réserve que leurs dynamiques soient retravaillées et simplifiées. Les structures de groupe représentant des niveaux de gestion, et les rôles de gestionnaire, d'observation, et de contrôle qui y sont associés représentent des motifs de comportement à portée générique pour tout modèle de gestion de ressource, et à respecifier sur les cas particuliers. Enfin, les structures de groupe représentant des propagations d'information sont génériques et réutilisables directement pour tout modèle de gestion de ressource.

Enfin, les questions qui ressortent de ce bilan ouvrent un certain nombre de perspectives :

- sur les aspects méthodologiques : la méthodologie ORIGAMI pourrait être complétée par :
 - des vues permettant une description plus précise des actions des rôles et des agents. Ceci permettrait d'en accroître la modularité puisque leurs entrées et sorties seraient alors documentées sans ambiguïté. Les cartouches de spécification des rôles définis par [Amiguet, 2003] pourraient être utilisés à cet effet ;
 - des diagrammes apportant une vue sur les différentes variantes de rôles ou de contraintes disponibles dans un modèle, afin de pouvoir représenter les différents scénarios disponibles dans un modèle. Peut-être de simples diagrammes de classes, utilisés dans le chapitre 6 sont-ils suffisants ;
- sur les aspects conceptuels : D'une manière générale, il serait intéressant mener une réflexion sur le contenu des groupes. En effet, les groupes sont des classes et peuvent donc définir des propriétés et des comportements. Ces possibilités n'ont pas été utilisées dans les différents modèles développés mais sont pourtant prometteuses pour représenter des comportements ou des points de vue collectifs, ou mettre en place des niveaux de coordination centralisés intermédiaires ;
- sur les aspects opérationnels : la réflexion sur la composition temporelle des rôles peut encore se poursuivre. Il serait dans cet objectif intéressant de pouvoir utiliser les mécanismes mis en place dans MOCA, en attendant la plate-forme MIMOSA ;
- sur les modèles produits : les groupes représentant la circulation de l'eau demanderaient à être retravaillés : simplification de la propagation arcs-nœuds en introduisant des fonctions d'objectifs ou en centralisant les calculs hydrauliques au niveau du groupe ; réflexion sur l'introduction de temps de propagation non nuls.

Conclusion générale

A partir d'une réflexion autour de l'identification d'unités d'analyse, d'acteurs et d'objets qui pourraient constituer une base générique pour la construction de modèles multi-agents de bassins versants irrigués, ce document a présenté un travail bâti sur la question de l'apport d'une méthode de représentation formalisée et explicite des niveaux d'organisation en tant que support de modélisation. Cette méthode se devait de répondre à un cahier des charges : (1) être suffisamment générique pour représenter des niveaux d'organisation physiques comme des niveaux d'organisation sociaux (2) pouvoir manipuler des objets organisationnels modulaires (3) pouvoir représenter des niveaux d'organisation transitoires (4) pouvoir représenter des niveaux d'organisation qui se chevauchent (5) permettre d'explicitier règles, comportements et interactions dans les niveaux d'organisation.

La formalisme Agent-Groupe-Rôle a été retenu parce qu'il répondait aux demandes du cahier des charges. La thèse s'est alors construite autour de l'adaptation de ce formalisme très général à la modélisation : (1) quels sont les développements conceptuels, opérationnels et méthodologiques à effectuer pour aboutir à un support de modélisation directement utilisable ? (2) ce support favorise-t-il l'expressivité et la modularité, et par là-même la production de modèles à portée générique ?

A partir du cas de la mise en œuvre des règles collectives de gestion de l'eau dans la Drôme, la démarche adoptée par la thèse a pu être définie : (1) spécifier la signification des concepts AGR, les implémenter dans une plate-forme de modélisation SMA, et définir une méthodologie d'utilisation (2) construire trois modèles pour explorer la question de thèse : un modèle-jouet, représentant une situation très simple afin de tester et consolider la spécification du formalisme AGR ; un second modèle reproduisant GibiDrome afin de vérifier que l'utilisation d'AGR n'introduit pas de biais dans les simulations ; un troisième modèle introduisant des comportements plus hétérogènes pour tester les possibilités de l'approche.

Les développements de la thèse ont conduit à spécifier le formalisme AGR successivement en : (1) un méta-modèle conceptuel qui redéfinit les objets représentés par les agents (choix des rôles), les groupes (niveaux d'organisation) et les rôles (registre de comportements ou points de vue dans un niveau d'organisation) dans le cadre d'une application à la modélisation (2) un méta-modèle opérationnel, qui propose une implémentation appropriée des groupes et des rôles appelée CormasAGR (3) une méthodologie appelée ORIGAMI qui définit un jeu de diagrammes permettant de définir les modèles conceptuels et opérationnels d'un système cible instanciant les méta-modèles.

La méthodologie ORIGAMI a été appliquée à la construction d'un modèle-jouet. Ce travail a permis de finaliser les développements conceptuels, opérationnels et méthodologiques autour du formalisme AGR.

Le modèle-jouet a été étendu vers un second modèle reproduisant la situation du modèle multi-agent déjà existant sur le cas du SAGE Drôme, GibiDrome. Puisque la plupart des compor-

tements étaient déjà représentés dans le modèle jouet, ces extensions ont plutôt été d'ordre organisationnel : ajout de nouveaux types de niveaux d'organisation, instanciation de nouveaux groupes.

Un troisième modèle a développé des extensions d'ordre comportemental : de nouveaux rôles ont été ajoutés pour introduire des comportements hétérogènes.

Enfin, une série de tests de vérification et d'analyse de sensibilité menée sur les 3 modèles a permis de s'assurer de la faisabilité de l'approche et de son impact sur la mise en œuvre de simulations. Ces tests ont permis de confirmer que l'approche AGR peut être adaptée à la modélisation, et de discuter certains choix et hypothèses de modélisation faits dans les modèles, notamment par rapport aux stratégies d'irrigation et à la représentation de la distribution de l'eau.

Du formalisme AGR à un support de modélisation opérationnel Le travail effectué autour du formalisme AGR en vue du développement d'un support de modélisation opérationnel a donc fourni quatre types de produits : une approche conceptuelle, une méthodologie, une plate-forme, et des modèles. Chacun de ces produits représente en fait une mise en œuvre des précédents : la méthodologie ORIGAMI permet de guider l'analyse d'un système s'appuyant sur des concepts liés aux niveaux d'organisation ; la plate-forme CormasAGR permet d'opérationnaliser le développement d'un modèle spécifié par ORIGAMI ; les modèles produits constituent un exemple résultant de l'utilisation d'ORIGAMI et de CormasAGR. Chacun de ces produits pourrait donc être réutilisé :

- on peut conserver l'idée d'une explicitation des niveaux d'organisation d'un système, de la participation des entités du système à ces niveaux d'organisation, et de l'interaction entre ces niveaux d'organisation par une composition des rôles de ces entités, éventuellement sans perspective de modélisation. Le diagramme swimlane constitue un bon support d'analyse sans forcément aller plus loin ;
- on peut utiliser tout ou une partie des diagrammes d'ORIGAMI pour appuyer une analyse de type AGR même si cette analyse débouche sur une implémentation SMA « classique » . Le diagramme swimlane est particulièrement adapté à la mise à plat de la complexité d'un système et à l'identification des différentes interactions que l'on peut en représenter. En avançant dans la méthodologie, les diagrammes deviennent de plus en plus tournés vers une implémentation AGR sans pour autant être spécifiques à la plate-forme CormasAGR, et la méthodologie pourrait donc être utilisée pour effectuer une modélisation AGR sur une autre plate-forme ;
- on peut aller jusqu'au bout de l'approche et utiliser une plate-forme centrée organisation, telle que CormasAGR ;
- enfin, si les modèles produits ne sont pas destinés à être utilisés en situation réelle, ils fournissent une ébauche d'un modèle générique de mise en œuvre de règles de gestion dans un bassin versant. En paramétrant ce modèle, il est possible de représenter d'autres bassins. Il suffit pour cela :
 - de modifier les initialisations pour changer la forme des réseaux et les connexions ;
 - de définir de nouvelles règles collectives ;
 - de définir de nouvelles règles de gestion dans les rôles **Manager**.

Apports et limites de ce support de modélisation L'examen et les simulations des modèles permet de conclure sur l'apport de l'approche AGR en termes d'expressivité, de modularité, et de généricité :

Expressivité Rôles et groupes permettent de représenter des unités d'analyse complémentaires à celle de l'individu et d'expliciter les modes d'interaction des entités dans un système. Cette explicitation a pour conséquence d'améliorer la lisibilité des modèles de systèmes contenant plusieurs types de niveaux d'organisation (ceci est particulièrement visible avec le diagramme swimlane), mais elle a aussi pour conséquence d'augmenter le nombre d'objets à définir dans un modèle et donc d'amener une complexification initiale dans le travail de modélisation. Le choix d'utiliser une modélisation de type AGR dépend donc des objectifs de la modélisation : si le but est d'expliciter des hypothèses et structurer l'analyse du système, le formalisme AGR est un bon candidat, si le but est de construire un modèle simple des usages d'une ressource, l'approche SMA classique reste sans doute préférable.

Modularité Groupes et rôles amènent un gain de modularité qui se traduit très clairement dans la souplesse accrue de définition de scénarios à partir d'un modèle : la prise en compte d'un niveau d'organisation se traduit par l'instanciation d'un groupe, et le choix de la manière dont une entité participe un niveau d'organisation par la spécification d'un rôle que l'entité prendra en charge. Plus globalement, c'est tout le cycle de décision d'une entité qui peut être défini par un ensemble de briques, de l'observation à l'action.

La modularité induite par les rôles est toutefois limitée par la composition qui doit être réalisée par des agents prenant en charge des rôles multiples. Ainsi, l'ajout de nouveaux types de rôles correspondant à de nouvelles hypothèses de comportement peut devenir plus difficile au fur et à mesure qu'un modèle grossit. Il faut souligner que la composition de rôles peut être effectuée par un rôle. La localisation des décisions concernant les compositions de rôles dans des rôles spécialisés est sans doute une solution pouvant encore augmenter la modularité puisque les modifications entraînées par l'ajout d'un type de rôle sont alors localisées dans ces rôles spécialisés, et qu'il devient alors possible de disposer de plusieurs types de composition de rôles.

Généricité Enfin, des éléments génériques émergent des 3 modèles construits pour tester le formalisme :

- la distribution de l'eau est décrite dans des structures de groupe représentant la propagation de demandes et de débits dans une architecture arcs-nœuds. Ces structures de groupe sont suffisamment génériques pour être réutilisées directement dans d'autres modèles de bassins versants puisqu'il suffit d'instancier les rôles arcs sur la topologie voulue. La description des dynamiques hydrauliques mériterait cependant d'être retravaillée et simplifiée : la conjonction de l'architecture arcs-nœuds et de la gestion du temps par événements telle qu'elle a été traitée dans le modèle est une source importante d'erreurs et d'instabilités dans le modèle, et sans doute aurait-il été avantageux de revenir à des équations d'hydraulique classiques centralisées au niveau des groupes ;
- les décisions concernant l'usage des ressources sont décrites dans des structures de groupe représentant des niveaux de gestion. Ces groupes définissent des motifs de comportements génériques pour toute gestion de ressources entre des rôles de gestionnaire, des rôles d'usager, des rôles d'observation, et des objets contrainte, qui peuvent être redéfinis pour chaque cas particulier ;
- la propagation d'information a été représentée dans des structure de groupe liste de diffusion ou voisinage réutilisables directement pour d'autres modèles de gestion de ressources.

L'approche de modélisation et la généricité des éléments produits doit toutefois à être mise à l'épreuve d'autres applications. Ceci permettra d'affiner la distinction entre éléments génériques « universels » et éléments spécifiques à des domaines d'application particuliers.

Une utilisation en situation d'intervention par exemple ouvre des questions liées à l'interface avec les acteurs. Même si le caractère AGR d'un modèle n'a pas à transparaître dans son usage avec les acteurs, une réflexion peut être menée sur la meilleure manière d'explicitier le contenu du modèle.

Perspectives sur l'utilisation de l'approche pour des modèles de mise en œuvre de règles de gestion de l'eau Si l'on considère les modèles produits comme des ébauches d'un modèle générique s'intéressant à la mise en œuvre de règles de gestion de l'eau dans un bassin versant irrigué, on peut dresser une liste de questions à creuser et d'améliorations à apporter.

Expérimentations sur les modèles existants Avant de poursuivre le développement des modèles, de nouveaux tests de sensibilité seraient à mener afin de mieux discriminer les paramètres existants : assolements et stratégies de dosage des irrigations, capacités des exploitations et stratégies de planification des irrigations dans la journée...

Une autre voie de questionnement sur les modèles existants pourrait s'ouvrir avec l'exploration de configurations spatiales en se concentrant sur l'impact des réseaux de voisinage sur le choix de stratégies ou de ressources : introduction de ruptures dans la connexité des réseaux, distribution des assolements et des stratégies de manière non homogène.

Planification des irrigations Le test de sensibilité portant sur l'influence du mode de planification des irrigations s'est avéré peu concluant parce que les trois modes de planification de l'irrigation implémentés sont trop semblables : les irrigations commencent toujours en même temps et les réseaux sont donc toujours saturés en début de journée. Il faudrait donc pouvoir faire en sorte que les irrigants qui le peuvent puissent décaler leurs irrigations à d'autres heures de la journée. Cette situation s'observe sur le terrain, où des irrigants en bout de ligne préfèrent programmer leurs irrigations aux heures creuses, quand ils sont sûrs que le réseau n'est pas saturé. Cette possibilité de gérer la planification d'une manière plus souple et de faire des reports permettrait de plus de créer des comportements de crise plus variés et de pouvoir représenter des règles collectives où le nombre de jours d'arrêts est plus important, comme c'est le cas sur le terrain.

Cependant l'introduction de cette nouvelle marge de manœuvre demandera de déterminer de nouvelles hypothèses de modélisation :

- comment déterminer les plages d'irrigation : pré-déterminer des plages fixes (irrigation de jour et irrigation de nuit) ou introduire un aléa sur les heures de lancement de l'irrigation à l'intérieur de certaines plages ?
- comment attribuer ces plages d'irrigation : procéder à une initialisation aléatoire, déterminer un taux de plages d'irrigations idéales, donner à tous les irrigants une plage d'irrigation initiale idéale et introduire des comportements d'apprentissages (report des irrigations après des expériences de saturation) selon des caractéristiques d'aversion au risque ?

Ressources multiples dans une exploitation Un objectif initial de l'utilisation du formalisme AGR était de permettre de rendre compte de la superposition de niveaux d'organisation, et notamment de pouvoir représenter des exploitations munies de ressources multiples de différents types (prise de réseaux différents, ou une prise réseau et une prise individuelle).

Le développement des modèles s'étant axé plutôt sur la diversification des comportements individuels, cet objectif n'a pas été abordé, et les rôles **CalendarManager** ne sont conçus pour gérer qu'un seul accès. Une manière d'y arriver serait de faire prendre en charge à un agent devant

gérer des ressources multiples un rôle **CalendarManager** pour chaque accès, ainsi qu'un rôle qui décide de la répartition entre les accès (**ManagerIrri**, ou un autre rôle spécialement créé pour ça si on décide de créer différents modes de répartition entre les accès).

Cette solution implique que de nouveaux types de rôles soient créés pour chaque nouveau comportement introduit, et que plus le modèle évolue, plus les agents composent de rôles. Ceci permet de conserver la modularité et de pouvoir définir des scénarios en jouant sur tous les comportements, mais ces scénarios deviennent de plus en plus laborieux à définir ! Est-ce un effet pervers ou une mauvaise manière d'utiliser AGR ?

Respect des règles collectives Les règles collectives et leur mise en œuvre ont toujours été différenciées dans les modèles, il a toujours été supposé que les agents respectaient les contraintes imposées par ces règles collectives. Il serait pourtant intéressant de pouvoir représenter des comportements de désobéissance. La décision de respecter ou pas une règle collective dépend à la fois de la pression sociale ou du contrôle exercé sur le respect de cette règle, et de caractéristiques plus personnelles de l'agriculteur : préjudice amené par la contrainte, aversion au risque...

On pourrait utiliser les rôles **User**, qui sont définis par les niveaux collectifs pour qualifier pression sociale et contrôle, les rôles **CalendarManager** qui savent faire des calculs de calendrier pour qualifier les préjudices amenés par la contrainte, et faire prendre la décision par le rôle **ManagerIrri** selon une caractéristique d'aversion au risque propre à l'entité (déjà utilisée pour décaler les irrigations).

Représentation des processus hydrauliques La représentation des processus hydrauliques dans les modèles pose la question de la représentation simplifiée et discrète d'un processus physique continu. Si le choix d'une représentation topologique par une architecture arcs-nœuds orientée se justifie, les règles simples de propagation des demandes et du débit (propagation instantanée, conservation aux nœuds) pourraient être raffinées en modifiant les comportements des rôles des groupes concernés : prise en compte dans les branches de caractéristiques physiques telles que les singularités et les pertes de charge dans les conduites ; prise en compte dans les nœuds de règles de gestion et de distribution des demandes et des débits dans le réseau (fonctions d'objectifs) ; introduction de temps de propagation dans les branches.

Toutefois, des solutions techniques de simulation de réseaux sous pression existent déjà [Pouget *et al.*, 2003]. Si l'accent doit être mis sur la qualité du modèle hydraulique, il faudrait au moins réutiliser des éléments des modèles existants. On pourrait aussi réfléchir à des formes de couplage, sur le modèle de [Fianyo and Boivin, 2000], en mettant à profit le formalisme AGR.

Perspectives conceptuelles L'examen des modèles produits pose des perspectives quant à une utilisation plus importante des groupes pour représenter des points de vue collectifs ou des niveaux de coordination intermédiaires. D'autre part, si l'exploration d'applications d'AGR à la modélisation devait se poursuivre, il serait intéressant d'étudier plus spécifiquement son adéquation à représenter des réseaux sociaux et des structures spatiales.

Comportements et propriétés des groupes Des pistes de réflexions s'ouvrent autour de l'expression de propriétés et de comportements au niveau des groupes, voire de la prise en charge de rôles par des groupes. Cette utilisation des groupes pourrait servir :

- à l'expression de propriétés ou de comportements collectifs (par exemple fournir des données agrégées pour figurer une photo aérienne) ;

- à la représentation distribuée de processus physiques, accessibles seulement d'un point de vue agrégé aux agents sociaux (par exemple représenter individuellement les plants de maïs alors que l'exploitant n'observe que des indices globaux de la parcelle) ;
- à définir des niveaux de coordination intermédiaires, le groupe prenant en charge de manière centralisée la représentation de certains processus (alternative par exemple à une propagation arcs-nœuds complètement distribuée).

Niveaux informels et dynamiques organisationnelles La capacité d'AGR à représenter des dynamiques organisationnelles a très peu été utilisée dans les différents modèles produits. Utiliser cette capacité peut toutefois être prometteur pour représenter l'émergence de niveaux d'organisation (pas forcément informels d'ailleurs), les théories des réseaux sociaux [Amblard, 1999] permettant de déterminer les conditions d'émergence de ces niveaux. Une telle orientation permettrait de mettre en question la manière dont les réseaux - formels ou informels - dans lesquels sont pris les acteurs peut influencer la mise en œuvre de règles de gestion collective d'une ressource.

Les réseaux sociaux étudient la structure constituée de l'ensemble des relations entre les acteurs d'un système. Dans un réseau social, les relations sont définies à partir des interactions existant entre les acteurs et portent une valeur ou un ensemble de valeurs (amitié, parenté, lien hiérarchique...). Des méthodes issues de la théorie des graphes sont alors utilisées pour étudier l'influence des réseaux sur la décision.

Il est possible de représenter ces structures avec AGR. Les réseaux seraient des groupes où les agents viendraient prendre un rôle « acteur d'un réseau » . Ces rôles seraient reliés par des objets relations, définis spécialement pour ces groupes. AGR semble alors particulièrement adapté pour représenter les différents plans du réseau d'un système. Reste le problème de leur définition initiale et de leur maintenance : comment réaliser la projection des interactions entre rôles vers des relations dans le réseau ? Encore une fois, ce pourrait être une compétence des groupes, qui à la demande pourraient fournir une qualification des relations entre leurs membres.

Représentation des aspects spatiaux La prise en compte du spatial a été à peine abordée dans les modèles produits : de manière très implicite dans l'architecture arcs-nœuds qui décrit les réseaux hydrauliques, et de manière un peu moins implicite dans les réseaux de voisinage. Dans les deux cas, le spatial est abordé sous l'angle de la topologie : ce sont des réseaux de relations qui sont décrits, sans qu'il soit nécessaire de se ramener à un référentiel situé. Cette exclusion du spatial n'est bien sûr pas tenable dans la modélisation pour la gestion de ressources naturelles, et l'approche AGR ne peut continuer à se développer sans qu'une réflexion soit menée sur la prise en compte du spatial. Ainsi, il devient indispensable de disposer d'un référentiel spatial commun si l'on veut continuer à travailler sur l'influence mutuelle de réseaux de voisinage et de répartitions non homogènes des assolements, ou inclure la contrainte d'isolement des cultures de semence par exemple.

La solution qui a été adoptée dans CormasAGR pour fournir une représentation spatiale des modèles est de conserver la grille spatiale hors de la structure AGR, et d'en lier des cellules ou des agrégats de cellule à des agents du modèle AGR. Une piste de réflexion pour mieux intégrer l'espace dans une représentation AGR serait de disposer de plusieurs grilles qui permettent de représenter des points de vue sur des groupes ou des ensembles de groupes.

Ces pistes de réflexion ne touchent toutefois que des problèmes de visualisation, sans encore aborder fondamentalement la représentation et la construction des dynamiques spatiales. Il faudrait pour cela se servir d'AGR pour étudier la manière dont l'organisation de l'espace interagit

avec les activités des acteurs et vice-versa. Plus globalement, on peut alors s'interroger sur le statut de l'organisation de l'espace au sein des autres niveaux d'organisation d'un modèle :

- l'organisation de l'espace constitue-t-elle un niveau d'organisation comme les autres ? Dans ce cas là, les objets et relations d'ordre spatial pourraient être représentés au sein d'une structure de groupe spéciale ;
- doit-on considérer que l'organisation de l'espace est située à un niveau structurel ? Dans ce cas là, les objets et relations d'ordre spatial pourraient être représentés au niveau des agents ;
- une piste plus intéressante est sans doute de conserver au niveau des agents les données permettant de situer les objets spatiaux dans un référentiel spatial unique, et d'utiliser des groupes instances de structures de groupes dédiées aux relations et dynamiques spatiales pour représenter différents points de vue sur l'espace.

Modélisation participative L'explicitation d'hypothèses amenée par les rôles pourrait s'avérer utile dans le cadre d'une application en modélisation participative, dans l'esprit du projet Aquabot, en cours au Cemagref [[Poujol, 2004](#)], en offrant la possibilité de fournir différentes vues, plus ou moins agrégées d'un système : sur le système vu « de loin », la structure AGR n'apparaît pas, mais les rôles d'un agent peuvent apparaître en cliquant sur l'agent, et le système être représenté niveau par niveau. AGR ne serait que le noyau de modélisation et un important travail d'interface et de modélisation graphique serait à fournir.

La poursuite d'une réflexion de l'application d'AGR à la modélisation devrait passer par la mobilisation de l'approche sur d'autres questions de gestion de l'environnement : gestion de l'espace, gestion de conflits d'usage, gestion des territoires... Le développement de modèles AGR dans d'autres types d'applications que la gestion de l'eau (ou dans d'autres cas de gestion de l'eau) pourrait alors permettre de poursuivre l'identification et la définition d'objets génériques - « universels » ou propres à des domaines particuliers, et de générer des bibliothèques de groupes et de rôles réutilisables.

Bibliographie

- [Allain, 1999] Sophie Allain, editor. *Etude de cas "Vallée de la Drôme"*. Irri-Mieux. Gestion collective d'une ressource commune, des "droits à l'eau" à la gestion collective de l'eau. Anda, 1999. 96
- [Allain, 2001] Sophie Allain. Les schéma d'aménagement et de gestion des eaux (sage) : une procédure innovante de planification participative de bassin. *Geocarrefour*, 76(3) :199–210, 2001. 15, 28
- [Allen *et al.*, 1998] Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Dirk Raes, and Martin Smith. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56, FAO, 1998. 372
- [Amblard, 1999] Frédéric Amblard. *Modèles multi-agents pour la décision collective*. DEA d'informatique de l'université montpellier II, 1999. 64, 310
- [Amiguet, 2003] Mathieu Amiguet. *MOCA : Un modèle componentiel dynamique pour les systèmes multi-agents organisationnels*. Thèse de doctorat en informatique, Université de Neuchâtel, Suisse, 2003. 54, 64, 65, 67, 111, 113, 147, 284, 303
- [Arlabosse *et al.*, 2004] François Arlabosse, Marie-Pierre Gleizes, and Michel Occello. Méthodes de conception. In OFTA, editor, *Systèmes multi-agents*, volume 29 of *Arago*, pages 137–172. Tec&Doc, Paris, 2004. 47, 280
- [Arnstein, 1969] Sherry R. Arnstein. A ladder of citizen participation. *Journal of the American Planning Association*, 35(4) :216–224, 1969. 16
- [Attonaty and Leroy, 1997] Jean-Marie Attonaty and Pascal Leroy. Gestion de l'irrigation à l'échelle de l'exploitation agricole. In *Colloque INRA : AIP Eau*, volume 2 of *Le programme de valorisation et protection des ressources en eau*, pages 1–60, Paris, 1997. 20
- [Babin and Bertrand, 1998] Didier Babin and Alain Bertrand. Comment gérer le pluralisme : subsidiarité et médiation patrimoniale. *Unasylva*, 49(194), 1998. 16
- [Baeijs and Demazeau, 1996] Christof Baeijs and Yves Demazeau. Les organisations dans les systèmes multi-agents. In *4èmes journées du GDR PRC IA*, Toulouse, 1996. 48
- [Bakam Tchiakam, 2003] Innocent Bakam Tchiakam. *Des systèmes multi-agents aux réseaux de Pétri pour la gestion des ressources naturelles : le cas de la faune à l'Est-Cameroun*. Thèse de doctorat en informatique, Faculté des sciences, Yaounde I, Cameroun, 2003. 23
- [Balci, 1998] Osman Balci. Verification, validation and accreditation. In D.J. Medeiros, E.F. Watson, J.S. Carson, and M.S. Manivannan, editors, *Winter Simulation Conference*, 1998. 222
- [Barreteau and Bousquet, 1999] Olivier Barreteau and François. Bousquet. Jeux de rôles et validation de systèmes multi-agents. In *JFIADSMA '99*, Ingénierie des systèmes multi-agents, pages 67–80. Hermès, 1999. 27

- [Barreteau and Bousquet, 2000] Olivier Barreteau and François Bousquet. SHADOC : a multi-agent model to tackle viability of irrigated systems. *Annals of operations research*, (94) :139–162, 2000. 35, 36
- [Barreteau et al., 2001] Olivier Barreteau, François Bousquet, and Jean-Marie Attonaty. Role-playing games for opening the black box of multi-agent systems : method and lessons of its application to Senegal River Valley irrigated systems. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation [online]*, 4(2) :<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/4/2/5.html>, 2001. 22
- [Barreteau et al., 2003] Olivier Barreteau, Patrice Garin, Alexandre Dumontier, Géraldine Abrami, and Flavie Cernesson. Agent based facilitation of water allocation : case study in drome river valley. *Group Decision and Negotiation*, 12(5) :441–461, 2003. xvi, 22, 35, 36, 96, 99, 147, 260, 371, 376
- [Barreteau et al., 2004] Olivier Barreteau, Géraldine Abrami, and Saliha Chennit. Combining various time scales though joint use of agent based modelling and role playing games : application to a river basin management game. In *35th Annual Conference of the International Simulation And Gaming Association (ISAGA)*, Munich, Germany, 2004. 100
- [Barreteau, 1998] Olivier Barreteau. *Un système multi-agent pour explorer la viabilité des systèmes irrigués : dynamique des interactions et modes d’organisation*. Thèse de doctorat en sciences de l’eau, Engref Montpellier, 1998. 20, 22, 23, 54, 55
- [Becu et al., 2003] Nicolas Becu, Pascal Perez, Andrew Walker, Olivier Barreteau, and Christophe Le Page. Agent based simulation of a small catchment water management in northern thailand. description of the catchscape model. *Ecological Modelling*, 170 :319–331, 2003. 22, 35, 36
- [Berger, 2001] Thomas Berger. Agent-based spatial models applied to agriculture : a simulation tool for technology diffusion, resource use changes and policy analysis. *Agricultural Economics*, 25(2-3) :245–260, 2001. Article. 22
- [Bonin and Le Page, 2000] Muriel Bonin and Christophe Le Page. SIG, SMA, connaissances et gestion de l’espace : le cas du Massif de Tanargue. *Géomatique*, 10 :131–155, 2000. 22
- [Bouleau, 2001] Gabrielle Bouleau. Acteurs et circuits financiers de l’eau en France. Document pédagogique, ENGREF, Montpellier, 2001. 1, 29
- [Bousquet and Gautier, 1998] François Bousquet and Denis Gautier. Comparaison de deux approches de modélisation des dynamiques spatiales par simulation multi-agents : les approches spatiales et acteurs. *CyberGéo*, (89), 1998. 25
- [Bousquet and Le Page, 2004] François Bousquet and Christophe Le Page. Multi-agent simulations and ecosystem management : a review. *Ecological Modelling*, 176(3-4) :313–332, 2004. 20, 23
- [Bousquet et al., 1998] François Bousquet, Innocent Bakam, Hubert Proton, and Christophe Le Page. Cormas : common-pool resources and multi-agent systems. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, (1416) :826–838, 1998. 111, 114
- [Bousquet et al., 2002] François Bousquet, Olivier Barreteau, Patrick d’Aquino, Michel Etienne, Stanislas Boissau, Sigried Aubert, Christophe Le Page, Dider Babin, and Jean-Christophe Castella. Multi-agent systems and role games : collective learning processes for ecosystem management. In Marco A. Janssen, editor, *Complexity and ecosystem management*. Edward Elgar, 2002. 17
- [Bousquet, 2001] François Bousquet. *Modélisation d’accompagnement et gestion des ressources renouvelables*. Mémoire pour l’habilitation à diriger les recherches, Université Lyon 1, 2001. 19, 21, 40

-
- [Bradbury, 2002] Roger Bradbury. Futures, predictions and other foolishness. In Marco A. Janssen, editor, *Complexity and ecosystem management*. Edward Elgar, 2002. 24
- [Camacho, 2002] Juan Manuel Gonzalez Camacho. Impacts attendus du changement climatique sur l'agriculture irriguée dans la basse vallée de la drôme. Working paper - série irrigation, Cemagref, 2002. 150, 371, 373
- [Campolongo *et al.*, 2000] Francesca Campolongo, Andrea Saltelli, Tine Sorensen, and Stefano Tarantola. Hitchhiker's guide to sensitivity analysis. In A Saltelli, K. Chan, and E.M Scott, editors, *Sensitivity Analysis*, Wiley series in probability and statistics, pages 15–47. John Wiley and sons, ltd, 2000. 272, 406, 407
- [Caquard, 2001] Sébastien Caquard. *Des cartes multimédia dans le débat public - Pour une nouvelle conception de la cartographie appliquée à la gestion de l'eau*. Thèse de doctorat en géographie, Université de Saint-Etienne, 2001. 18
- [Carpenter *et al.*, 1999] Stephen Carpenter, William Brock, and Paul Hanson. Ecological and social dynamics in simple models of ecosystem management. *Conservation Ecology [online]*, 3(2) :<http://www.consecol.org/vol3/iss2/art4>, 1999. 19, 20
- [Castelfranchi *et al.*, 1999] Cristiano Castelfranchi, Frank Dignum, Catholijn M. Jonker, and Jan Treur. Deliberate normative agents : Principles and architecture. In *Sixth International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages (ATAL-99)*, Orlando, FL, 1999. 52, 55, 56
- [Castelfranchi, 2001] Cristiano Castelfranchi. The theory of social functions : challenges for computational social science and multi-agent learning. *Cognitive Systems Research*, 2(1) :5–38, 2001. 47, 61
- [Chocat, 1997] Bernard Chocat, editor. *Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement*. Tec&Doc, 1997. 27
- [Collentine *et al.*, 2002] Dennis Collentine, Asa Forsman, Victor Galaz, Sofia Kallner Bastviken, and Annika Stahl-Delbanco. CATCH : decision support for stakeholders in catchment areas. *Water Policy*, 4(5) :447–463, 2002. 17
- [Collinot *et al.*, 1996] Anne Collinot, Alexis Drogoul, and Philippe Benhamou. Agent oriented design of a soccer robot team. In *ICMAS'96*, Kyoto, Japan, 1996. 52, 55
- [Costanza and Ruth, 1998] Robert Costanza and Matthias Ruth. Using dynamic modeling to scope environmental problems and build consensus. *Environmental Management*, 22(2) :183–195, 1998. 17
- [Courdier *et al.*, 2002] Rémy Courdier, François Guerrin, Fenintsoa Hary Andriamasinoro, and Jean-Maïe Paillat. Agent-based simulation of complex systems : application to collective management of animal wastes. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation [online]*, 5(3) :<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/5/3/4.html>, 2002. 22, 35, 36, 54, 55, 56
- [Deadman, 1999] Peter J. Deadman. Modelling individual behaviour and group performance in an intelligent agent-based simulation of the tragedy of the commons. *Journal of Environmental Management*, 56(3) :159–172, 1999. 22
- [Demazeau, 1995] Yves Demazeau. From interactions to collective behaviour in agent-based systems. In *1995 European Conference on Cognitive Sciences*, Saint-Malo, France., 1995. 44, 54, 55
- [Doorenbos and Kassam, 1979] Jan Doorenbos and Amir H Kassam. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper 33, FAO, 1979. 372

- [Doran, 2001] Jim Doran. Intervening to achieve co-operative ecosystem management : towards an agent based model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation [online]*, 4(2) :<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/4/2/4.html>, 2001. 19, 20, 22, 23, 25, 53, 55
- [Drogoul, 1993] Alexis Drogoul. *De la simulation multi-agents à la résolution collective de problèmes*. Thèse de doctorat en informatique, Université Paris VI, 1993. 24, 47
- [Ducrot et al., 2004] Raphaëlle Ducrot, Christophe Le Page, Pierre Bommel, and Marcel Kuper. Articulating land and water dynamics with urbanization : an attempt to model natural resources management at the urban edge. *Computers, Environment and Urban Systems*, 28(1-2) :85–106, 2004. 22, 35
- [Durand, 1996] Benoit Durand. *Simulation multi-agent et épidémiologie opérationnelle. Etude d'épizooties de fièvre aphteuse*. Thèse de doctorat en informatique, UFR de Sciences de Caen, 1996. xix, 63, 64, 65, 124, 125, 284
- [Edmonds and Moss, 2004] Bruce Edmonds and Scott Moss. From KISS to KIDS - an “anti-simplistic” modelling approach. In *Joint Workshop on Multi-Agent and Multi-Agent-Based Simulation*, New York City, USA, 2004. 292
- [Edmonds and Wallis, 2003] Bruce Edmonds and Steve Wallis. Towards an ideal social simulation language. In Jaime Simão Sichman, François Bousquet, and Paul Davidsson, editors, *Multi-Agent-Based Simulation, Third International Workshop, MABS 2002*, volume 2581 of *Lecture notes in computer science*, pages 105–154, Bologna, Italy, 2003. Springer. 26
- [Edmonds, 2001] Bruce Edmonds. The use of models - making MABS more informative. In S Moss and P. Davidsson, editors, *MABS 2000*, volume 1979 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, pages 15–32, Boston, USA, 2001. 27, 124
- [Epstein and Axtell, 1996] Joshua M. Epstein and Robert L. Axtell. *Growing Artificial Societies. Social Science From the Bottom Up*. Brookings Institution Press MIT Press, 1996. 63
- [Fan et al., 2001] James Fan, Ken Barker, Bruce Porter, and Peter Clark. Representing roles and purpose. In *First International Conference on Knowledge Capture*, 2001. 109
- [Ferber and Gutknecht, 1998] Jacques Ferber and Olivier Gutknecht. A meta-model for the analysis and design of organizations in multi-agents systems. In Y. Demazeau, editor, *ICMAS'98*, pages 128–135, Paris, 1998. IEEE Computer Society. 54, 55, 56, 57, 59, 111
- [Ferber et al., 2003] Jacques Ferber, Olivier Gutknecht, and Fabien Michel. Agent/group/roles : Simulating with organization. In Jean-Pierre Muller and Martina-M. Sidel, editors, *4th workshop on agent-based simulation*, pages 34–39, Montpellier, France, 2003. SCS. xiv, 56, 57, 62, 63, 68, 110, 125, 141, 142, 147
- [Ferber, 1995] Jacques Ferber. *Les systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective*. InterEditions, 1995. 24, 45, 182
- [Ferrand and Deffluent, 1998] Nils Ferrand and Guillaume Deffluent. Trois apports potentiels des approches “multi-agents” pour l’aide la décision publique. In *Gestion des territoires ruraux - Connaissances et méthodes pour l’aide à la décision publique*, pages 373–395, Clermont-Ferrand, France, 1998. Cemagref Editions. 21
- [Ferrand, 1996] Nils Ferrand. De l’apport potentiel de la sociologie pour l’ingénierie des systèmes sociaux artificiels. In *5emes Journées de Rochebrune*. ENST Paris, 1996. 47
- [Ferrand, 1997] Nils Ferrand. *Modèles multi-agents pour l’aide à la décision et la négociation en aménagement du territoire*. Thèse de doctorat en informatique, Université Joseph Fourier de Grenoble, 1997. 45

-
- [Feuillette *et al.*, 2003] Sarah Feuillette, François Bousquet, and Patrick Le Goulven. Sinuse : A multi-agent model to negotiate water demand management on a free access water table. *Environmental Modelling and Software*, 18(5) :413–427, 2003. 35, 36
- [Feuillette, 2001] Sarah Feuillette. *Vers une gestion de la demande sur une nappe en accès libre : exploration des interactions ressources usages par les systèmes multi-agents. Application à la nappe de Keirouan, Tunisie Centrale*. Thèse de doctorat en sciences de l’eau, Université Montpellier II, 2001. 22, 23, 30
- [Fianyo and Boivin, 2000] Edem Fianyo and Pascal Boivin. Coupling dynamical physical processes with agents. In *Group Decision and Negotiation*, Glasgow, Scotland, UK, 2000. 119, 309
- [Fianyo *et al.*, 1998] Edem Fianyo, Jean-Pierre Treuil, Edith Perrier, and Yves Demazeau. Multi-agent architecture integrating heterogeneous models of dynamical processes : The representation of time. In Sichman, Conte, and Gilbert, editors, *Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*, volume 1534 of *LNAI*, pages 226–236. Springer-Verlag, Berlin, 1998. 20
- [Fowler, 1997] Martin Fowler. Dealing with roles. In *4th Annual Conference on the Pattern Languages of Programs*, Washington University Technical Report 97-34, Monticello, Illinois, USA, 1997. 109
- [Fox, 1981] Mark S. Fox. An organizational view of distributed systems. *IEEE Transactions on Systems, man and cybernetics*, 11 :70–8., 1981. 47
- [Franchesquin *et al.*, 2003] Nathalie Franchesquin, Bernard Espinasse, and Julien Serment. Co-ordination for contract realisation in the hydraulic management of the camargue. In Jean-Pierre Muller and Martina-M. Sidel, editors, *4th workshop on agent-based simulation*, pages 40–48, Montpellier, France, 2003. SCS. 22, 35, 36
- [Franchesquin, 2001] Nathalie Franchesquin. *Modélisation et simulation multi-agents d’écosystèmes anthropisés : une application à la gestion hydraulique en Grande Camargue*. Thèse de doctorat en informatique, Université Aix-Marseille III, 2001. 23
- [Garin *et al.*, 2000] Patrice Garin, Marielle Montginoul, and Benoît Rossignol. Une résolution des conflits d’usages : de la gestion administrative à une gestion concertée des ressources en eau. Working Paper 00-08, Cemagref - IRMO, 2000. 16, 29
- [Ghiotti, 2001] Stéphane Ghiotti. *La place du bassin versant dans les dynamiques contemporaines du développement territorial. Les limites d’une évidence. Approches comparées en Ardèche et dans les Hautes-Alpes*. Thèse de doctorat en géographie, Université de Grenoble I, 2001. 17
- [Gibson *et al.*, 2000] Clark C. Gibson, Elinor Ostrom, and T. K. Ahn. The concept of scale and the human dimensions of global change : a survey. *Ecological Economics*, 32(2) :217–239, 2000. 37
- [Gilbert and Troitzsch, 1999] Nigel Gilbert and Klaus G. Troitzsch. *Simulation for the social scientist*. Open University Press, Buckingham, 1999. 223, 226
- [Gleizes, 1999] M.C. Gleizes, editor. *Irri-Mieux. Gestion collective d’une ressource commune, des "droits à l’eau" à la gestion collective de l’eau. Synthèse*. Anda, 1999. 30, 31
- [Gottlob *et al.*, 1996] Georg Gottlob, Michael Schrefl, and Brigitte Röck. Extending object-oriented systems with roles. *ACM Transactions on Information Systems*, 14(3) :268–296, 1996. 109

- [Grimm, 1999] Volker Grimm. Ten years of individual-based modelling in ecology : what have we learned and what could we learn in the future ? *Ecological modelling*, (115) :129–148, 1999. 26
- [Guerrin, 2000] François Guerrin. Simulation of actions to help animal wastes management at the farm level. In *MCPL'2000, IFAC / IFIP / IEEE 2nd Conf. on Management and Control of Production and Logistics*, Grenoble (F), 2000. 22
- [Guessoum, 1996] Zahia Guessoum. *Un environnement opérationnel de conception et de réalisation de systèmes multi-agents*. Thèse de doctorat en informatique, Université Pierre et Marie Curie, LAFORIA-IBP, Paris, 1996. 119
- [Gutknecht and Ferber, 1999] Olivier Gutknecht and Jacques Ferber. Vers une méthodologie organisationnelle de conception de systemes multi-agents. In M.P. Gleizes and P. Marcenac, editors, *JFIADSMA'99*, pages 93–104, La Réunion, 1999. Hermes Science. 125
- [Gutknecht, 2001] Olivier Gutknecht. *Proposition d'un modèle organisationnel générique de systèmes multi-agent et examen de ses conséquences formelles, implémentatoires et méthodologiques*. Thèse de doctorat en informatique, Université Montpellier II, 2001. 57, 63, 113
- [Hannoun et al., 2000] Mahdi Hannoun, Olivier Boissier, and Jaime Simão Sichman. MOISE : An organizational model for multi-agent systems. In J. S. Sichman M. C. Monard, editor, *Advances in Artificial Intelligence*, volume 1952 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, pages 152–161. Springer-Verlag, Berlin, DE, 2000. 109
- [Haradji et al., 2004] Yvon Haradji, Nils Ferrand, and Haijang Li. Relations à l'utilisateur et nouveaux usages. In OFTA, editor, *Systèmes multi-agents*, volume 29 of *Arago*, pages 215–260. Tec&Doc, Paris, 2004. 23
- [Hare et al., 2001] Matt Hare, Nigel Gilbert, Davide Medugno, Tasia Asakawa, Johannes Heeb, and Claudia Pahl-Wostl. The development of an internet forum for long-term participatory group learning about problems and solutions to sustainable urban water supply management. In L.M. Hilty and P.W. Gilgen, editors, *Sustainability in the Information Society, 15th International Symposium Informatics for Environmental Protection, Part 2 : Methods/Workshop Papers Metropolis*, pages pp743–750. Verlag, 2001. 17
- [Hübner et al., 2002] Jomi Fred Hübner, Jaime Simão Sichman, and Olivier Boissier. Spécification structurelle, fonctionnelle et déontique d'organisations dans les sma. In J.-P. Müller, editor, *JFIADSMA'02*. Hermes, 2002. 53, 55, 56
- [Heathcote, 1998] Isabel W. Heathcote. *Integrated watershed management, principles and practice*. John Wiley & Sons, 1998. 15
- [Heylighen, 1999] Francis Heylighen. Advantages and limitations of formal expression. *Foundations of Science*, 4(1) :25–56, 1999. 49
- [Hill, 2000] David Hill. *Contribution à la modélisation de systèmes complexes. Application à la simulation d'écosystèmes*. Mémoire pour l'habilitation à diriger les recherches, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand, 2000. 37
- [Izquierdo et al., 2003] Luis R. Izquierdo, Nick M. Gotts, and Gary Polhill. Fearlus-w : An agent-based model of river basin land use and water management. In *Framing Land Use Dynamics : Integrating knowledge on spatial dynamics in socio-economic and environmental systems for spatial planning in western urbanized countries*, Utrecht University, The Netherlands., 2003. 17, 21, 22, 23
- [Karacapilidis and Papadias, 2001] Nikos Karacapilidis and Dimitris Papadias. Computer supported argumentation and collaborative decision making : the hermes system. *Information Systems*, 26(4) :259–277, 2001. Article. 17

-
- [Kendall, 1999] Elizabeth A. Kendall. Role modelling for agent analysis, design and implementation. In *First International Symposium on Agent Systems and Applications (ASA/MA'99)*, 1999. 109
- [Kniesel, 1996] Günter Kniesel. Objects don't migrate, perspectives on objects with roles. Technical IAI-TR-96-11, Computer Science Department III, University of Bonn, Avril 1996. 109
- [Kohler and Gumerman, 2000] Timothy A. Kohler and George J. Gumerman, editors. *Dynamics in human and primate societies*. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity. Oxford University Press, New York, 2000. 22
- [Kristensen and Osterbye, 1996] Ben Bruun Kristensen and Kasper Osterbye. Roles : conceptual abstraction theory and practical language issues. *Theory and Practice of Object Systems*, 2(3) :143–160, 1996. 109
- [Krywkow, 2003] Jörg Krywkow, editor. *Participatory Integrated assessment in five case studies. Report of workpackage 4 of the Firma projet*. 2003. 17
- [Labbé et al., 2000] Frédéric Labbé, Pierre Ruelle, Patrice Garin, and P Leroy. Modelling irrigation scheduling to analyse water management at farm level, during water shortages. *European Journal of Agronomy*, 12 :55–67, 2000. 20, 372
- [Lansing and Kremer, 1994] J. Stephen Lansing and James N. Kremer. Emergent properties of balinese water temple networks : coadaptation on a rugged fitness landscape. In C.G. Langton, editor, *Artificial Life III*, pages 201–223. Addison Wesley, 1994. 22, 35, 36
- [Lardon et al., 2000] Sylvie Lardon, Pierre Bommel, François Bousquet, Christophe Le Page, Thérèse Libourel, Robert Lifran, and Pierre-Louis Osty. De la simulation de l'embroussaillage à un outil d'aide à la gestion de l'espace. In *JFIADSMA*. Hermès Editions, 2000. 25
- [Lascoumes and Le Bourhis, 1998] Pierre Lascoumes and Jean-Pierre Le Bourhis. Le bien commun comme construit territorial, identités d'action et procédures. *Politix*, (42) :37–66, 1998. 92
- [Le Bars, 2003] Marjorie Le Bars. *Un simulateur multi-agent pour l'aide à la décision d'un collectif : Application à la gestion d'une ressource limitée agro-environnementale*. Thèse de doctorat en informatique, Université Paris IX, 2003. 22, 23, 35, 36
- [Le Bars, 2004] Marjorie Le Bars. Méthode de validation de modèles dédiés à l'appui à la gestion collective de ressources communes. Technical Report Working Paper, en cours d'édition, Cemagref, 2004. 27
- [Lea and Marlowe, 1994] Doug Lea and Jos Marlowe. PSL : Protocols and pragmatics for open systems. Technical Report 94-0369, Sun Microsystems Labs, 1994. 109
- [Legay, 1997] Jean-Marie Legay. *L'expérience et le modèle. Un discours sur la méthode*. Sciences en questions. Inra, Paris, 1997. 18, 406
- [Levin, 1998] Simon A. Levin. Ecosystems and the biosphere as complex adaptative systems. *Ecosystems*, 1(5) :431–436, 1998. 18, 20
- [Lovell et al., 2002] Chris Lovell, Alois Mandondo, and Patrick Moriarty. The question of scale in integrated resources management. *Conservation Ecology [online]*, 5(2) :<http://www.consecol.org/vol5/iss2/art25>, 2002. 61
- [Low et al., 1999] Bobbi Low, Robert Costanza, Elinor Ostrom, James Wilson, and Carl P. Simon. Human-ecosystem interactions : a dynamic integrated model. *Ecological Economics*, 31(2) :227–242, 1999. 20

- [Lynam *et al.*, 2002] Tim Lynam, François Bousquet, Christophe Le Page, Patrick d'Aquino, Olivier Barreteau, Franck Chinembiri, and Bright Mombeshora. Adapting science to adaptive managers : Spidergrams, belief models and multi-agent modeling. *Conservation Ecology [online]*, 5(2) :<http://www.consecol.org/vol5/iss2/art24>, 2002. 17
- [Mathevet, 2000] Raphael Mathevet. *Usages des zones humides camarguaises : enjeux et dynamique des interactions Environnement/Usagers/Territoire*. Thèse de doctorat, Université Jean Moulin Lyon 3, 2000. 23
- [Montginoul, 1997] Marielle Montginoul. *Une approche économique de la gestion de l'eau d'irrigation : des instruments, de l'information, et des acteurs*. Thèse en sciences économiques, Université Montpellier I, 1997. 30
- [Müller, 2000] Jean-Pierre Müller. Modélisation organisationnelle en systèmes multi-agents. In *7eme école d'été de l'Association pour la Recherche Cognitive*, Bonas, 2000. CNRS. 47
- [Müller, 2002] Jean-Pierre Müller. *Des systèmes autonomes aux systèmes multi-agents : Interaction, émergence et systèmes complexes*. Mémoire pour l'habilitation à diriger les recherches, Université de Montpellier II, 2002. 46, 51, 66
- [Odell *et al.*, 2001] James Odell, H. Van Dyke Parunak, and Bernhard Bauer. Representing agent interaction protocols in UML. In Paolo Ciancarini and Michael Wooldridge, editors, *Agent-Oriented Software Engineering*, pages 121–140. Springer-Verlag, Berlin, 2001. 66
- [Odell *et al.*, 2003] James Odell, H. Van Dyke Parunak, and Mitchell Fleischer. The role of roles. *Journal of Object Technology*, 2(1) :39–51, 2003. 66, 67, 289
- [Ostrom, 1992] Elinor Ostrom. *Crafting institutions for self-governing irrigation systems*. ICS Press, San Francisco, 1992. 17
- [Pahl-Wostl, 2002] Claudia Pahl-Wostl. Agent-based simulation in integrated assessment and resources management. In Andrea E. Rizzoli and Anthony J. Jakeman, editors, *1st Biennial meeting of the environmental modelling and software society (IEMSS)*, volume 2, pages 239–244, Lugano, Switzerland, 2002. 18, 23, 24
- [Parunak and Odell, 2002] H. Van Dyke Parunak and James Odell. Representing social structures in UML. In G. Weiss and P. Ciancarini, editors, *Agent-Oriented Software Engineering II*, volume 2222 of *Lecture Notes on Computer Science*, pages 1–16, Montreal , Canada, 2002. Springer. 66, 130
- [Pouget *et al.*, 2003] Jean-Christophe Pouget, Francesc Bellaubi, Aurélien De Sa, Zaigham Habib, and Patrick Le Goulven. Un environnement de modélisation pour tester l'allocation de ressources en eau. HyD2002 et ses applications. In *Séminaire PCSI "Gestion intégrée de l'eau au sein d'un bassin versant", session Gestion de la ressource en eau*, Montpellier, France, 2003. 300, 309
- [Poujol, 2004] Samuel Poujol. *Conception d'une infrastructure de modélisation participative par des systèmes multi-agents*. Dea d'informatique de l'université montpellier ii, 2004. 311
- [Rao and Georgeff, 1995] Anand Rao and Michael Georgeff. BDI agents : from theory to practice. Technical Report 56, Australian Artificial Intelligence Institute, 1995. 45
- [Rocher, 1968] Guy Rocher. *Introduction à la sociologie générale. Tome 1 : l'action sociale*. Editions HMH, 1968. 47
- [Rouchier *et al.*, 1998] Juliette Rouchier, Olivier Barreteau, François Bousquet, and Hubert Proton. Evolution and co-evolution of individuals and groups in environment. In Yves Demazeau, editor, *ICMAS'98*, pages 254–269, Paris, 1998. IEEE Computer Society. 47

-
- [Rouchier *et al.*, 2001] Juliette Rouchier, Martin O'Connor, and Francois Bousquet. The creation of a reputation in an artificial society organised by a gift system. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation [online]*, 4(2) :<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/4/2/8.html>, 2001. 22
- [Rouchier, 2000] Juliette Rouchier. *La Confiance à travers l'échange. Accès aux pâturages au Nord-Cameroun et échanges non-marchands : des simulations dans des Systèmes Multi-Agents*. Thèse de doctorat en environnement, Université d'Orléans, 2000. 23
- [Sallé, 2002] Mathieu Sallé. Electronic contract framework for contractual agents. In R. Cohen and B. Spencer, editors, *Canadian conference on Artificial Intelligence*, volume 2338 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 349–353, Calgary, 2002. Springer-Verlag. 52, 55
- [Saltelli, 2000] Andrea Saltelli. What is sensitivity analysis? In A Saltelli, K. Chan, and E.M Scott, editors, *Sensitivity Analysis*, Wiley series in probability and statistics, pages 3–13. John Wiley and sons, ltd, 2000. xii, 223, 405
- [Sauri, 2003] David Sauri. Lights and shadows of urban water demand management : The case of the metropolitan region of barcelona. *European Planning Studies*, 11(3) :229–243, 2003. 22
- [Sebillote and Soler, 1990] Michel Sebillote and Louis-Georges Soler. Les processus de décision des agriculteurs. In J. Brossier, B. Vissac, and J.-L. Le Moigne, editors, *Modélisation systémique et systèmes agraires*, pages 93–101. INRA, 1990. 20
- [Servat *et al.*, 1998] David Servat, Edith Perrier, Jean-Pierre Treuil, and Alexis Drogoul. When agents emerge from agents : Introducing multi-scale viewpoints in multi-agent simulations. In *Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*, volume 1534 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, pages 183–198. 1998. 54, 55
- [Servat, 2000] David Servat. *Modélisation de dynamiques de flux par agents. Application aux processus de ruissellement, infiltration, et érosion*. Thèse de doctorat en informatique, Université Paris VI, 2000. 25, 288
- [Sichman, 1998] Jaime Simão Sichman. DEPINT : Dependence-based coalition formation in an open multi-agent scenario. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation [online]*, 1(2) :<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/1/2/3.html>, 1998. 53, 55
- [Simonovic, 2000] Slobodan P. Simonovic. Tools for water management. *Water International*, 25(1) :76–88, 2000. 17
- [Soulié, 2001] Jean-Christophe Soulié. *Vers une approche multi-environnements pour les agents*. Thèse de doctorat en informatique, Université de La Réunion, 2001. 23
- [Steinmann, 2000] Friedrich Steinmann. On the representation of roles in object-oriented and conceptual modelling. *Data & Knowledge Engineering*, 35(1) :83–106, 2000. 109
- [van Daalen *et al.*, 2002] C. Els van Daalen, Leen Dresen, and Marco A. Janssen. The roles of computer models in the environmental policy life cycle. *Environmental Science & Policy*, 5(3) :221–231, 2002. 17, 19
- [van den Hove, 2001] Sybille van den Hove. Approches participatives pour la gouvernance en matière de développement durable : Une analyse en terme d'effets. In G. Froger, editor, *Gouvernance et Développement Durable*. Helbing & Lichtenhahn, 2001. 15, 16, 17
- [Vanbergue and Drogoul, 2002] Diane Vanbergue and Alexis Drogoul. Approche multi-agent pour la simulation urbaine. In *6èmes Journées Cassini*, 2002. 24
- [Vanbergue, 2003] Diane Vanbergue. *Conception de simulation multi-agents : application à la simulation des migrations intra-urbaines de la ville de Bogota*. Thèse de doctorat en informatique, Université Paris VI, 2003. 18, 23, 40, 222

- [Walker and Janssen, 2002] Brian H. Walker and Marco A. Janssen. Rangelands, pastoralists and governments : interlinked systems of people and nature. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences*, 357(1421) :719–725, 2002. Article. [22](#)
- [Warwick, 2003] Cindy Warwick, editor. *Integration. Report of the Workpackage 5 of the FIRMA project* . 2003. [19](#)
- [Wieringa *et al.*, 1994] Roel Wieringa, Wiebren de Jonge, and Paul Spruit. Roles and dynamic subclasses : a modal logic approach. In *European Conference on Object-Oriented Programming*, Bologna, 1994. [109](#)
- [Wooldridge *et al.*, 2000] Michael Wooldridge, Nicholas R. Jennings, and David Kinny. The Gaia methodology for agent-oriented analysis and design. *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 3(3) :285–312, 2000. [53](#), [55](#), [109](#), [125](#), [138](#), [284](#)
- [Zanker, 1999] Sébastien Zanker. Modélisation et gestion de la demande agricole en eau dans la Drôme, cas de la mise en application du SAGE Drôme. Rapport de stage de fin d’étude ENGREF, CEMAGREF, Septembre 1999. [73](#), [74](#), [87](#), [88](#), [89](#), [96](#), [99](#), [345](#)

Annexes

Annexe A

Fiches d'analyse de 9 modèles multi-agents de systèmes de gestion d'eau agricole

Les fiches d'analyse des 9 modèles multi-agents de systèmes de gestion d'eau agricole évoqués dans le chapitre 1 sont reproduites ici.

Pour chacun des modèles :

- un cartouche situe la contexte et les caractéristiques principales du modèle ;
- un tableau décrit les différents niveaux représentés dans le modèle, et pour chacun de ces niveaux :
 - les entités (représentées par des agents) spatiales, physiques et sociales ;
 - les processus naturels, sociaux et d'usage de la ressource représentés. Chacun des processus peut s'étendre sur plusieurs niveaux. Le niveau où le processus est lancé est alors en gras ;
 - les représentations internes pour chacun des niveaux. Les couleurs des colonnes codent le type de niveau :

Niveau individuel	Niveau agrégé selon des critères spatiaux	Niveau agrégé selon des critères organisationnels	Niveau agrégé selon des critères individuels

- on précise :
 - les scénarios testés ;
 - les indicateurs observés ;
 - les éléments de validation du modèle ;
 - si le modèle est couplé ;
 - le degré de réalisme du modèle : par rapport aux données, à la représentation de l'espace et aux processus ;
 - la façon dont s'effectue la prise en compte de niveaux d'organisation multiples ;
 - la façon dont sont différenciés les comportements individuels ;
 - les types de représentations graphiques sont utilisées pour décrire le modèle ;
 - si le modèle est facile à faire évoluer.

- ☐ Modèle, Auteurs : **Camargue, N. Franchesquin [Franchesquin et al, 2003], plateforme maison Majorca (Lsis, équipe Espinasse) = Jess (moteur de règles) + Java + communications FIPA**
- ☐ Contexte Géographique: delta Grande Camargue
 Projet : Recherche
 Objectif : Explorer système
- ☐ Ressource(s) Type : eau drainage + irrigation Problème : gestion hydraulique étangs
- ☐ Espace Résolution : 1 ha Etendue : delta (150 km2)
- ☐ Temps Résolution : 1 mois Etendue : périodes (1 période = plusieurs mois sur lequel un contrat doit se réaliser)

NIVEAU(X)		individuel	Associations hydrauliques	Polders	Parc Naturel	Conseil de l'eau
ENTITES	Spatiales	Plot (1 canallrri, 1 canalDrain)	Canallrri CanalDrain		Digue (1 Vaccares) Vaccares (n canalDrain, 1 Digue) AgentHydro	
	Objets	Crop			AgentHydro	
	Sociales	Exploitant (n plots)	AssoceDrain Assocelrri		ParcNat GestDigue	Pêcheurs ProtectionNature Agriculteurs
PROCESSUS	N a t.	Cycle de l'eau naturel (tous les mois en 1 ^{er})	Pluie, évaporation, irrigation	irrigation Drainage	AgentHydro lance cycle de l'eau Rafraîchissement Vacarres Envoi info aux sociaux	
		Cycle de l'eau artificiel (tous les mois en 3 ^{ème})	Drainage		AgentHydro lance cycle de l'eau avec info issues négociation Actionnage digue, rafraîchissement Vacares	
	U s .	Négociation transferts eau (tous les mois en 2 ^{ème})		3. Négociation sur qté d'eau demandée	4. Possibilité coordination des associations sur Polder si pas contentes	1. AgentHydro envoie info aux sociaux 2. GestDig demande aux associations une qté d'eau
	S o c i a l	Elaboration contrat (autre phase du modèle)		AssoceDrain reçoivent info drainage canaux	Parc est médiateur de la négociation Il transmet résultat à GestDigue à la fin de la négociation	Tous sont parties prenantes pour définir niveaux Vacarres à atteindre
Représentations internes						

- ☐ Scénarios :
 - Paramètres explorés (vérification et sensibilité)
 - Matrices de satisfaction définissant les objectifs des agents et les poids des agents du conseil de l'eau
 - Caractéristiques des associations (capacités pompage, assolements), climat, état initial du Vaccarès
 - Scénarios testés : poldérisation des étangs, augmentation du prix du riz
- ☐ Sorties :
 - Interface :
 - Indicateurs :
 - niveau et salinité de l'Etang du Vaccarès, quantités drainées, ouverture de la digue... (observation tous les mois)
 - contrats atteints, niveaux de satisfaction (observation pour chaque phase de la simulation)
- ☐ Validation :
 - Les auteurs ne disposent que de 3 ans de données. Ces données ont été utilisées pour valider les prises de décision effectuées par le modèle : si ces données sont fixées comme un contrat à atteindre, les agents y parviennent avec des décisions jugées crédible par des experts.
- ☐ Couplage : entre les différents modules du modèle
- ☐ Réalisme
 - Données : 3 ans de données climatiques, assolements
 - Espace : grille issue d'un SIG
 - Processus : processus hydrologiques simplifiés, processus de négociation issus de la théorie
- ☐ Prise en compte n.o. :
 - Couplage : Les modules sociologiques et hydrologiques (et le module conseil de l'eau qui s'occupe de calculer le contrat) sont reliés par une relation type couplage. C'est un seul agent qui se charge de faire circuler les informations entre les 2 parties (les exploitants ne communiquent pas directement avec leurs parcelles, ni les Associations avec leurs canaux, mais par l'intermédiaire d'un AgentHydro)
 - Dans le modèle sociologique chacun négocie pour le niveau qui lui correspond dans le modèle hydrologique
- ☐ Différentiations comportements : les agents possèdent des plans et des croyances (qui servent notamment à représenter les états du système à atteindre dans des objets spéciaux)
- ☐ Diagrammes :
 - 1 schéma avec les 4 niveaux de gestion liés par les processus par lesquels ils interagissent
 - 1 schéma avec 3 niveaux de gestion et la circulation de l'information lors d'une négociation
 - 1 diagramme séquence de la négociation
 - 1 diagramme de classes pour le modèle hydrologique, 1 pour la modèle social
 - 1 schéma montrant le couplage à travers l'agent AgentHydro qui est associé d'un coté à un agent social et de l'autre à un agent physique
 - diagrammes d'état pour décrire les protocoles
 - 1 dessin de l'organisation du SMA où on voit clairement 3 modules : le WaterCouncil, le modèle hydrologique et le modèle social relié par un agent-pont à chaque fois
- ☐ Modifications :

☐ **Modèle, Auteurs :** **Catchscape, N. Bécu, P. Perez [Becu et al, 2002 ; Becu et al, 2003], Cormas**
☐ **Contexte** Géographique: bassin versant de Mae Uam, Thaïlande Nord,
 Projet : Intervention – axé gestionnaires locaux
 Objectif : Explorer le système
☐ **Ressource(s) Type :** eau irrigation Problème : conflit d'usage amont-aval
☐ **Espace** Résolution : 2 parcelles (2*0.16 ha) Etendue : bassin versant (50 km2 à l'échelle 2/5)
☐ **Temps** Résolution : 10 jours Etendue : 10 ans
(2 campagnes par an , 1 saison sèche, 1 saison humide avec choix culture, plantation, conduite, récolte)

NIVEAU(X)		individuel	CANAL	VILLAGE	BASSIN	Canal païré	Canaux amont
ENTITES	Spatiales	Plot (<i>culture, sol, type = paddy, upland ou forêt</i>)	Canal (<i>n plots</i>)	Village (<i>2 ou 4 canaux</i>)	River (<i>6 vannes</i>)		
	Objets		Vanne (<i>1 Canal</i>)				
	Sociales	Farmer (<i>n plots, family size, labour force, cash</i>)	CanalManager (<i>1 Vanne</i>)				
PROCESSUS	Nat.	Bilan et circulation eau (tous les t, en 3 ^{ème})	Recharge, drainage et ruissellement + calcul rendement	Distribue aux plots selon amont-aval	Rafraichit debitIn et distribue selon amont-aval et ouverture vannes		
		Irrigation (tous les t en 2 ^{ème})	Demande selon débit et temps alloué, probabilité de tricher	Ouvre selon besoins et discussions avec aval			
	Soci al	Discussion Irrigation (tous les t en 4 ^{ème})		Si crise (satisfaction non atteinte), rotation automatique avec canal païré + demande à amont	Accepte réduction plus facilement si même village	Discussions entre canaux	Rotation en cas de crise
		Vie Farmer (tous les t, en 1 ^{er})	Décide qui travaille externe, dépenses quotidiennes, nourrir famille, travaille, embauche				
		Début saison	Choisit assolement : riz en saison humide, selon cash, force travail, attentes eau et cultures (Programmation Linéaire)				
		Fin saison	Récolte : vend surplus autosuffisance ; si cash et possible peut acheter plot, irriguer upland ou transformer forêt		Limite irrigation et déforestation, fixe prix plots		
	Représentations internes		Attente Eau Attente Cultures (rafraîchies avec expérience)	Satisfaction (rafraîchie avec expérience)			

- Scénarios :
 - 1 scénario de base : 6 types de foyers, tous agents honnêtes
 - 3 scénarios pour tester la stabilité du modèle : pas de négociation entre les canaux, flambée des prix de l'oignon, pas de contrainte en eau
 - 1 scénario d'étude de sensibilité : 10 années sèches successives
 - 1 scénario virtuel : 30% d'agents voleurs
- Sorties :
 - Interface : points de vue sur types de culture, réserve en eau du sol, quantité d'eau des canaux, cash des farmers
 - Indicateurs : rendements par zones, proportion globale riches / pauvres, proportion globale de cultures en saison sèche, proportion de l'oignon (culture de rente), proportion des upland irrigués, satisfaction des canaux
- Validation :
 - Comparaison du scénario de base avec les données de terrain : reproduction de la répartition des cultures à 80%, du cash à 70%.
 - Nouvelle campagne d'interview pour aller plus loin avec un nouveau sma
- Couplage : non
- Réalisme
 - Données : séries climatiques historiques, documents gouvernementaux et rapports passés
 - Espace : espace réel schématisé ; respect données terrain (taille familles et fermes, cash..)
 - Processus : comportements individuels très détaillés ; bilan eau avec infiltration et ruissellement
- Prise en compte n.o. :
 - peu d'influence des niveaux d'organisation (les simulations montrent que les négociations entre canaux ont peu d'impact sur le système), les paramètres sensibles sont au niveau individuel (représentations notamment), qui est très développé. Les interactions sont essentiellement via l'environnement.
 - Pourtant le mot n.o. est mentionné à plusieurs reprises et la volonté d'étudier l'influence des n.o. soulignée
- Différentiations comportements : Calcul avec paramètres famille, force travail, cash, attente essentiellement
- Diagrammes :
 - Diagrammes des classes séparant spatial/social/ objet
 - 1 flowchart pour les comportements individuels
 - 1 espèce de diagramme des séquences avec une colonne pour chaque type de dynamique pour les différentes phases du pas de temps
- Modifications :

☐ **Modèle**, Auteurs : **GibiDrome, O. Barreteau [Barreteau et al., 2003], homemade Smalltalk**
☐ **Contexte** Géographique: Drôme, France, basse-vallée d'un bassin versant
 Projet : Intervention, axé acteurs
 Objectif : Explorer scénarios
☐ **Ressource(s)** Type : **eau irrigation** Problème : **gestion étiages**
☐ **Espace** Résolution : **parcelle** Etendue : **tranche de bassin versant (2000 ha irrigués sur 50 km2)**
☐ **Temps** Résolution : **jour** Etendue : **campagne**
(1 campagne = 15/04 au 15/09, avec semis 15/04 au 15/05, irrigation de début juin à fin aout)

NIVEAU(X)			individuel	Reseau	Bassin
ENTITES	Spatiales		Parcelle (2 ha)	Réseau	Riviere Climat (<i>pluie, debitIn, ETP</i>) <i>uniforme</i>
	Objets				AccesEau (<i>destination = Reseau ou paysan</i>)
	Sociales		<i>Paysan (6 parcelles, puits, reseaux)</i>		CLE Chambre
PROCESSUS	N a t.	Distrib eau (tous les jours)	Paysan reçoit eau demandée et met sur parcelle	Distrib eau demandée à membres (répartition manque même pour tous)	Rivière donne quantité demandée totale possible à AccesEau AccesEau distribue quantité à destinations (répartition manque meme pour tous)
		Nature (tous les jours)	Parcelle reçoit pluie, plante pousse		
	U s.	Besoin eau (tous les jours pendant irrigation)	Paysan demande eau (fixe) pour 1 parcelle sauf dimanche (sauf si crise)		
		Semis (tous les jours avant Irri)	Paysan a 1 chance / 3 de semer une Parcelle chaque jour		
		Lancement Irri (1 fois)	Paysan lance campagne selon règle décision		Chambre prévient ceux qui sont abonnes
	S o c i a l		Paysan reçoit message Crise	Reseau prévient membres si crise et modifie approvisionnement	CLE prévient gestionnaires AccesEau si crise
		Représentations internes		Paysan assez frustré – il ne regarde pas ses parcelles, sauf pour lancer la campagne	

- ❑ Scénarios :
 - Paramètres globaux : scénario climatique, type de ressource complémentaire, règle répartition pénurie entre réseaux
 - Répartition paramètres individuels : règle démarrage irrigation (Paysan), cultures (Parcelle), sols (Parcelle)
- ❑ Sorties :
 - Interface : 3 Réseaux + individuels avec niveau stress
 - Indicateur : débit Rivière, stress parcelles (niveau individuel ou global), jours de crise, débits pompes
- ❑ Validation :
 - On retrouve des résultats simulés sous tableur
 - Introduction d'éléments suite a des discussions avec les acteurs (sols)
- ❑ Couplage : non
- ❑ Réalisme
 - Données : séries climatiques historiques, règles allocation bassin vraies, comportement agriculteurs d'après rapports passés
 - Espace : espace très schématique mais respectant configuration globale terrain
 - Processus : réalisme règles allocations au niveau bassin (ce sont les règles négociées)
- ❑ Prise en compte n.o. : La modélisation se concentre surtout sur le niveau bassin. La distribution dans les réseaux, puis sur les parcelles se fait mais ces niveaux sont commandés, ils n'ont pas d'autonomie
- ❑ Différentiations comportements : pas de différenciation. Seule hétérogénéité = type sols
- ❑ Modifications : L'eau est distribuée directement de la rivière aux gestionnaires (paysan ou réseau qui redistribue directement aux membres) suivant leurs demandes. Il faudrait changer profondément la structure du modèle pour donner aux paysans plus de libre-arbitre ou plusieurs pompes.

- ☐ **Modèle**, Auteurs : **Bali, J.S. Lansing [Lansing and Kremer, 1994]**
☐ **Contexte Géographique**: Bassin des rivières Oos et Petanu, Bali
 Projet : Recherche
 Objectif : Explorer système
☐ **Ressource(s) Type** : eau irrigation Problème : optimalité modes de coordination traditionnel
☐ **Espace** Résolution : 1 subak (30-40 ha) Etendue : 172 subaks
☐ **Temps** Résolution : 1 saison Etendue : plusieurs années

L'article est essentiellement analytique, le modèle lui-même est peu décrit – le tableau est donc hautement interprétatif

NIVEAU(X)			individuel	Sous Bassin	Temple artificiel	Voisinage
ENTITES	Spatiales			Sous-bassin (alimenté par un barrage)		
	Objets		Subak (terrasse irriguée). A la fois unité de gestion et parcelle	Barrage		
	Sociales					
PROCESSUS	N a t.	Flux hydrologiques	Demande selon culture	Distribution dans barrages selon demandes subaks		
		Flux de nuisibles	Transmet nuisibles aux voisins pareils			Passent de champs voisins a champs voisins ayant même culture
	U s .	Croissance culture	Rendement selon nuisibles et stress eau			
	S o c i a l	Décision type culture et date démarrage (scénario coordination imposée)			Ensemble de subaks ou tout le monde prend même décision (taille variable de 1 à tous)	
		Décision type culture et date démarrage (scénario coordination émergente)			Structure émergente ou tout le monde a même décision après quelques	Imite voisin ayant meilleur rendement
	Représentations internes					

- ☐ Scénarios :
 - Test 1 : variation d'une échelle de coordination imposée
 - Test 2 : coordination émergente, par imitation du meilleur voisin ; l'adaptabilité des structures émergentes est testée en faisant varier le climat
- ☐ Sorties :
 - Interface :
 - Indicateurs : rendements totaux et individuels, stress eau
- ☐ Validation :
 - Simulation avec des données réelles (avant scénarios)
- ☐ Couplage : non
- ☐ Réalisme
 - Données : données climatique réelles
 - Espace : topologie espace réel
 - Processus :
 - pas d'indication sur le réalisme des processus naturels
 - les « cropping patterns » possibles sont les patterns traditionnels
- ☐ Prise en compte n.o. : les n.o. sont ici induits par coordination.
- ☐ Différentiations comportements : il semble qu'elle ne se fasse que par le cropping pattern, qui est la variable sur laquelle porte la coordination.
- ☐ Diagrammes : dessins du système
- ☐ Modifications :

☐ Modèle, Auteurs : **Shadoc, O. Barreteau [Barreteau, 1998], Smalltalk homemade**
☐ Contexte Géographique: **Sénégal, 1 périmètre irriguée vallée fleuve Sénégal**
 Projet : Recherche, axé acteurs
 Objectif : Comprendre système
☐ Ressource(s) Type : **Eau (irrigation)** Problème : **Viabilité périmètre irrigué**
☐ Espace Résolution : **Parcelle** Etendue : **Périmètre Irrigué**
☐ Temps Résolution : **Jour** Etendue : **Années**
(1 campagne = 1 phase recherche crédit (n jours) + 1 phase irrigation (n jours) + 1 phase bilan (1 jours))

NIVEAU(X)		Individuel	Maille physique	Maille sociale	P.I. physique	PI social	Crédit	Affinité
ENTITES	Spatiales	Parcelle (1 bief)	Bief (1 stationP, 6-20 parcelles)		StationPomp age			
	Objets	Représentation Règle		Représentation Règle		Représentati on Règle	Représentati on Règle	
	Sociales	Paysan (statut, objectif, 1 GrMaile, 1 GrPI, 1 GrCredit)		Groupe (raison = bief)		Groupe (raison = PI)	Groupe (raison = crédit)	
PROCESSUS	Nat	distribution eau (tous les jours)	Assèchement parcelle	Bief distribue eau parcelles avantage amont		PI prend eau selon ses règles , distribue biefs selon capacités biefs		
	Us	Irrigation (tous les jours pendant phase irrigation)	Paysan ouvre vanne Parcelle selon objectifs et représentation parcelle					
	Soc	Prêt eau (pendant irrigation)	Demande à ami sur maille si besoin		Membre Groupe prête si assez et ami			Ami prête si assez et même maille
	ail	Echange info (après irrigation)	Informe état parcelle amis sur maille		Membre groupe rafraîchit repr parcelle			Ami rafraîchit repr parcelle
		Recherche crédit (plusieurs itération avant phase irrigation)	Demande groupe crédit ou ami selon représentation règles groupe			Groupe accepte	Groupe fournit crédits	Ami fournit crédit
		Apprentissage (après phase irrigation)	Si non satisfait copie règles amis					Amis meilleurs copiés
Représentations Internes		Réseau Affinité Etat parcelle Règles groupes						

- Scénarios :
 - Paramètres globaux : nombre groupes, recouvrement groupes, tx assèchement parcelles
 - Répartition paramètres collectifs : règle tour d'eau, règle accès crédit, règle démarrage PI, règle participation PI, règle arrêt PI, règle communication dans groupe, existence chef...
 - Répartition paramètres individuels : règle imitation, critère satisfaction, ensemble imitation, statut, objectif, règle remboursement, règle prêt, revenu extérieur

- Sorties :
 - Interface : les parcelles avec leur niveau de remplissage
 - Indicateur : nombres parcelles stressées, cultivées, n paysans satisfaits, n paysans endettés, changements de règles, consommation eau

- Validation :
 - 100 scénarios aléatoires joués 20 fois, puis sélection de scénarios intéressants pour une étude des paramètres significatifs
 - tests sur l'influences des règles collectives ou individuelles (ou les 2) selon les paramètres de l'environnement sur la viabilité : la viabilité dépend de l'adéquation des règles collectives aux règles individuelles selon l'environnement

- Couplage : non

- Réalisme
 - Données : comportements et configurations sociales issus des enquêtes et validés a posteriori par les acteurs
 - Espace : archétypal
 - Processus : réalisme sur échanges autour eau et crédit

- Prise en compte n.o. :
 - Les Agents Groupes représentent des institutions
 - Les Représentations encapsulent des n.o. relatifs aux agents (réseau d'affinité)
 - Les objets Règle représentent des éléments de comportements liés aux agents. Ils peuvent varier dynamiquement suivant l'appartenance de l'agent (imitation)
 - Aaladin est évoqué en perspective pour pouvoir mieux étudier les articulations individuel-collectif

- Différentiations comportements : avec des objets Règles, qui dépendent des statuts, objectifs, groupes...

- Modifications :
 - Il est facile de modifier les modalités d'une règle
 - Il est difficile d'ajouter une règle ou une sortie

- ☐ **Modèle, Auteurs : SINUSE, S. Feuillette [Feuillette, 2001], Cormas**
☐ **Contexte Géographique:** Nappe de Keirouan, Tunisie Centrale
 Projet : Diagnostic
 Objectif : Comprendre système
☐ **Ressource(s) Type :** eau irrigation (nappe) **Problème :** surexploitation de la nappe – baisse régulière du niveau
☐ **Espace** Résolution : 1 ha Etendue : 2400 ha (1/10 zone)
☐ **Temps** Résolution : 6 mois Etendue : 30 ans
(1 an = 1 phase échnage parcelle, 2 saisons culture, 1 phase bilan et extension exploitation)

NIVEAU(X)		individuel	Nappe	PI	Voisinage
ENTITES	Spatiale	Parcelle (Aggrégat) (taille, prix, assolement)	ZoneNappe (Aggrégat) (profondeur..)	PI (Aggrégat) (parcelles, prixEau)	
	Objets	Puit (coutExtraction, profondeur, parcelle)			
	Sociales	Exploitant (famille, parcelles, puits, cash)			
PROCESSUS	N a t.	Prélèvements et dynamique nappe (fin pas de temps - 1)	prélèvements	Réajustement niveau selon prélèvements et transferts souterrains	prélèvements
	U s .	Coûts d'extraction (fin pas de temps - 2)		Influe sur coûts d'extraction	Rafraîchissement avec profondeur nappe
		Approfondisse ment puits (début pas de temps)	Si baisse niveau nappe	Provoque approfondissement	
		Nouveaux investissements (bilan année)	Construction puits selon terres sans eau, cash et voisinage		Etats puits voisinage influe sur décision
	S o c i a l	Echanges fonciers (début d'année)	Selon situation cash et expérience, propose ou demande parcelle		Parcelles proposées ou demandées dans un voisinage
		Stratégie saisonnière (début pas de temps)	Assolement assez fixe, irrigation selon cash et accès		
Représentations internes					

- Scénarios : chaque scénario est simulé 20 fois.
 - 1 scénario de base
 - analyses de sensibilité sur chacun des paramètres clé : revenus, aversion au risque, taux abandon puits, apports nappe, climat, emprunts, taux imitation, taux échanges...
 - scénarios d'exploration : tarification eau unifiée, micro irrigation généralisée, droit d'eau payant, quota volumétrique

- Sorties :
 - Interface : emplacement des puits
 - Indicateurs : profondeur nappe, endettement, nombre de puits

- Validation :
 - Validation du fonctionnement de la nappe par des relevés piézométriques
 - Les ordres de grandeurs sur les puits en l'endettement sont correct mais la sensibilité du modèle aux paramètres est trop grande certains processus irréalistes : les scénarios d'exploration ne peuvent servir de base de discussion
 - Retour au terrain en perspective pour explorer les hypothèses manquantes révélées par les comportements erratiques du modèle
 - Perspective d'un jeu de rôle pour valider les règles de comportement

- Couplage : non

- Réalisme
 - Données : enquêtes préliminaires pour identifier des facteurs déterminants de la demande en eau et réaliser le zonage; approfondissement sur des fermes types pour déterminer les règles d'action; enquêtes statistiques pour quantifier les typologies ; relevés piézométriques sur 30 ans
 - Espace : proportions des zonages de la nappe, des PI et des typologies d'accès respectés.
 - Processus : pour la nappe, compromis entre prise en compte de l'hétérogénéité et simplicité en représentant l'évolution du stock par plusieurs réservoirs

- Prise en compte n.o. :
 - Les agriculteurs fonctionnent de manière individualisée sur le terrain : il n' a pu être identifié de niveau d'organisation influençant la demande en eau, ni externe ni interne au système. Cependant l'imitation et les échanges fonciers induisent des n.o. implicites
 - Les niveaux spatiaux sont différenciés : parcelle, nappe, PI

- Diagrammes :
 - Diagramme des classes : les niveaux physiques apparaissent bien avec Aggregat/SpatialEntityElement de Cormas
 - Un schéma du système où les 3 niveaux physiques sont représentés par 3 plans
 - Un flowchart pour les comportements individuels
 - Un sequence diagram pour le séquençement d'un pas de temps

- Différentiations comportements : pas de différenciation des agriculteurs, mais beaucoup de branches if dans les méthodes permettant une grande variété d'action selon les conditions de l'environnement et le niveau de cash

- Modifications :

- **Modèle**, Auteurs : **Manga(lère), Marjorie LeBars, [Le Bars, 2003], C++ homemade**
 - **Contexte** Géographique: Bassin de la Lère
 - Projet : Intervention
 - Objectif : Explorer scénarios
 - **Ressource(s)** Type : Eau irrigation (stock) Problème : Repartition du stock
 - **Espace** Résolution : parcelle Etendue : pas d'interface spatiale
 - **Temps** Résolution : année Etendue : plusieurs années

(1 an = calcul plan culture et besoins eau + négociation eau + production + résultats + choix investissement)

NIVEAU(X)			individuel	STOCK EAU
ENTITES	Spatiales		Plot	
	Objets		Crop	DistributeurInfo Climate
	Sociales		Farmer	Gestionnaire
PROCESSUS	N a t.	Production Champs	Plot a fonction de production selon climat et eau disponible	Climat même pour tous les plots !
	U s .	Plan de culture et besoins eau	Selon type de rotation, climat de référence, aversion au risque	
	S o c i a l	Négociation eau	Demande besoin calcule, continue éventuellement négociation	Repartit suivant diverse règle (au prorata demande, au prorata surface totale ou maïs , selon année précédente, en favorisant petits
		Investissements long terme	Selon rendement et résultats des autres, choix d'étendre irrigation ou pas	Informations synthétiques sur résultats de tout le monde fournies
Représentations internes			Projection climat, représentation de son exploitation, mémoire du passé..	Mémoire des échanges pour le gestionnaire

- Scénarios :
 - L'utilisateur peut définir : nombre de farmers, pourcentage des types de rotation, d'aversions, de surfaces ; le nombre d'années ; les caractéristiques des cultures ; les séries climatiques ; les quantités d'eau disponibles annuelles
 - Les tests portent sur les règles de répartition des gestionnaires

- Sorties :
 - Interface : non
 - Indicateurs :
 - Individuels : eau demandée et allouée
 - Sectoriels : production de maïs
 - Ethiques : disparité résultats selon comportements
 - Environnementaux : eau utilisée, allouée...

- Validation :
 - Scénarios jugés suivant des critères de compréhensibilité, d'acceptabilité, et de faisabilité par les gestionnaire du système, qui demandent le test de nouvelles règles

- Couplage : non

- Réalisme
 - Données :
 - Espace : pas d'espace
 - Processus : règles proposées par les acteurs

- Prise en compte n.o. : Un niveau individuel et un niveau global (celui du gestionnaire) représentés chacun par un agent. Au niveau individuel, prise de décision sur la quantité d'eau demandée et sa négociation selon la stratégie suivie et les besoins de l'exploitation. Au niveau global, propositions d'allocation suivant les règles de gestion. A la fin d'une saison, le niveau global fournit des données agrégées sur les stratégies de l'ensemble des agents et leurs performance aux individus. Ce retour d'information peut induire des comportement d'imitation.
Mangalere structure les connaissances et les procédures en utilisant une architecture BDI

- Différentiations comportements : existence de différents stratégies de demandes en eau

- Modifications : Le recours à BDI est motivé par la volonté de pouvoir ajouter de nouvelles règles facilement et d'être plus proche du langage naturel

- ☐ **Modèle**, Auteurs : **Sao Paulo, R. Ducrot [Ducrot et al, 2004], Cormas**
☐ **Contexte Géographique**: bassin versant Alto-Tiete, Brésil
 Projet : Recherche
 Objectif : Explorer système (modèle pilote pour tester validité approche)
☐ **Ressource(s) Type** : eau (AEP, irri) + sols Problème : compétition occupation sol (+qualité eau en zone péri-urbaine)
☐ **Espace** Résolution : 3 ha Etendue : bassin de 90 km²
☐ **Temps** Résolution : 1 mois Etendue : 20 ans

NIVEAU(X)		individuel	RESERVOIR	VILLE	TERRITOIRE	Voisinage spatial
ENTITES	Spatiales	Cell (<i>type = rural, favela, river, reservoir or park</i>)	Réservoir (<i>vol, demande, pollution</i>) = Aggregat de cells réservoir)	Ville (<i>tax</i>) = Aggregat (partition)		
	Objets	Plot (<i>use = (cereale, jachere, horticulture, industrie, residential, tourisme), pump, prix</i>) on rural cells Water (<i>runOff, pollution runOff</i>) on river cells				
	Sociales	Farmer Urban (<i>strategy = recreational, speculation, investment</i>)				
PROCESSUS	Nat	Hydro (ts les mois)	Bilan débit et pollution selon cellules voisines (cells water)			runOff et pollution supplémentaires si voisines cultivées ou favelas
	Us	Choix land use (6 mois)	Bilan cash (résultat culture ou investissement) puis : Rotation selon cash et type culture pour farmers Transformation si cash pour urbans			
		Extension favelas (10 mois)	Selon voisinage et occupation			>5 voisines favelas ou inoccupé et 1 voisine favela: devient favela
	Social	Marché (12 mois)	Mise en vente d'abord au farmers voisins puis atout le monde		Accès marche pour tous	Farmers voisins favorises
		Migration (12 mois)	Cash négatif partent et leur(s) plots vont sur marché Nouveaux arrivants peuvent acquérir plots au marché			
Représentations internes						

- ❑ Scénarios : 1 seul scénario dans l'article – des scénarios sur les changements de stratégies ou les politiques municipales sont prévus
- ❑ Sorties :
 - Interface : occupation des cellules
 - Indicateur : non cités
- ❑ Validation : simple calibration pour assurer que la migration est positive
- ❑ Couplage : non
- ❑ Réalisme
 - Données : aléatoires (prototype de test)
 - Espace : archétypal – 8 type de land cover : river, réservoir, favela, residential, industry, tourism, crop, irrigated crop
 - Processus : comportements agriculteurs d'après enquête, pas d'efforts sur comportements urbains
- ❑ Prise en compte n.o. : les comportements sociaux sont tous individuels. Des niveaux physiques sont induits par l'usage des parcelles
- ❑ Différentiations comportements :
 - Pour les cells : Rural peut devenir favela
 - Plots : les prix dépendent de la taxe de la ville, de la distance à l'eau, de la distance aux favelas
 - Eau : runOff et pollutionRunOff sont fonction de l'usage des cellules voisines
- ❑ Modifications :

□ **Modèle, Auteurs : Biomass, R.Courdier [Courdier et al, 2002], plateforme Geamas**

□ **Contexte** Géographique: La Réunion

Projet : Recherche

Objectif : Tester plateforme / Explorer scénarios

□ **Ressource(s)** Type : déchets organiques

Problème : coordination des échanges de déchets organiques

□ **Espace** Résolution : pas de grille

Etendue : ?

□ **Temps** Résolution : journée

Etendue : 10 mois

NIVEAU(X)		individuel	Groupes station traitement	Réseaux d'acointances
ENTITES	Spatiales	Plot LiveStockBuilding Platform Vehicule RoadSegment		
	Objets	LiveStock Crop StorageFacility ShippingFacility (chacun est associé à une entité spatiale)	WasteTreatmentFacility	
	Sociales	Executive (n crop, m livestock, 1 storgeFacilty, shippingFacilty vont et viennent)	WasteTreatmentExecutive Group (n Executives, 1 WasteTreatmentEx)	System
PROCESSUS	N a t.	Dynamique Crop	Croissance crop et besoin OM	
		Dynamique LiveStock	Production LiveStock et production OM	
	U s .	Gestion OM	Executive a rôles producteur, consumer et/ou shipper OM qui appellent à négociation si manque ou excès de OM	
	S o c i a l	Contraintes sur production OM	Group impose contraintes sur quantité, fréquence, destination OM à ses membres producteurs	
		Négociation s	Protocole de négociation entre producteur, consumer shipper. Réussite dépend possibilité transport et disponibilité	Entre membres d'un réseau d'acointance
Représentations internes				

Les dynamiques sont indépendantes les unes des autres, le temps est géré par évènements

- Scénarios : simulation avec 45 Executive.
 - d'abord la situation réelle sans unité de traitement,
 - puis une situation avec introduction d'une unité collective de traitement (Group)

 - Sorties :
 - Interface : graphes, messages échangés, données numériques finales, individuelles ou agrégées
 - Indicateur : surplus OM, OM transportées, OM traitées, négociations réussies

 - Validation :
 1. Sens commun : examen détaillé d'une simulation jouet (avec 4 Executive) par un agronome qui n'a pas été impliqué dans la construction du modèle. A permis de repérer (et corriger) des négociations sur quantités trop faibles, des incohérences entre temps de transport et distances...
 2. Simulation sur une configuration réelle. Permet de repérer des problèmes du au changement d'échelle (pb dans la gestion du temps quand trop d'agents)
 3. Validation par l'usage avec les experts : au fur et à mesure, sur des patterns d'exploitations généraux issus de leurs typologies

 - Couplage :

 - Réalisme
 - Données : une data base d'enquêtes sur 200 exploitations de La Réunion
 - Espace : configuration topologique réelle d'un îlet
 - Processus : pas évoqué

 - Prise en compte n.o. : Il y a au moins 3 niveaux de coordination dans le modèle :
 - Réseaux d'acointances. Décident de qui négocie avec qui. Représentés au niveau d'une entité macro représentant tout le système (niveau Macro de Geamas)
 - Groupes. Imposent des contraintes aux producteurs de OM (niveau medium de Geamas)
 - Espace. Le réseau des routes (connections entre les différents éléments spatiaux par les RoadSegment) influe sur les négociations
- Ces différents modes de coordination ont chacun leur formalisme de représentation, dérivant de Geamas.
- Différentiations comportements : Il y a des rôles OMProducer, OMConsumer, OMShipper dont la prise en charge dépend des ressources des agents. Ces rôles imposent des fonctions de satisfaction et des places dans les protocoles de négociation. Mais ils ne sont pas liés aux groupes et définissant encore un autre niveau

 - Diagrammes :
 - Diagrammes des classes sur les 3 couches de Geamas
 - Diagramme de séquence pour protocole de négociation. Les rôles apparaissent mêlés aux agents. Un peu ambigu.

 - Modifications :

Annexe B

Questionnaire utilisé lors des enquêtes dans la Drôme

B.1 Choix des agriculteurs rencontrés

Avant de commencer le séjour, lors de l'approche des agriculteurs par téléphone, il a été jugé plus simple de reprendre l'échantillon établi lors du séjour de Zanker [Zanker, 1999], qui avait effectué en 1999 un travail sur les modèles d'actions liés à la gestion individuelle de l'eau à l'intérieur des exploitations.

Cet échantillon se composait de 15 agriculteurs répartis sur les 3 réseaux et les accès individuels, certains croisant les différents types d'accès, d'autres n'en ayant qu'un seul ; il recouvrait en outre a priori une diversité de situations, tant au point de vue des stratégies d'irrigation que de l'appropriation des enjeux environnementaux. Étant donné la durée du séjour (12 jours), il était de toute façon illusoire d'espérer réaliser plus d'une vingtaine d'entretiens, chefs de réseaux y compris (ils n'avaient pas été enquêtés).

Il a finalement été réalisé 18 entretiens :

- 1 avec chacun des 3 présidents de réseau, et 1 avec l'ex-président de l'ADARII (Association des Irrigants Individuels) et nouveau président de la Chambre d'Agriculture.
- Sur les 14 agriculteurs, seuls 5 font partie de ceux qui avaient déjà été enquêtés. En effet, parmi les agriculteurs qui avaient déjà été enquêtés :
 - 1 a refusé l'entretien sous prétexte que les résultats de S. Zanker ont été utilisés contre les irrigants ;
 - 2 n'irriguaient plus (dont 1 qui était disposé à discuter des causes de son arrêt mais n'avait pas le temps) ;
 - 1 n'a pu être joint ;
 - les autres, qui pour la plupart faisaient du maraîchage, n'avaient pas le temps mais voulaient bien accepter un entretien après la saison ;
- le choix des 9 agriculteurs supplémentaires s'est fait à partir de listes d'adhérents fournies par les présidents. J'ai essayé de répartir au mieux les types d'accès :
 - M. Serre, de Crest-Nord avait présélectionné une dizaine de ses adhérents, qui en grande majorité font partie de son bureau ;
 - M. Bon, de Crest-Sud, a fourni une liste exhaustive. J'ai donc essayé de choisir des situations un peu extrêmes (gros débits et petites surface, l'inverse, ou situation moyenne), mais ai été limitée par la disponibilité des personnes ;
 - M. Crouzet, d'Allex-Montoison, un peu à ma demande, avait surligné quelques « jeunes

agriculteurs bien dynamiques » .

Le séjour de terrain ayant été initié par les rencontres avec les présidents de réseau, le temps a manqué pour rencontrer des irrigants ne pratiquant que l'irrigation individuelle. Les irrigants pratiquant le maraîchage, qui ne pouvaient accorder de temps durant l'été, sont également sous-représentés.

Il avait été prévu de retourner sur le terrain compléter les enquêtes et présenter le modèle produit en retour, mais l'orientation méthodologique prise par la thèse n'en a pas laissé le temps.

B.2 Guide d'entretien utilisé lors du séjour de terrain

Vous savez que le Cemagref travaille depuis quelques années sur la Basse-Vallée dans le cadre du SAGE sur l'évaluation des besoins et des ressources en eau pour l'irrigation. Cette année, nous voulons notamment évaluer la manière dont se serait déroulée la saison si les différents scénarios liés à l'arrivée de nouvelles ressources avaient eu lieu.

Vous avez déjà été enquêté par des étudiants du Cemagref en 1999 et 2000. En 1999, Sébastien Zanker s'est intéressé à la manière dont vous pratiquez l'irrigation dans votre exploitation. En 2000, Léo Brochier a cherché à connaître les informations dont vous disposez pour mener à bien votre irrigation, ainsi que celles que vous diffusez. Je suis aussi étudiante, et je m'intéresse plus largement à toutes les interactions qui peuvent avoir lieu autour de la gestion de l'eau, et les différents plans sur lesquelles elles se situent.

Cet entretien a donc deux buts : discuter

- pour alimenter les modèles utilisés lors des discussions au DAVD ;
- pour mon travail de recherche sur les interactions autour de la gestion de l'eau.

QUESTIONNAIRE :

1. GESTION DE L'EXPLOITATION

a) Evolution des pratiques/assolements – on parle surtout d'assolements

- ➔ Pouvez-vous me décrire votre assolement de cette année – quelles sont les rotations – les contraintes
- ➔ Depuis la dernière campagne, y a-t-il une évolution des pratiques agricoles ?
- ➔ (surface d'exploitation, surface irriguée, assolements, matériel)
- ➔ Quelles sont les justifications de cette évolution ?
- ➔ Sinon considérez-vous que vos pratiques ont évolué depuis ces 10 dernières années – Comment ? Pourquoi ?
- ➔ Est-ce que vous êtes nombreux à travailler comme ça dans le coin ? Comment pensez-vous que les autres perçoivent vos pratiques
- ➔ Comment évoluent les pratiques autour de vous ? assolements – carte
- ➔ Comment voyez-vous évolutions futures, pour vous et pour les autres ?

Sachant PAC....

b) Gestion de l'eau sur la campagne

- ➔ Comment se passe la gestion de l'eau sur votre exploitation cette année ?
Si nouveau : quels accès à l'eau – quel matériel, comment tourne-t-il, sur quelles cultures, quelle quantité...
- ➔ Si tour d'eau : comment est-ce que vous décidez de votre tour d'eau en début de campagne ? Est-ce que vous êtes contraint par votre équipement ou vos débits souscrits ?
- ➔ Que faites-vous en cas de vent ou de pluie ? Comment rattrapez-vous ?
- ➔ En cas de restriction, si vous devez sauter un jour : comment rattrapez-vous, y a-t-il des cultures prioritaires, contrainte forte ? Seriez-vous amené à arroser par temps de vent par exemple ?
- ➔ Est-ce que le travail sur d'autres cultures peut vous amener à ne pas arriver à respecter votre calendrier d'irrigation ?
- ➔ Est-ce que votre gestion de l'eau a évolué ? Et celle de vos voisins ? Croyez-vous des efforts encore possibles ?
- ➔ Avez-vous déjà constaté que vos équipements consomment différemment des valeurs nominales ? Pensez-vous possible ? A quel point ?

c) Par rapport aux différents types d'accès (si il y en a)

- ➔ Pourquoi avoir différents types d'accès à l'eau ?
- ➔ Influent-ils sur l'assolement ? Les conditions de restriction ou les contraintes sont-elles très différentes ?
- ➔ Certaines parcelles peuvent-elles être irriguées par différentes bornes ? Si oui utilisez-vous cette possibilité ?

d) Informations pour les prises de décision : début de l'irrigation, assolements, nouveaux équipements

- quelles informations utilisez-vous ? papier, expertise personnelle, discussions...
- est-ce que vous confrontez/ partagez vos infos avec d'autres ?
- utilisez-vous plus d'information qu'il y a quelques années ? auriez-vous besoin d'autres informations ?

2. PERCEPTION DU MANQUE D'EAU

- Est-ce que vous percevez des problèmes de manque d'eau sur la vallée ?
- Avez-vous eu à faire face à des restrictions ces dernières années ? Si oui quelles conséquences ? Avez-vous eu des pertes de rendement liées à un manque d'eau ces dernières années ?
- Les autres agriculteurs ont-ils des problèmes de disponibilité ?
- Qu'est-ce que vous pensez pour les autres usages ?
Si tourisme : est-ce que vous êtes lié au tourisme ?
- Etes vous satisfait avec le service d'approvisionnement en eau que vous recevez ? Quelles attentes auriez-vous d'un service plus cher, donc d'un nouvel approvisionnement ? et les autres ? est-ce que vous pensez que ça résoudra les problèmes ?

3. GESTION DE L'EAU DANS LE(S) RESEAU(X)

- si restrictions : comment se mettent en place les tours d'eau ? comment s'arrêtent-ils ? Medium de l'information ?
- pensez-vous que c'est une solution juste ? injuste pour qui ? considérez-vous que ce sera un handicap fort pour votre exploitation ? et pour les autres ?

→ comment se passent les relations avec les autres adhérents ?

beaucoup de réunions ? quelle fréquence ? quelle participation ? quelles décisions y sont prises ?

exemple d'un problème important qui a été résolu en réunion ? ou pensez-vous qu'en fait les problèmes se règlent plutôt hors réunion ? dans quel cadre ?

→ quelles sont vos relations avec les autres réseaux ?

4. LIENS SOCIAUX « FORMELS »

→ Etes-vous impliqué activement dans la vie d'organisations / associations (agricoles ou non) – à commencer par le réseau d'irrigation ?

→ sous quelle forme, combien de temps ça vous prend, comment y décrieriez vous votre rôle ?

→ pourquoi, comment y êtes vous venu, qu'est-ce que ça vous apporte, est-ce que les discussions sont enrichissantes ?

→ facile à concilier avec votre activité d'agriculteur, complémentaire ?

→ comment pensez-vous que les autres perçoivent ce rôle – et vous dans ce rôle ?

→ Ce rôle vous permet-il d'avoir accès à des informations que vous utilisez dans votre activité d'agriculteur ? dans quelle mesure est-ce que vous les diffusez ? Et inversement y a t-il des infos liés à votre activité agricole que vous préférez ne pas communiquer – ou que vous utilisez ?

→ Cette organisation a-t-elle une position sur l'irrigation ?

→ avez-vous d'autres activités qui pourraient rentrer en concurrence avec votre métier d'agriculteur ? Comment est-ce que vous gérez ?

→ êtes-vous membre de structures agricoles collectives : Chambres d'Agriculture, syndicats, coopératives ?.. les considérez-vous comme des lieux d'échange, de prise d'info, de capitalisation ? (de produits ou de force)

5. LIENS SOCIAUX « INFORMELS »

- ➔ êtes vous impliqué dans la vie de votre commune, de votre voisinage ? est-ce que vous y parlez d'eau ? comment y êtes-vous perçu en temps qu'agriculteur ?
- ➔ avez-vous beaucoup d'échanges avec d'autres agriculteurs ? de quelle sorte ? vous arrive-t-il de collaborer, de vous entraider, de vous conseiller mutuellement, de mettre en commun vos expériences?...
quel contexte ? (voisinage, CA, réseau...)

6. SPATIALITE

- ➔ est-ce que votre exploitation est morcelée ? Contraintes liées à son morcellement ? à sa situation, sa taille ?
- ➔ est-ce que vous entretenez plus spécialement des relations avec les exploitants des parcelles limitrophes aux vôtres ?
- ➔ recoupement avec d'autres structures ? ?
- ➔ amont/aval ? Rive droite/rive gauche ? problèmes inhérents ?

POUR LES PRESIDENTS DE RESEAUX COLLECTIFS

- abonnés et assolements

7. Sur la gestion « physique » du réseau

- ➔ gestion des différents approvisionnements : connexion, déconnexion, comment est-ce que ça changerait avec de nouvelles ressources ?
- ➔ si restrictions : comment se mettent en place les tours d'eau ? comment s'arrêtent-ils ? Medium de l'information ?
pensez-vous que c'est une solution juste ? injuste pour qui ? considérez-vous que ce sera un handicap fort pour votre exploitation ? et pour les autres ?
- ➔ est-ce que certains adhérents s'arrangent entre eux pour échanger des tours/bornes d'eau... ça pose des problèmes ? Et ceux qui ont plusieurs types d'accès ?
- ➔ avez-vous déjà constaté des fraudes ? comment vous gérez ça ? comment vous faites pour qu'il n'y ait pas de problème ?
- ➔ Etes vous satisfait avec le service d'approvisionnement en eau que vous fournissez ? Quelles attentes auriez-vous d'un service plus cher ? et vos adhérents ? est-ce que vous pensez que ça résoudra les problèmes ?

8. Sur sa vision de président

➔ comment est-ce que vous décririez votre rôle de président de réseau ?
Vous prend-il beaucoup de temps ? Est-ce que c'est très important pour vous ? Etes vous satisfait de votre réseau ?
Vous déléguez des choses ? Pas handicapant pour votre exploitation ?
Y a-t-il des informations auxquelles vous avez accès en temps que président et que vous préférez ne pas divulguer à vos adhérents ?

➔ quelles sont vos relations avec les institutions : la DDAF, la CA, le DAVD, la CLE...
et avec les autres réseaux ?

➔ comment se passent les relations avec les adhérents ?

beaucoup de réunions ? quelle fréquence ? quelle participation ? quelles décisions y sont prises ?

comment se propage l'information ?

exemple d'un problème important qui a été résolu en réunion ? ou pensez-vous qu'en fait les problèmes se règlent plutôt hors réunion ? dans quel cadre ?

Annexe C

Données sur la Drôme - Campagne de terrain juillet 2002

C.1 Acteurs

Le tableau présente les principaux acteurs intervenant autour de l'irrigation évoqués dans les différents entretiens.

Agriculteurs	
3 Réseaux d'irrigation	Crest-Nord (CN), Crest-Sud (CS) et Allex-Montoison (AM)
SICB	Réseau du canal de la Bourne Vend de l'eau aux réseaux rive droite, et est un cadre de rencontre inter-réseau : coordination de l'opération Irri-Mieux, discussions autour des Juanons
Chambre d'Agriculture	Envoie circulaires just'azot et Zoom
Coopérative: plantes aromatiques de Vercheny	Principal acheteur de plantes aromatiques, co-administrée par agriculteurs de la basse vallée. En développement et pousse pour regrouper ses approvisionnements
Coopérative : tomates de Camaret	Principal acheteur tomate industriel, en voie de faillite
Semencier : Valgrain	Principaux contrats maïs semence
Association environnementale : Frapna	Conflit ouvert avec les réseaux en 90 (procès) Gérait la réserve des Ramières. Situation apaisée aujourd'hui
Reserve naturelle des Ramières	2 des agriculteurs rencontrés sont membres de sa commission de gestion au titre de l'association de défense des usagers des ramières
Petites cumas (5-6 adhérents sur quelques machines)	
SMARD	Maitrise d'ouvrage et gestion des réseaux de la vallée
SNCF	S'oppose aux Juanons tant que de meilleures garanties de sécurité ne sont pas amenées. Le nouveau TGV traverse CN et CS. Les compensations ont permis à CN de moderniser des prises et de résoudre des problèmes de pression. Les expropriations ont remembré certaines exploitations
DAVD	Porte le SAGE, organise réunions de concertation et de gestion de crise
Préfet	Décète la mise en place des mesures de gestion de crise.
CDOA (Commission Départementale d'Orientation Agricole)	Commission composée de professionnels de l'agriculture, mais aussi de représentants de l'économie et de la société civile (environnement, pêcheurs, artisans...). Statue sur la viabilité de projets d'installation, d'agrandissement, de reconversion.. par rapport à l'attribution d'aides publiques.
Cuma départementale castration maïs	Le Val de Drôme représente 1 secteur de la Cuma, avec 3 machines à 22 ha/jours en 2002

C.2 Pratiques individuelles

Le tableau suivant présente synthétiquement les éléments essentiels des pratiques des agriculteurs interviewés. Quelques explications sur les colonnes :

- la 1ère colonne référence l’agriculteur ;
- surface : en hectares, surface totale (surface irriguée) ;
- eau : Accès disponibles. CN pour Crest-Nord, AM pour Allex-Montoison, CS pour Crest-Sud, EL pour Étoile-Livrons. Les données sur les souscriptions sont entre parenthèses si disponibles : (cubage en m^3/h /surface en ha).
Si disponible, les équipements sont aussi listés : CI pour Couverture Intégrale, enr pour enrouleur ;
- cultures : assolement et surface en hectares si disponible + données sur l’irrigation de chaque assolement si disponibles (accès et équipements utilisés) ;
- pluie : réaction à la pluie. Mêmes initiales que pour les doses ;
- pratiques : doses apportées. M pour Maïs, MS pour Maïs Semence, T pour Tomate, TI pour Tournesol, O pour Oignon, HA pour Aromatiques, A pour Ail. L’appréciation moyenne portée sur l’agriculteur par rapport à sa contrainte en eau est également reportée si disponible (confortable / tendu), ainsi que les informations utilisées pour piloter ;
- rôles : responsabilités détenues par l’irrigant.

Les informations sur les 7 derniers agriculteurs (lignes grisées) proviennent des entretiens réalisés par S. Zanker en 1999.

n°	Surface	Eau	Cultures	Pluie	Pratiques	Rôles	commentaires
1	?	AM 2/3 Forage profond 1/3	Céréales Oignon blanc et rouge (CI – terres légères)	80 mm : 2 tours (M) 1 tour (O) 8 mm : 2 jours (O)	Confortable grâce au forage O : 20 mm / 5 jours début juin → fin juil/début août	Président d'un réseau Estime qu'une responsabilité ça suffit	Oignon activité principale. Forte valeur ajoutée mais ne tolère pas de stress. A ses propres marchés.
2	27 (15.5)	CS(35/8) CN (5/1.5) CI 5 ha + 1 enr	6 Maïs semence 2 tournesol 1.5 maïs conso (CN) + 75 chèvres	25 mm : arrêt 3-4 jours (MS) 50 mm : 1 tour (MS)	confortable M : 35 mm/sema → 20 août Passe en 80 h, 5 jours T1 : 1 * 35 mm Tensiomètre pour démarrage	Vice-président réseau (ex) Elu municipal (ex) Trésorier et responsable de zone dans cuma castration Vice-président coop laitière Administrateur coordination coop laitières	Grosse implication collective en tant que responsable et en tant qu'utilisateur : toute sa production passe par CUMA et coopératives Voudrait passer ses derniers ha de maïs conso en semence mais pas d'îlots sur CN
3	46 (14 AM)	AM (100/12) EL CI 14 ha + 1 enr	12 maïs (6 AM) 3 tournesol semence (EL) tomate (en baisse)	90 mm : 2 tours (M et T) Pas de reprise tant que le sol a pas séché, pas de reprise prévue, ça dépend du temps. Concertation avec les voisins	Confortable Pourrait tenir 36 h d'arrêt sur AM		Travaille beaucoup avec ses voisins (îlot tournesol, achat groupé équipement pour tomate) Vend en coopérative 1 an retraite
4	34 (34 CS)	CS (115/ 20) goutte à goutte / courgette	7 ail semence 15 maïs semence (4 îlots – 8 seuls) 3 kiwis courgette semence Sorgho 2 maïs conso (non irrigué) terres profondes élevage porcs	80 mm : 10 jours (M) (calcule ETP entre 3 et 5mm et regarde voisins)	confortable : que la nuit 50m3/h pour kiwis (antigel) puis 12 h tous les 10 jours	Bureau CS Elu municipal	Jeune – innove sur une culture : goutte à goutte sur tomate puis sur courgette Loue bornes pour ail semence Travaille avec son frère PMPOA (programme agro- environnemental maîtrise effluents d'élevage)
5	43 bio	CN (3 bornes : 1 fermée, 1 à 2 jours d'arrêt, 1 sans jours d'arrêt) AM bout de ligne	6 maïs 10 soja 7 aromatique 10 blé 6 luzerne	Météo : si pluie annoncée, retarde irrigation	Confortable sur CN (finit en 3 jours). Tendu sur AM (arrosage de nuit impossible) HA : 5-6 mm ts les jours mai- juin M : 35-40mm/sem Démarrage : regarde ceux qui ont tensiomètre – part 1sem après	Responsabilités dans la coopérative de plantes aromatiques	Par rapport au fait qu'il soit en bio : pense qu'il utilise globalement autant d'eau (arrachages d'herbe) mais moins en saison
6	142 (30 15)	AM (25/5)	10 maïs irrigué	Météo : si pluie annoncée	M : Moins de 10 passages		Cultive son indépendance

		Ruisseau (25/5) EL (9/1.5) Forage (15/ 3) Puit (20/4h) goutte à goutte / aromatiques	12 maïs non irrigué (terres profondes) 5 aromatiques (terres drainantes sur EL) 2 ail/pois terres profondes	retarde irrigation 80 mm : arrêt 10 jours (M) utilise ETP (Zoom) regarde voisins « qui sont en avance »	« bien costauds » / an Passent en 5 jours (80h) N'arrose pas vent Démarrage (M) quand bordures jaunissent		Marché anglais pour aromatiques Parcellaire très divisé → oublis d'ouvrir ou de fermer fréquents Echangeaient borne EL contre paille mais le réseau n'accepte plus les échanges informels Puit géré en commun avec voisins : auto-restrictions quand niveau baisse
7	100 (40)	AM (200/30) CN (40/5) Forage 8 ha CI maïs / CN (interdictions)	25 maïs 6 aromatiques (new) pois (rotation maïs) 9 tournesol semence	10 mm : 2 jours 50 mm : « 1 bonne semaine » + 1-2 jours sol profond - 1-2 jours sol léger	M : 30/35 mm selon sol – 2500 à 3000 m3/an (relevé à la borne). Tourne en 5 jours Tl : 1 fois avant floraison maïs pas toujours Ajuste avec ETPs Zoom	Responsable Association chasse Elu municipal Allex Comité de gestion Ramières	parcellaire divisé (gros cubage) Pas CTE – trop de papiers Habite au bord de la Drôme 2 jours d'arrêt en juillet/août sur forages
8	60 (?)	CN	Maïs Ail semence Céréales		N'utilise que moitié souscription 1 jour d'arrêt CN passe avec 2 jours de moins regarde voisins qui ont sondes	Bureau CN Elu municipal Eurre	100 m isolement pour ail semence parcellaire divisé (gros cubage)
9	40 (20)	CS (105/20) Goutte à goutte (5.5 ha), CI (12 ha) + 1 enr neuf fixe (3 ha)	Maïs semence Tomate industrielle Oignon semence Blé	56 mm → 7 jours à un endroit et 10 jours à l'autre moins contraint. envisage tensiomètre pour redémarrer après la pluie	A réduit sa conso de 1/3 avec goutte à goutte Regarde ETP Zoom : allonge temps irrigation si forte ETP Tourne en 4 jours	Bureau CS pour Divajeu	CTE : - 7 ha arrosage en été, remplacé maïs par oignons et blé A voisin qui l'empêche de faire tournesol semence
10	70 (12) +60 pâture	CN (30/5h) SISEV (7 ha) 1 puit 7 m3 non utilisé depuis 3 ans 1 enr	Rotation blé, orge, soja, maïs, pois, luzerne Elevage brebis (300 têtes) Terres profondes	100 mm → 2 semaines	Rentabilise irrigation / pois au printemps puis maïs en été 1.5 jour arrêt CN irrigue vent jour et nuit car 1 seul enrouleur commence feeling + voisins regarde Zoom maïs serré	Bureau CN Membre CDOA Responsable FDSEA Conseil coopérative départementale céréales	Reconversion bio (CTE bio – élevage) A arrêté tomate industrielle (10 ha) – n'utilise plus son goutte à goutte et sa CI Prend des stagiaires → suivi exploitation
11	84 (15)	CN 1 borne SISEV Vanne(s) volumétriques 35 m3 + CI	Maïs Pois Betterave 1.7 ha + polyculture céréales élevage poulets porcs sols légers	80 mm : 1 sem puis complément par rapport à ETP va parfois regarder son sol pour réajuster	Irrigue 15 ha en été maïs plus au printemps Betterave juin au 20 juillet M : 40-42 mm/ sem Betterave : 20% de moins 1.5 jours arrêt CN tourne sur 5.5 jours avec 2 passes de 8 à 10 h	Bureau CN Bureau Vasoleil (volailles)	A arrêté tomate, trop fragile, trop travail Va aux réunions du CCVD Emprunte borne CN pour irrigations de printemps

					programme durée passe avec Zoom		
12	60	CN 5 ha SISEV Enrouleurs	17 maïs 7 pois 20 blé 2.5 tournesol sorgho (abandonne)	Avec tensiomètre Attend et réagis au jour le jour sur CN (seulement 3 passes) mais pas sur SISEV (7 passes)	Arrose pois 2 fois 2 enrouleurs pour M pbs de pression sur CN → ne peut arroser que moitié surface souscrite quantités au feeling maïs arrosages courts et fréquents (terres hétérogènes)	Secrétaire CN Entreprise travaux agricoles	Passé en GAEC avec ami d'enfance → 110 ha avec aromatiques travaux agricoles (moissons) → n'arrive pas à arroser correctement Ira mieux avec GAEC Cherche contrats Parcellaire morcelé → pas semence CTE Va aux réunions CCVD Commune où toutes les exploitations ont été reprises par les jeunes il y a 10 ans
13	134 (63)	CN (330/ 40) AM (30/5) Forage (80/18) Enrouleurs / pois 30 ha CI vannes automatiques	20 ail semence 20 maïs conso 10 pois + blé, tournesol conso	Adapte dose → 20 mm Après 20 mm arrêt « un peu »	A : 2 à 6*30 mm entre fev/mars et juin (ail de printemps) ; 1*30 en nov (ail d'hiver). M : lance selon zoom, 40 mm/sem → orages fin août 2 positions de 8 h la nuit (vannes programmables) arrêt dimanche (ou jour CN) si interdiction : 3*8 larges sur forage (ail parce que pas de contraintes de saison d'ouverture)		Travaux TGV → rassemblement débits Assolements : ail mobilise terres irrigables et demande précédent blé et gros débits (sécurité) GAEC Ont réduit de moitié le maïs suite à signature CTE.
14	10 (5)	Maïs Légumes Volailles CI	Pompage 18 m3/h		M : Commence quand plante passe les genoux 12 h / nuit / 7 jours = 30 mm irrigue aussi de jour si trop sec		Maïs ! pour volailles
15	40 (30)	CS (130/ 20) Puit pour hiver Enrouleurs – aspersion pour légumes	17 Maïs 7 Pois 4.5 Légumes Dindes	20 mm → 1 ou 2 jours sauf si retard	M : démarre au tensiomètre, pas avant juillet 40 mm / 10 jours (8 passages) irrigation 7 jours / 7 T comme M Serres : 30 mm /sem (passages de 5-6 h)		
16	76 (60)	CN 14has AM 8has SISEV 12has	15 Légumes 7 Maïs 42 Abricots	20 mm → 1 jour 35 mm → semaine	Légumes : 2h/jour ts les jours sauf pluie d'avril à fin juillet M : démarre 20 juin – 8h, puis		Parcellaire morcelé → irrigation 4h de travail par jour Matériel amorti - envisage de

		3 puits 47m3/h CI 50 ha goutte à goutte légumes enrouleur blé	Poulets		10h juillet puis 12h 10 juillet – arrêt fin août 3 jours / CN → fait du 24/24 4 jours AM et forages : !nuit		réduire le maïs
17	65 (18)	AM (90/12) CI 10has : 6 maïs, 4 tomate 2 enrouleurs	10 Maïs 8 Tomate + blé, tourn, pois, colza	20 mm → 1 jour 40 mm → 1 tour arrête si vent se lève	Tourne en 6 jour en prenant en compte vent et pannes 6* 12h /CI - 4*20h /enrouleurs maïs : tensio puis 48mm/sem tomate : 38 mm/ sem fin juillet : tomate a tours de 5 jours ; si interdiction, prioritaire / maïs qui passe à tous les 10 jours		Irrigue plus que surface souscrite mais AM tolère
18	52 (16)	CS (70/15) CI / tomate – enrouleurs	13 Maïs semence 3 Tomate 8 Tournesol semence 8 Pois +blé..	20 mm → 1 ou 2 jours météo → attend si pluie	M : démarre 10 feuilles + pas pluie / 10jours - 25-30 mm ts les 8 jours (contrôle pluviomètre) – tourne en 3 jours - arrêt 20 août T : 30-40 mm / 10 jours – tourne en 3 jours - arrêt 15 août Tournesol : 1 irri si possible Irrigue la nuit sauf vent		
19	117 (75)	Ind (350/70) AM CS CI + enrouleur dépannage	49 Maïs 17 Tourn sem 5 Tournesol 25 Ail + blé		M : Démarre qd terre sèche maïs finit d'abord ail puis 40mm/sem –tourne en 8 jour que la nuit sur puit 250m3 TS : 1 ou 2 * 40mm Ail : 1 à 3 irri		
20	34 (34)	CN (140/22) CI 16h maïs /arom avec vannes volum Enrouleurs électroniques	5 Maïs 12 Aromatique 5 Ail semence 4 Pois 5 Céréales		M : 40 mm mi—juillet à mi- août, 30-35 sinon Démarrage avec Zoom + terre sèche HA : démarre début juin 12mm puis 20/30mm A : pilotage tensiomètre 1 jour d'arrêt sur CN		Peut s'arranger avec voisin pour échanger des bornes selon jours d'arrêts

C.3 Pratiques et motivations

Le tableau suivant liste des pratiques relevées dans les entretiens et les relie à quelques types de motivation identifiés : productivisme, irrigation raisonnée, opportunité, économie, contrainte structurelle, travail, sécurité, conscience écologique. Ces pratiques concernent l'utilisation de l'eau, des équipements et sources d'information, et le choix de l'assolement. Les références des agriculteurs sont celles introduites dans le tableau précédent.

	Utilisation de l'eau	Assolements	Equipements / Information
Productiviste	Gaspillage <i>L'agriculture a vu (..) l'explosion des rendements. On nous demandait de produire tant qu'on pouvait. Alors on s'est mis à gaspiller l'eau incroyable (président CN)</i> <i>Y a 10-15 ans, le prix du maïs était élevé, et quand on arrosait, on arrosait, on ne se posait pas de questions, et si il y avait 10 mm de trop, y avait 10 mm de trop(...) des champs éloignés, on arrosait 12 heures de suite. On y allait une fois le matin, une fois le soir, et puis voilà. Mais ça c'est fini, il n'y a plus personne qui fait ça. (A12)</i>		
Raisonné / innovation	Changement de comportement : utilisation raisonnée de l'eau les cultures intensives étant remises en cause, la façon de travailler, cette surproduction qui est structurelle maintenant, ont fait que beaucoup de gens se sont posés des questions. <i>Bon après on s'est mis à arroser un petit peu plus intelligemment. (président CN)</i> <i>Les jeunes y ont mis rapidement en application un peu ce qu'on leur avait dit à l'école, et ça a vite changé sur le coin. (A12)</i> Irrigation « mathématique » <i>Ca sert à rien d'en mettre plus. C'est pas compliqué : l'ETP est de 5mm/jour, par 7 ça fait 35 mm puis selon le coefficient (...) si je programme sur ma vanne volumétrique 300 m3, elle fait 35 m3/h, elle met 11 heures pour faire la passe, c'est mathématique, et puis point à la ligne (A11)</i> Mieux irriguer : moins en instantané, mais autant au total <i>Il y en a comme moi qui en mettent un peu plus parce qu'ils font des cultures de printemps. Mais il y en a qui arrosent 12 heures d'affilée sur du sable.. Moi le maximum que je mets c'est 8 heures, et encore quand c'est très sec. On essaie de faire des petites irrigations et de revenir plus souvent (A10)</i> La technique ne fait pas irriguer moins <i>ceux qui sont à la pointe de la technique consomment toujours autant. (A5)</i>		Goutte à goutte : réutilisable <i>on s'était mis au goutte à goutte l'année dernière [Q : pas d'hésitation à investir ?] si ça n'était vraiment qu'une année, et qu'après on ne peut plus s'en servir sur autre chose que la tomate, je ne l'aurais pas fait peut-être. Mais là on peut facilement le recycler (A4)</i> Goutte à goutte : économies d'eau <i>Cette année j'ai acheté du goutte à goutte. Parce qu'on disait que ça réduisait 1/3 la consommation (A9)</i> Jeunes agriculteurs : recherchent informations pour maîtriser apports <i>ce qui serait bien c'est mettre des tensiomètres (A4)</i> <i>on tient compte aussi de l'ETP (...) on travaille pas mal avec la météo aussi. Ca se peut que j'achète des tensiomètres. J'ai bien envie pour les plantes aromatiques (A6)</i> Tensiomètre : économies <i>Avec l'aide des tensiomètres et tout, on arrive à peu près à économiser beaucoup. En verger, par exemple nous on a diminué de 40%, rien qu'avec les tensiomètres (Président CN)</i> Bulletin chambre agriculture <i>Ah mais je suis abonné au Zoom. Tous les mardis je reçois le Zoom, je vois mon ETP, le coefficient, le stade de mon maïs, tac tac et puis ça y est ! (A11)</i> PMPOA <i>pour la maîtrise des apports, c'est génial ; on a un appui technique, même si on a déjà nos connaissances, ça permet de voir différentes personnes et comment les choses évoluent (A4)</i>

	Utilisation de l’eau	Assolements	Equipements / Information
Opportunité		Semences : Possibilité isolation <i>C'est une opportunité. Ça fait quelques années qu'on voulait en faire dans le coin, mais on arrivait jamais à avoir l'isolation, alors cette année, j'ai réduit et j'ai mis du tournesol semence à la place. (A3)</i> <i>Cette année sur le tournesol conso, on nous a mis une prime céréale sèche qui a baissé la prime quasiment de moitié, donc il s'en est fait très peu, et c'était encore plus facile d'avoir les isolements. (A7)</i> Plantes aromatiques : entraînement coopérative <i>il y a eu une opportunité dans le secteur. Y a pas mal de collègues qui s'y étaient mis depuis quelques années, (...) ça les intéressait de regrouper les cultures, ça permet aux camions d'éviter de faire trop de navettes, au matériel de récoltes de passer d'un champ à l'autre sans faire des kilomètres (...) vu qu'on avait arrêté la tomate (...) ça permettait de faire une autre culture spécialisée. (A7)</i> CTE : entraînement et opportunité <i>Le CTE c'était la bonne aubaine, j'ai enlevé 7 ha d'arrosage. J'ai fait du blé et des oignons à la place du maïs. On est 3 rien que sur Divajeu. On s'y est mis tous ensemble à 6 mois près (...) sur les trois on se connaît bien (...) je voulais réduire mon eau. Donc ça tombait assez bien (...) par rapport au matériel, j'étais juste. (A9)</i> <i>(passage au bio) On a toujours fait des binages – on a toujours fait du plus ou moins raisonné (...) il y a des opportunités avec les CTE, donc c'est avant tout un aspect économique (CTE bio et ovins) (A10)</i>	
Economie	Economie d’eau = économie d’argent <i>Dans les réseaux collectifs (...) entre la location de la borne et le prix du m3, par rapport à un individuel, ils ont déjà été sensibilisés par le prix. (A1)</i> <i>Les mètres cubes que je ne consomme pas, je n'ai pas besoin de les payer (A11)</i> Frais fixes collectif : il faut utiliser un minimum les bornes <i>J'essaie d'utiliser l'eau parce que je paie les charges. (A12)</i> <i>(sur le fait de ne pas tout irriguer) c'est une question d'équipement un petit peu, puis de rentabilité. Le maïs y va passer à 70 ct, donc faire 120 quintaux de maïs en passant 4000 m3 d'eau, on commence à se poser des questions (...) on a quand même les frais fixes sur les bouches, donc à la limite il vaut mieux les faire tourner avec un minimum de m3, alors que les forages, si on ne s'en sert pas, ils ne nous coûtent rien (A7)</i> ..ou un maximum <i>On essaye d'utiliser le contrat pour revaloriser au maximum les charges fixes. On fait de la culture irriguée de printemps, pois faverole, et on enchaîne sur le maïs l'été (la tomate avant) pour rentabiliser au mieux la ressource.(A10)</i>	Marchés et assolements <i>la tomate pour l'industrie (...) c'est en train de se casser la figure. On s'était lancés sur la tomate, ça marchait bien, on s'était équipés, on avait augmenté les surfaces (...) maintenant (...) on est obligé, en fait surtout les plus jeunes, y sont obligés de chercher autre chose.. (A3)</i> <i>On a fait de la tomate de bouche. J'avais des marchés, puis les prix ne se sont pas tenus, en plus ça demande beaucoup de travail. C'est pour ça cette année on a fait la courgette. Normalement on devrait continuer. (A4)</i> Primes et assolements... <i>on ne sait pas. C'est par rapport aux primes que ça va évoluer (A9)</i> <i>Depuis la PAC on fait un peu plus de pois du fait qu'on a la prime sur le pois (A11)</i> <i>(sur le maïs) Y a eu un tassement à cause des primes (...) les gens (...) qui en avaient marre de courir après un enrouleur, au lieu de mettre 3 hectares, ils en mettent 2. (A1)</i>	Goutte à goutte <i>ça permet de faire des économies, et un meilleur arrosage aussi (A6)</i> Pas rentable remplacer matériel <i>on a des matériels qui vieillissent, le prix du maïs ne nous incite pas à changer le matériel, donc on garde nos vieux trucs qui tombent en panne (...) changer l'équipement, mettre de la couverture intégrale pour pouvoir tout arroser, au prix du maïs actuel (...) je suis pas sûr</i>

	Bio et économie d’eau <i>(bio) balancer plus d’eau alors qu’on ne va pas produire énormément ça n’est pas la peine. (A10)</i> CTE et économie d’eau <i>on fait un CTE, ok il y a des compensations, mais le jour où ça s’arrête, on ne peut plus le faire (A1)</i> Irrigation hors saison <i>Au niveau du réseau d’irrigation, on voudrait qu’il y ait beaucoup plus de gens qui arrosent à ce moment. Pour aider à amortir le réseau, c’est important que l’on consomme de l’eau, et que l’on n’en consomme pas en période difficile (A2)</i>		<i>de m’y retrouver (A12)</i>
Contrainte structurelle	Pertes de charges en bout de ligne <i>je ne peux quasiment pas arroser la nuit, parce que tout le monde arrose la nuit, et vu que je suis en bout de ligne, quand tout le monde ouvre le soir, moi je ferme (A5)</i> <i>y a des champs où j’ai demandé 5 ha d’irrigation et finalement je n’y mets que 2.5 ha de maïs parce que je manque de pression (A12)</i> Surcharges réseaux les lendemains de mistral <i>Le gars qui a du confort (..) si ça souffle, il se dit j’attends que ça ne souffle plus. Mais le jour où ça ne souffle plus, il arrose à fond. D’ailleurs c’est après les jours de vent que l’on a des problèmes sur nos pompes (A2)</i> Exploitation dispersées : sous-utilisation cubage <i>On a une exploitation qui n’est pas regroupée du tout. (...) chaque bouche d’irrigation ou chaque forage correspond à 1 ou 2 ou 3 parcelles. Donc l’année où sur ces parcelles-là on fait une céréale, ben ça n’est pas utilisé. (A7)</i> Goutte à goutte : jours d’arrêt inappropriés <i>le jour d’arrêt des fois je ne le fais pas parce que le goutte à goutte normalement c’est tous les jours (A9)</i> Qualité sols : pilotage différent de l’irrigation <i>On a une marge de manœuvre parce que nos terrains tiennent bien l’eau (A10)</i> Sols hétérogènes : nivellement par le bas <i>on les met (les tensiomètres) dans les endroits les plus mauvais des champs. (..) mais on ne t pas inonder le bas pour être sur d’arroser le haut (..) on peut ne pas faire aller l’enrouleur jusqu’au bout, ou le faire aller un peu plus vite là où le terrain est meilleur (...) on essaye faire des petits arrosage et d’y revenir plus souvent (...) les terres à bon stock s’adaptent à des petites doses alors que les petites terres s’adaptent pas à des grosses doses. Faut aligner sur les mauvaises et puis voilà (A12)</i>	Cultures sous contrat <i>l’ail est une culture qui se prévoit à l’avance, il faut avoir les marchés/contrats (A2)</i> <i>C’est les semenciers qui décident. . Vous, vous demandez 10-15 ha et y peuvent n’en donner que 7. Ça peut changer chaque année, et si ils disent 20% à tout le monde, c’est 20% (A9)</i> Sols et assolements <i>les assolements, c’est plutôt en fonction des sols. C’est vrai que sur Crest on a des terres très argileuses, très rudes, ça faisait 4 ou 5 ans qu’on avait du maïs, il fallait arriver à faire une rotation, on l’a fait cette année. (A7)</i> <i>J’ai des sols moins profonds, mais j’évite de mettre des cultures irriguées dessus. (A10)</i> Ilots et secteurs <i>Ici pour faire des ilots, c’est très difficile (...) il y a des gens qui ont des grandes surfaces en maïs. Ils ne veulent pas passer en semence. (A9)</i> <i>nous c’est éparpillé (...) les lots les plus gros, il y a 12 ha (..) il y a des maïs partout autour, et ils n’ont pas envie de faire de semence (..) sur Divajeu, il paraît que ça marche super.. Ici ça n’est pas rentré dans les mœurs (A12)</i> Pas 2 cultures d’été à la fois <i>du maïs j’ai diminué certaines années (..) où on faisait de la tomate, donc culture d’été, ce qu’on lui apporte, on peut pas l’apporter au maïs (A11)</i>	

	Utilisation de l'eau	Assolements	Equipements / Information
Sécurité	Moins d'irrigation pour plus de sécurité <i>depuis 2-3 ans, on préfère avoir un peu moins de surface à l'irrigation et être sur de pouvoir irriguer ce qu'on a planté (A7)</i> Cultures de pointe : sécurité indispensable <i>(sur l'oignon) on valorise bien l'eau (...) mais en contrepartie, c'est une ressource absolument indispensable. (A1)</i>	Aversion au risque <i>Je préfère rester dans la grande culture que de continuer certaines cultures spécialisées qui sont des cultures à risque (A11)</i> Diversification <i>on veut diversifier parce que si une année l'ail ne marche pas... (A4)</i> <i>(les plantes aromatiques) on a trouvé des débouchés. Puis aussi c'est pour permettre mon installation (...) c'était plus une histoire de diversification. (A6)</i>	
Travail	Collectif plutôt qu'individuel <i>on avait un accès individuel avant le réseau mais on ne s'en sert plus, avec le réseau c'est 10 fois plus facile (A4)</i> L'irrigation, c'est beaucoup de travail <i>L'arrosage c'est une galère. Vous faites une saison (...) vous ne vous posez plus la question de savoir si le mec il gaspille de l'eau par plaisir. Moi je suis plus aussi gaillard pour aller traverser un maïs tout mouillé pour régler un enrouleur (A1)</i> <i>moi 15 ha de maïs, ça représente 3 enrouleurs à mettre en route ; y en a pour ½ heure par enrouleur, donc c'est 1h30 par jour. Mais il y a une panne, il y a le réseau qui n'a pas de pression ce jour là.... Il y a plein de facteurs limitants, et ça fait quand même beaucoup de travail. Eric pour s'occuper de ses maïs et puis des miens, c'était ½ journée tous les jours rien que pour ça (A12)</i> L'irrigation c'est tranquille <i>(...) l'arrosage ce n'est pas un gros travail. J'ouvre les vannes puis c'est fini (il a 12 ha de CI et n'a plus qu'un enrouleur qui reste sur place et qu'il n'utilise que pour l'oignon) (A9)</i>	Herbes aromatiques, tomate : trop de travail <i>Il s'en fait pas mal des plantes aromatiques. Moi je n'en fais pas, ça demande beaucoup de travail à la main, le désherbant ne marche pas à 100 %, du coup je ne me suis pas lancé, mais ça peut être intéressant. (A3)</i> <i>réduire un peu le travail. Parce que la tomate, c'est un travail supérieur à du maïs ! Puis je n'ai pas de successeur direct, alors je veux bien travailler, mais je ne veux pas travailler pour travailler. (A11)</i> Pois plutôt que maïs <i>On fait entre 45 et 50 quintaux, on l'arrose que 2 fois c'est mieux que du maïs qu'on arrose 10 fois (...) surtout que quand je moissonne, je n'ai pas le temps d'arroser le maïs</i>	Le goutte à goutte c'est galère <i>ceux qui sont en goutte à goutte en tomate ont un meilleur rendement. Mais ça fait beaucoup d'investissement : l'eau doit être très claire, à la récolte, les tuyaux doivent passer dans les machines, et ça fait perdre beaucoup de temps quand ils s'emmêlent (A3)</i> Le goutte à goutte c'est tranquille <i>(goutte à goutte) (...) vous ouvrez le matin. Après vous êtes tranquille. C'est long à poser, mais après c'est bien.</i>

	Utilisation de l'eau	Assolements	Equipements
Négligence	Pas de volonté de maîtriser les apports <i>Les gens tant qu'ils ouvrent leur borne et que ça coule, ils ne cherchent pas plus loin. (A2)</i> <i>un voisin, dès qu'il met ses canons en route, il n'arrive plus à s'arrêter, c'est presque une passion (A6)</i> Profiter des disfonctionnements <i>(sur le problème des limiteurs de CS) moi par exemple j'ai souscrit 40 m3 sur mes 8 ha, et il y a des gens qui ont souscrit 3 ha avec 10 m3 (...) celui qui a souscrit 10m 3 et qui en utilise 40, il vole le réseau. (A2)</i> Pas de maîtrise des apports par flemme <i>Mais il y a des gens qui n'ont toujours pas compris que ça servait à rien de balancer des quantités phénoménales de flotte. C'est pour des questions pratiques, ils y vont à 8 h le matin, à 8 h le soir, après ils sont tranquilles. Iks vont pas vérifier si leur jet tourne, si il y a un tuyau débranché, ils y retournent le soir et c'est tout (A10)</i>		
Conscience écologique	Perception du cycle hydrologique <i>arroser pour rebalancer tout dans la nappe après, ça ne vaut pas le coup. (A6)</i> Effets de la sensibilisation par les réunions du CCVD <i>On est tellement comprimés compressés, sensibilisés par la gestion de l'eau que c'est vrai qu'on affine de plus en plus (...)Là ce matin j'ai remis donc une irrigation en route, et d'après la pluie de avant-hier, je suis allé voir, j'ai gratté un petit peu le sol, et c'est vrai que j'avais programmé 30mm et j'ai réduit parce que je me suis rendu compte que mon sol était quand même pas mal pourvu (c'est quelqu'un qui va aux réunions du ccvd quand il peut, et aux réunions inter-réseaux, parce que ça l'intéresse de voir et comprendre) (A11)</i> <i>Avant tiens le voisin s'est mis à arroser – hop je m'y met aussi. Et tout le monde se mettait à arroser en 12h, personne ne regardait si ses champs étaient meilleurs, si il pouvait attendre encore 2 ou 3 jours. (A12)</i>		

C.4 Rôles multiples

Le tableau suivant liste quelques points sur la combinaison de rôles multiples relevés dans les entretiens. Les références correspondent aux numéros attribués dans le tableau du [C.2](#)

Rôle1	Rôle 2	Comportement induit	Citation
Président (réseau irri)	Irrigant (exploitation)	Délégation – charge de travail	<i>Et c'est vous qui faites tout, vous ne déléguez pas ?</i> Non je n'ai pas de secrétaire. <i>Et ça vous fait une charge de travail...</i> Ah oui c'est important. Le réseau, 2 stations, les problèmes qu'il y a, tout, la Drôme... <i>Ce n'est pas handicapant pour votre exploitation ?</i> On s'arrange. J'en fais beaucoup le week-end. Je passe beaucoup de samedis même (président CN)
Membre bureau (réseau irri)	Irrigant (exploitation)	Le fait d'être membre du bureau n'empêche pas d'avoir des comportements déviants comme arroser plus que son contrat – et les infos supplémentaires sur l'état de la ressource semblent même en renforcer certains dans leur refus de règles	<i>Et c'est des gars qui sont au bureau, ceux qui...</i> Il y en a certains. Ils se disent qu'il y a de l'eau, il faut pas leur raconter qu'il n'y a pas d'eau. (président CN) les gens tant qu'ils ouvrent leur borne et que ça coule, ils cherchent pas plus loin (A2)
Irrigant (réseau irri)	Irrigant individuel	Possession approvisionnement individuel (hors Drôme) : Utilisation en ressource de confort/sécurité, surtout sur cultures délicates, ou hors saison réseau	<i>ça arrive que pour les besoins très tôt, début mars, le réseau ne soit pas encore en pression.</i> <i>On a une nappe intéressante ici. C'est en profondeur, ça n'a rien à voir avec la Drôme, ça descend des Alpes.</i> <i>En saison, il me permet d'être confortable et d'arroser quand les conditions météo ne sont pas réunies. Arroser quand il y a une ETP du tonnerre, surtout en CI, arroser des légumes c'est pas très intéressant (A1)</i>
Président (réseau irri)	Autres rôles	Charge unique – refus autres responsabilités	<i>Puis le réseau, il faut que je m'en occupe, pour moi c'est vital, et c'est quand même un peu mon bébé.</i> <i>Puis c'est tout. Bon un jour où j'arrêterai je serai conseiller municipal.</i> <i>Mais je ne supporte pas les gens qui prennent des responsabilités et qui n'assument pas ; on voit ça tous les jours dans les conseils municipaux. (président CN)</i>
Délégué commune	Responsable (réseau irri)	Conflit d'intérêt – abandon de rôle	<i>je ne voulais plus non plus être délégué de la commune de Crest, par rapport à ses idées (A2, parlant du maire)</i>
Irrigant (réseau irri 1)	Irrigant (réseau irri 2)	Appartenance à plusieurs réseaux quand minoritaire sur un des 2, pas d'implication dans sa vie	
Responsable structure collective	Irrigant ; autres rôles	Flux d'informations	<i>des fois c'est vrai qu'on discute avec des autres gars d'autres secteurs sur l'irrigation, des trucs comme ça, un peu, mais pas vraiment beaucoup. (A2, responsable castration)</i> <i>c'est vrai que de voir tout ça, ça m'a pas mal appris. Après quelques années je me rend compte de choses que j'en voyais peut-être pas avant... tout ce qui se passe derrière les simples militants, quand ça devient politique... (A2, élu)</i> <i>moi je fais partie un peu des responsables, alors c'est vrai que je me sens plus sensibilisé (A2, bureau CS)</i> <i>c'est vrai que les différentes informations qu'on a, ça nous permet dans les différentes instances où on est de prendre des décisions de manière plus impartiale (A10, membre CDOA)</i>
Entreprise travaux agricoles	Irrigant	Flux d'informations	<i>des échanges on en a pas mal d'autant plus qu'on a une entreprise de travaux agricoles : je suis tous les jours chez des agriculteurs du canton. Alors on parle du travail que l'on effectue, mais on parle aussi de l'exploitation en général. Ça permet de savoir ce qu'ont fait les autres, puis d'échanger un petit peu, personne n'a jamais tout à fait raison ou tout à fait tort de toute façon. (A7)</i>
Entreprise travaux agricoles	Irrigant	Charge de travail	<i>surtout quand je moissonne je n'ai pas le temps d'arroser le maïs. L'association avec (..) c'était aussi pour ça. Lui le mois de juillet août, les plantes sont ramassées, alors que moi avec la moisson je</i>

			<i>n'arrivais plus à m'occuper de l'exploitation (...) Jusqu'à maintenant, j'avais ce problème là : mes maïs n'étaient pas beaux, je plafonnais 90-95 quintaux parce que quand arrivait la moisson, je n'arrivais pas à irriguer correctement pendant 15 jours (A12)</i>
Entreprise travaux agricoles	Voisin	Relation aux autres	<i>(l'agriculteur est en bout de ligne et souffre de problèmes chroniques de manque de pression) Puis c'est toujours difficile d'aller dire au voisin 'tiens tu pourrais pas enlever 5 ou 6 jets pour que je puisse arroser ?'. Ca ne marche pas ça. En plus c'est des clients pour l'entreprise, donc on ne dit rien ! (A12)</i>
Irrigant	Membre conseil municipal	Relative indépendance des intérêts ?	<i>Et au conseil municipal, vous êtes agriculteur-irrigant, on y parle d'eau, est-ce que ça influe ?</i> <i>Oui un petit peu. Mais on est pas mal servi, on est quand même 7 agriculteurs sur 19 dans le conseil municipal ; on n'est pas mal représentés !</i> <i>Pour en revenir à la commune, il y a des moyens par lesquels elle peut intervenir sur l'eau ?</i> <i>Directement sur l'eau d'irrigation, pas spécialement, c'est plus lié à la DDA qu'à la commune. Non au niveau communal ça ne pose pas de problèmes particuliers (A7)</i>

Annexe D

Le modèle GibiDrome

Cette annexe présente une description détaillée du modèle GibiDrome. Des compléments peuvent être trouvés dans [Barreteau *et al.*, 2003].

D.1 Espace et données physiques

L'espace décrit par GibiDrome est schématique mais respecte la configuration et les données du terrain :

au niveau du bassin : – les séries climatiques (évapotranspiration, pluies, débit entrant dans le système) sont les données climatiques réelles relevées de 1971 à 1996.

- chacun des 3 réseaux est représenté avec sa capacité de pompage et sa surface irriguée réelle ; leur positionnement amont-aval et le même que sur le terrain
- l'irrigation individuelle est représentée par un groupe d'irrigants prélevant de l'eau dans la rivière en amont du dernier des 3 réseaux. Là encore, la surface irriguée est la même que la surface irriguée individuellement réelle.

au niveau des réseaux : les bornes des irrigants ne sont pas représentées de manière individuelle. La quantité d'eau nécessaire à l'irrigation du jour est prélevée directement à la borne d'entrée du réseau, et attribuée proportionnellement à la demande si la quantité d'eau disponible n'est pas suffisante. Les irrigants sont donc tous égaux vis à vis de la répartition de l'eau dans le réseau. Sur le terrain, des disparités assez contraignantes dues à des effets de perte de charge sont observées sur les lignes à l'intérieur des réseaux. Ces éléments n'étant pas rentrés en discussion, ils ne sont pas représentés.

au niveau des exploitations : chaque irrigant dispose de 6 parcelles emblavées en maïs, et d'un accès à l'eau (collectif ou individuel). Ceci permet de représenter facilement une rotation hebdomadaire de l'irrigation, qui correspond à la pratique majoritaire dans la Drôme. Chacune des parcelles peut avoir une profondeur de sol variable (3 types de profondeurs de sols correspondant à une classification issue d'une expertise [Camacho, 2002]).

L'assolement tout maïs a été retenu dans un premier temps parce que cette culture est très majoritaire en saison d'étiage et forte consommatrice d'eau. Ce choix satisfaisait les acteurs car il n'abordait pas une remise en question de leurs pratiques et était avantageux pour eux.

L'unicité de l'accès à l'eau constitue également une simplification du modèle, nombre d'irrigants de la Drôme disposant d'accès à l'eau multiples (souvent des bornes dans

un ou plusieurs réseaux, et une ressource individuelle pour ceux qui irriguent non loin du lit de la Drôme).

D.2 Processus physiques

Les processus physiques représentés dans GibiDrome sont la distribution de l'eau dans le bassin, ainsi que les bilans hydriques des parcelles.

D.2.1 Circulation de l'eau

Le pas de temps de GibiDrome est d'une journée. Au vu de la taille du bassin (une cinquantaine de km^2), la propagation de l'eau à travers le bassin est instantanée.

A chaque cycle, le débit entrant dans le bassin (donnée issue des séries climatiques) est distribué successivement à chaque réseau ainsi qu'aux irrigants individuels. Chaque irrigant individuel reçoit le débit correspondant à sa demande si il est disponible dans la rivière. Chacun des réseaux reçoit le débit correspondant au total des demandes des irrigants si il n'excède pas la capacité, totale ou restreinte, de la prise d'entrée du réseau, et si il est disponible dans la rivière. Ce débit est distribué dans les réseaux proportionnellement aux demandes.

Il y a donc un effet amont-aval dans la rivière, mais pas dans les réseaux.

D.2.2 Bilan hydrique

Nous détaillons ici la manière dont s'effectue le bilan hydrique sur chaque parcelle dans GibiDrome. Les mêmes formules seront utilisées dans le modèle-jouet. On utilise les formules de bilan hydrique recommandées par la FAO [Allen *et al.*, 1998], et utilisées dans [Labbé *et al.*, 2000]. Les coefficients culturaux proviennent également de la FAO [Doorenbos and Kassam, 1979].

A chaque cycle, et pour chaque parcelle, l'évapotranspiration moyenne de la culture, qui représente ses besoins quotidiens en eau est calculée suivant la formule suivante :

$$etm = etp \cdot k_c$$

où etm est l'évapotranspiration moyenne de la culture, etp est l'évapotranspiration potentielle du jour (donnée climatique), et k_c le coefficient culturel du jour (donnée liée au type de plante).

`apportsEau` représente la quantité d'eau amenée à la parcelle durant la journée. Dans le cas où `apportsEau` > 5 mm,

$$\begin{aligned} etr &= \min(etm, \text{apportsEau}) \\ z &= \max(0, rfu_{old} + rsu_{old} + \text{apportsEau} - etr) \\ rfu &= \min(z, rfu_{max}) \\ rsu &= \begin{cases} \min(z - rfu_{max}, rsu_{max}) & z \geq rfu_{max} \\ 0 & z < rfu_{max} \end{cases} \end{aligned}$$

Dans le cas où $\text{apportsEau} \leq 5$ mm,

$$\begin{aligned} etr &= \begin{cases} etm & \text{si assez d'eau } (etm \leq \text{apportsEau} + rfu) \\ etm \cdot \frac{rsu}{rsu_{max}} & \text{sinon} \end{cases} \\ z &= rfu_{old} + \text{apportsEau} - etr \\ rfu &= \max(z, 0) \\ rsu &= \begin{cases} rsu_{old} & z \geq 0 \\ \max(rsu_{old} + z, 0) & z < 0 \end{cases} \end{aligned}$$

où etr est l'évapotranspiration réelle de la plante, avec les conditions hydriques ; z est la nouvelle quantité d'eau dans le sol ; rfu , rfu_{max} et rfu_{old} sont respectivement la nouvelle réserve facilement utilisable du sol, sa réserve facilement utilisable maximale, et son ancienne réserve facilement utilisable ; rsu , rsu_{max} et rsu_{old} sont respectivement la nouvelle réserve difficilement utilisable du sol, sa réserve difficilement utilisable maximale, et son ancienne réserve difficilement utilisable.

rfu_{max} et rsu_{max} sont des paramètres des parcelles, caractéristiques des 3 types de sols observés sur le terrain ([Camacho, 2002]) ; et rsu et rfu sont fixés à leur maximum en début de simulation.

Les cultures rafraîchissent leur rendement potentiel à chaque cycle suivant la formule :

$$rdtPot = rdtPot_{old} \cdot \left(1 - k_y \cdot \left(1 - \frac{etr}{etm}\right)\right)$$

où $rdtPot$ et $rdtPot_{old}$ sont respectivement les rendements potentiels ancien et nouveau de la culture, et k_y le coefficient culturel de croissance du jour.

D.3 Règles de comportement des acteurs

Le comportement des agents de GibiDrome est décrit à base de règles simples. La communication entre les agents est gérée par l'envoi de messages asynchrones.

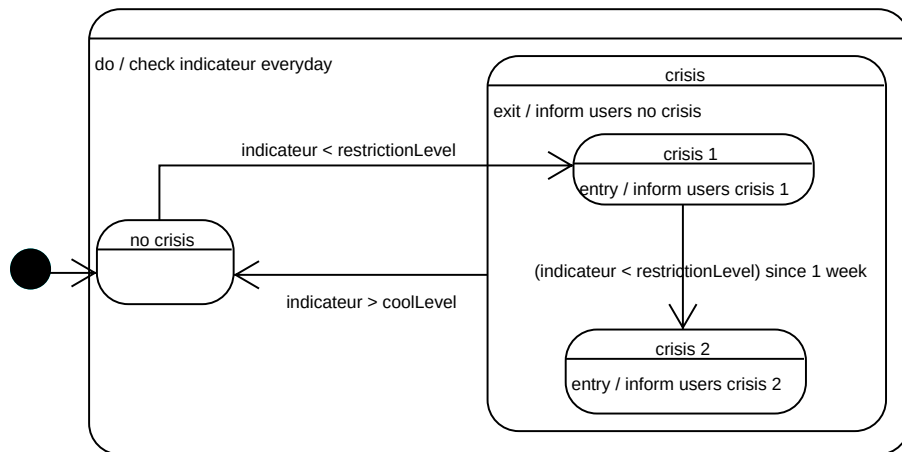


FIG. 1 – Diagramme d'état UML du comportement de la CLE dans GibiDrome.
 $\text{restrictionLevel} = 2.4 \text{ m}^3/\text{s}$; $\text{coolLevel} = 3 \text{ m}^3/\text{s}$

CLE : observe tous les jours son indicateur de débit **debitPues** en aval des prélèvements, et envoie un message aux usagers en cas de changement de régime de crise, conformément à ce que prévoit le SAGE (voir chapitre 3). Le diagramme 1 décrit ce comportement.

Associations d'irrigants : traitent leurs messages puis s'occupent de la gestion de la demande en eau des irrigants.

Les messages peuvent être de 2 types :

- message de changement de régime de crise, envoyé par la CLE. En cas de passage en régime de crise, les associations mobilisent leurs éventuelles ressources complémentaires et réduisent la capacité de leur prise sur la rivière conformément à ce que prévoit le SAGE et aux règles de partage choisies (voir tableau 1).

	niveau référence = capacite	niveau référence = 10Maïs
	$add = \frac{capacite\ complementaire}{capacite\ principale}$	
mode partage = tourPrélèvement	$qMax = capacite * (1 - (i * 0.2 - \min(add, i * 0.2)))$	$qMax = \min(capacite, surfaceTotale * besoinMais * (1 - (i * 0.2 - \min(add, i * 0.2))))$
mode partage = tourApports	$qMax = capacite * (1 - i * 0.2)$	$qMax = \min(capacite, surfaceTotale * besoinMais * (1 - i * 0.2))$

TAB. 1 – Calcul des restrictions pour l'irrigation collective dans GibiDrome. $qMax$ est la quantité d'eau maximale que le réseau est autorisé à prélever dans la rivière ; $capacite$ est la capacité maximale de la prise du réseau dans la rivière ; $besoinsMais$ est la quantité d'eau quotidienne consommée (besoins de référence pour le jour du calcul dans une année type) par 1 hectare de maïs ; i est le niveau de crise (1 ou 2) ; enfin, pour **08Maïs**, il faut multiplier $besoinsMais$ par 0.8

- message de début ou de fin de campagne des irrigants. L'association rentre en phase **Irrigation** à la réception du premier message de début de campagne et en sort quand elle a reçu le dernier message de fin de campagne.

Pour gérer la demande et la distribution d'eau, l'association demande à tous les irrigants la quantité d'eau dont ils ont besoin pour la journée, fait le bilan des ressources disponibles et répartit l'eau proportionnellement aux demandes.

Le diagramme 2 décrit ce comportement sans faire d'hypothèse sur la manière dont la demande des irrigants est connue.

Irrigants : Les irrigants ont 4 phases de comportement :

- **semis :** chaque jour entre le 1er et le 30 avril, l'irrigant a 40% de chance de choisir de semer une de ses 6 parcelles parmi celles qui ne le sont pas encore. Ceci permet d'étaler les dates de semis et d'ajouter un petit aléa qui fait que parfois une parcelle n'est pas semée
- **lancement de l'irrigation :** il y a 3 règles possibles de lancement de l'irrigation
 - à date fixe : départ de l'irrigation le 15 juin
 - selon la teneur en eau du sol : quand la réserve facilement utilisable du sol d'une des parcelles atteint 5% de la réserve facilement utilisable maximum.
 - selon un bulletin central : quand, dans un échantillon de 10 parcelles la réserve utile moyenne atteint 60% de la réserve utile maximale moyenne.
- **irrigation :** Chaque jour dans la semaine, une des parcelles de l'irrigant est irriguée et il n'y a pas d'irrigation le dimanche sauf en période de restriction. Du 10 juin au 15 juillet et après le 15 août l'apport est de 30 mm chaque jour, et de 40

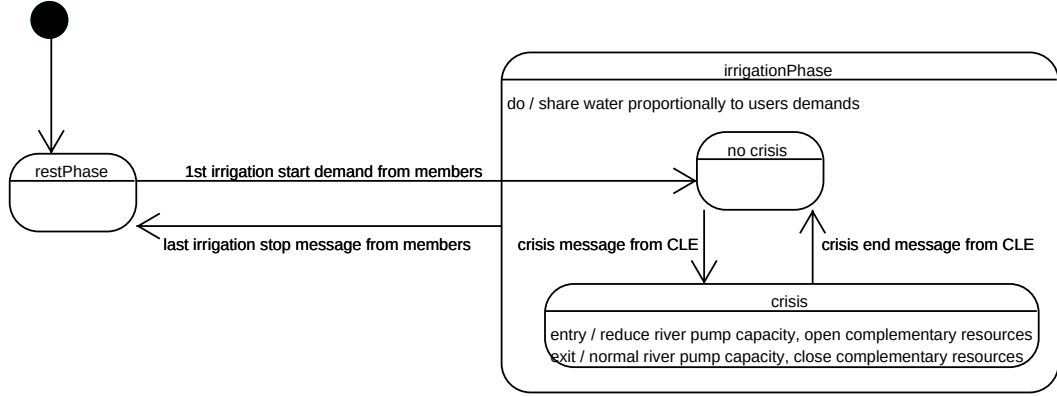


FIG. 2 – Diagramme d'état UML du comportement des associations d'irrigants dans GibiDrome. Les réduction de capacité se font suivant les règles fixées par la CLE

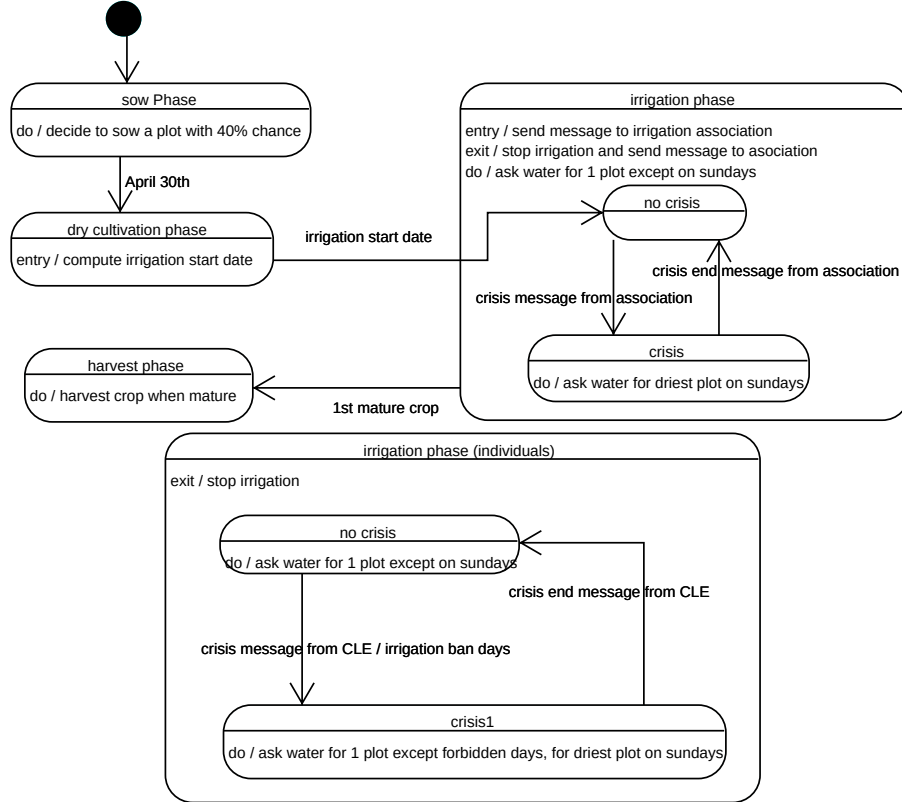


FIG. 3 – Diagramme d'état UML du comportement des irrigants dans GibiDrome. Pour les irrigants individuels, seul le comportement en phase d'irrigation change

mm du 10 juillet au 15 août.

En période de restriction, la parcelle dont les réserves hydriques sont les plus basses est irriguée le dimanche avec la même quantité.

Les irrigants individuels doivent de plus respecter 1,5 (resp. 3) jours d'arrêt hebdomadaires consécutifs en crise 1 (resp. 2). Ces jours sont attribués de manière

- aléatoire et restent les même pour toute la saison pour chaque irrigant
 - **récolte** : les parcelles sont récoltées quand elles arrivent à maturité (date de semis + nombre de jours propre à l'espèce)
- Les diagrammes de la figure 3 décrivent complètement ce comportement.

D.4 Dynamique

Le pas de temps est d'une journée ; La simulation se fait du 1er avril au 30 septembre (étendue des séries climatiques).

Le déroulement d'un cycle de simulation de GibiDrome est représenté sur la figure 4.

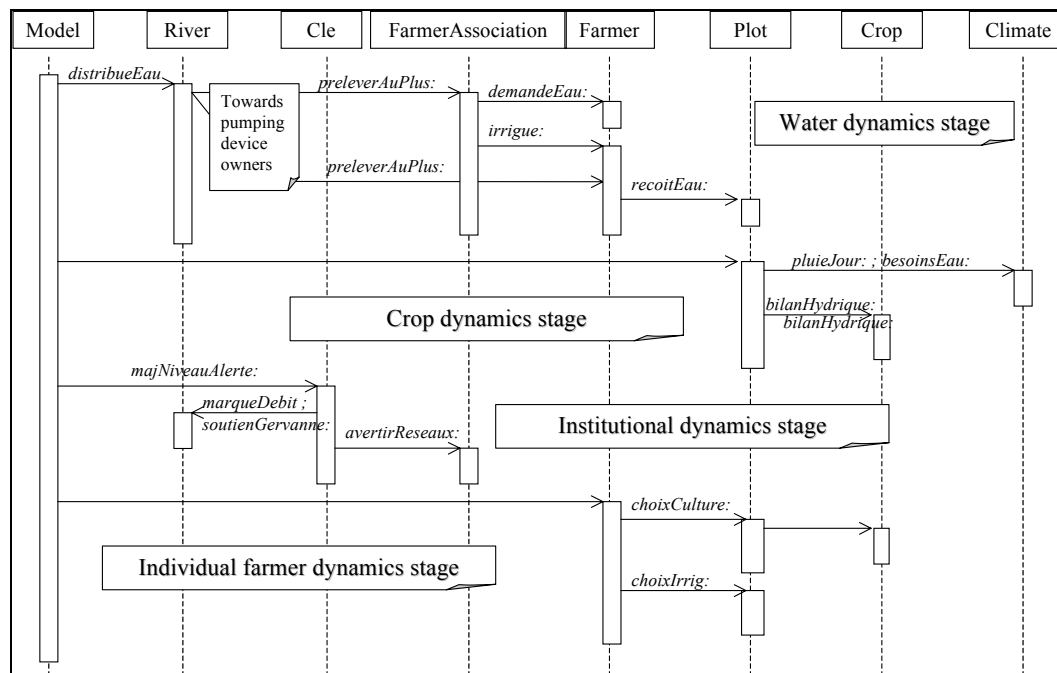


FIG. 4 – Diagramme de séquence UML du déroulement d'un cycle de simulation de GibiDrome (d'après [Barreteau *et al.*, 2003])

Durant la première phase (water dynamics), l'eau est répartie sur les parcelles en fonction des demandes des irrigants et de la disponibilité en eau.

Durant la seconde phase (crops dynamics), les parcelles effectuent leur bilan hydrique.

Durant la troisième phase (institutional dynamics), la CLE vérifie le niveau de la rivière et lance les éventuelles restrictions.

Enfin la dernière phase est consacrée aux actions de semis, de lancement de l'irrigation et de récolte.

Annexe E

Détails du modèle-jouet

Cette annexe vient compléter le chapitre 5 en fournissant l'ensemble des role models du modèle jouet ainsi que la description complète de la mise en œuvre de ses processus. On retrouvera sur les diagrammes de séquences présentés ici les références des événements et messages des tableaux et des diagrammes dynamiques locaux présentés dans le chapitre 5. Les numéros des activités des diagrammes d'activités correspondent aux numéros apparaissant dans les comportements des éléments des role models.

E.1 Role Models

Un role model a été construit pour chacune des structures de groupe du modèle à partir des différents éléments de descriptions qui émergent des diagrammes de conception exposés au 2. On commence par les groupes physiques, puis on présente les groupes sociaux du plus agrégé au plus élémentaire.

On trace sur les 2 premiers role models les propagations de demande et de débit à travers le système.

Sur le role model 3 de la structure de groupe **Crop**, apparaissent en plus le contrôle des pompes, ainsi que le processus de bilan hydrique.

On y rencontre par ailleurs la limite essentielle des role models : on ne peut y représenter les dynamiques organisationnelles (prise en charge et abandon de rôle). Elle sont évoquées textuellement (ouverture et fermeture d'une **TerminalPump** ont pour conséquence prise en charge et abandon d'un rôle **EntryPoint**, l'activation de **Technician** sur une parcelle se traduit par le déplacement du rôle sur le groupe **Crop** concerné), mais elles ne sont pas représentées.

Seuls les diagrammes de séquences organisationnels sont à même de représenter correctement les dynamiques organisationnelles : les mouvements de rôles de groupes de type **Crop** seront représentés sur le diagramme 16

Sur les 3 role models de structures de groupe de gestion, certains rôles d'observation ne présentent aucun comportement. Ceci est dû aux conséquences du cloisonnement AGR : deux entités ne peuvent être reliées que si elles jouent des rôles dans un même groupe. Ces rôles d'observation ne sont en fait utilisées pour que les entités qui les prennent en charge puissent être accédées par le **Manager** du groupe.

Il peut en effet en avoir besoin pour paramétrer certaines actions (le **Manager** de **Farm** a par exemple besoin de faire référence aux **Plot** pour établir son calendrier) sans qu'il y ait réellement utilisation d'un comportement du rôle. Représenter cet accès eut été alourdir

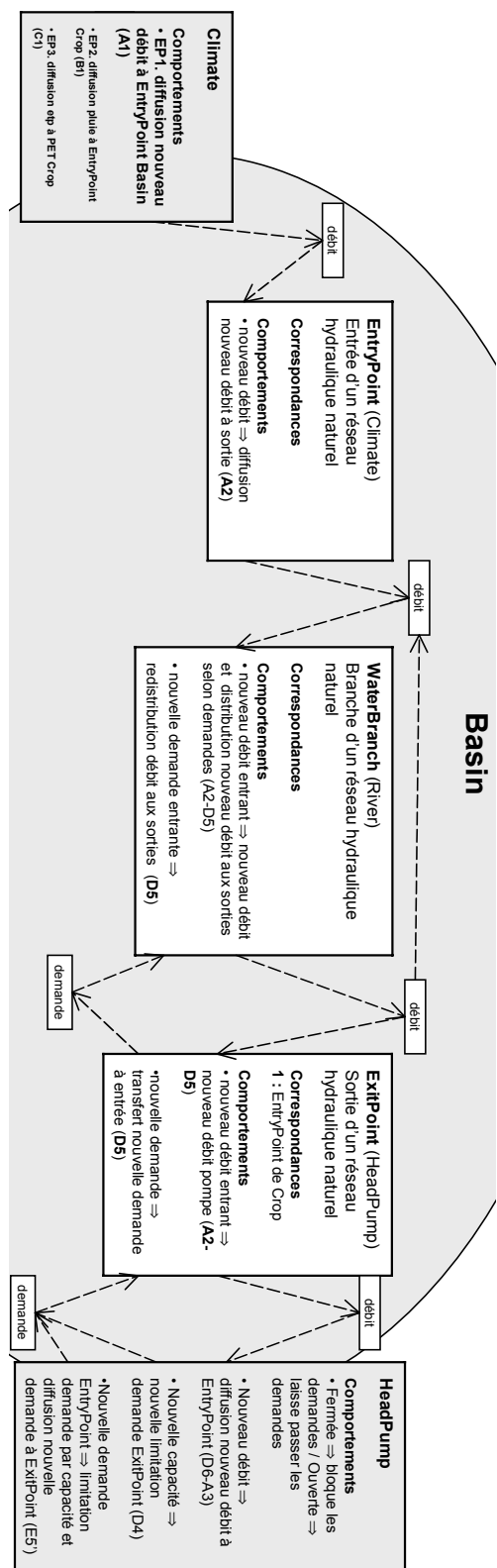


FIG. 1 – Role Model du groupe Basin

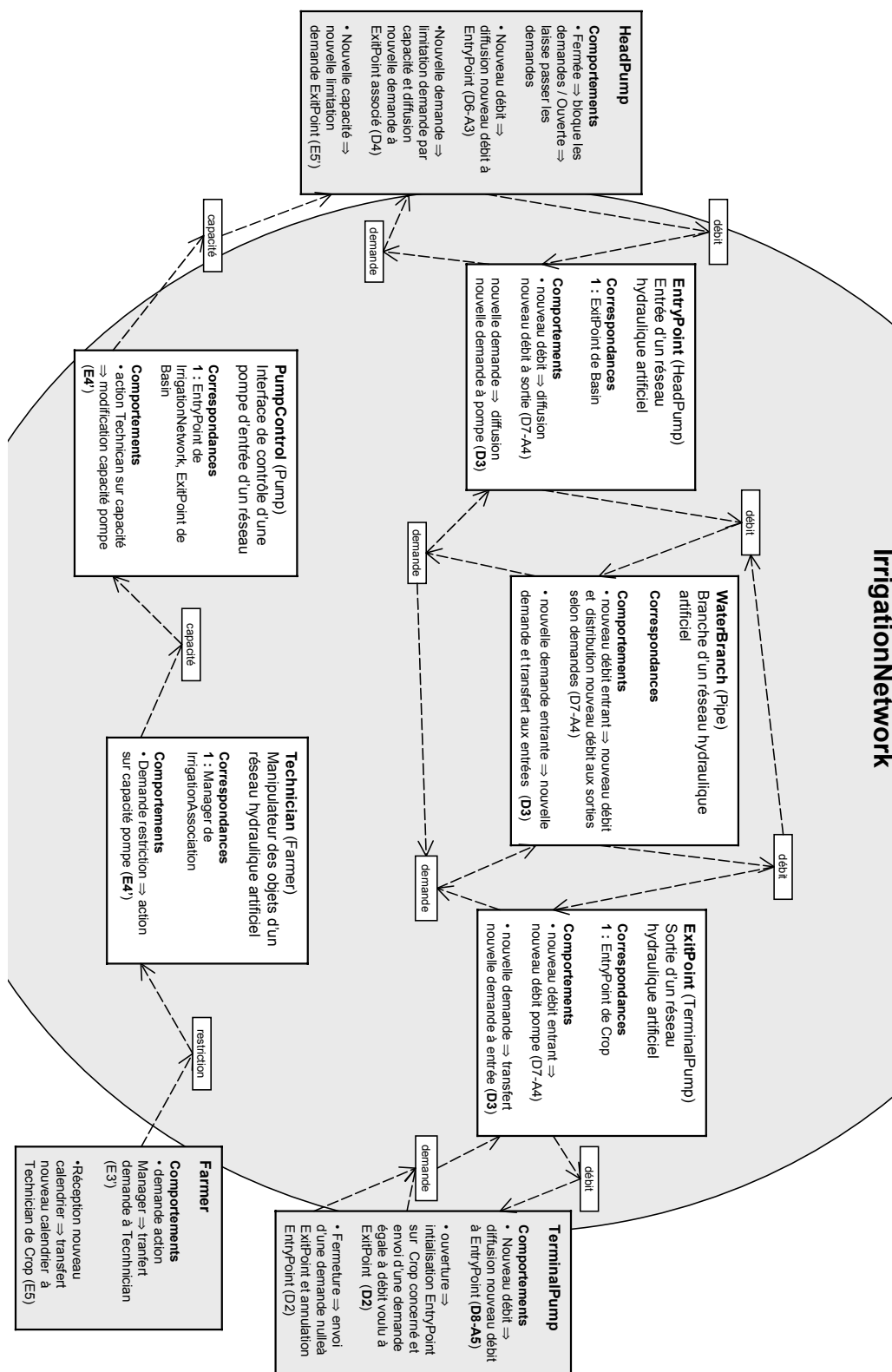
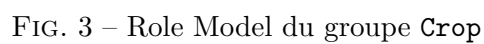


FIG. 2 – Role Model du groupe IrrigationNetwork



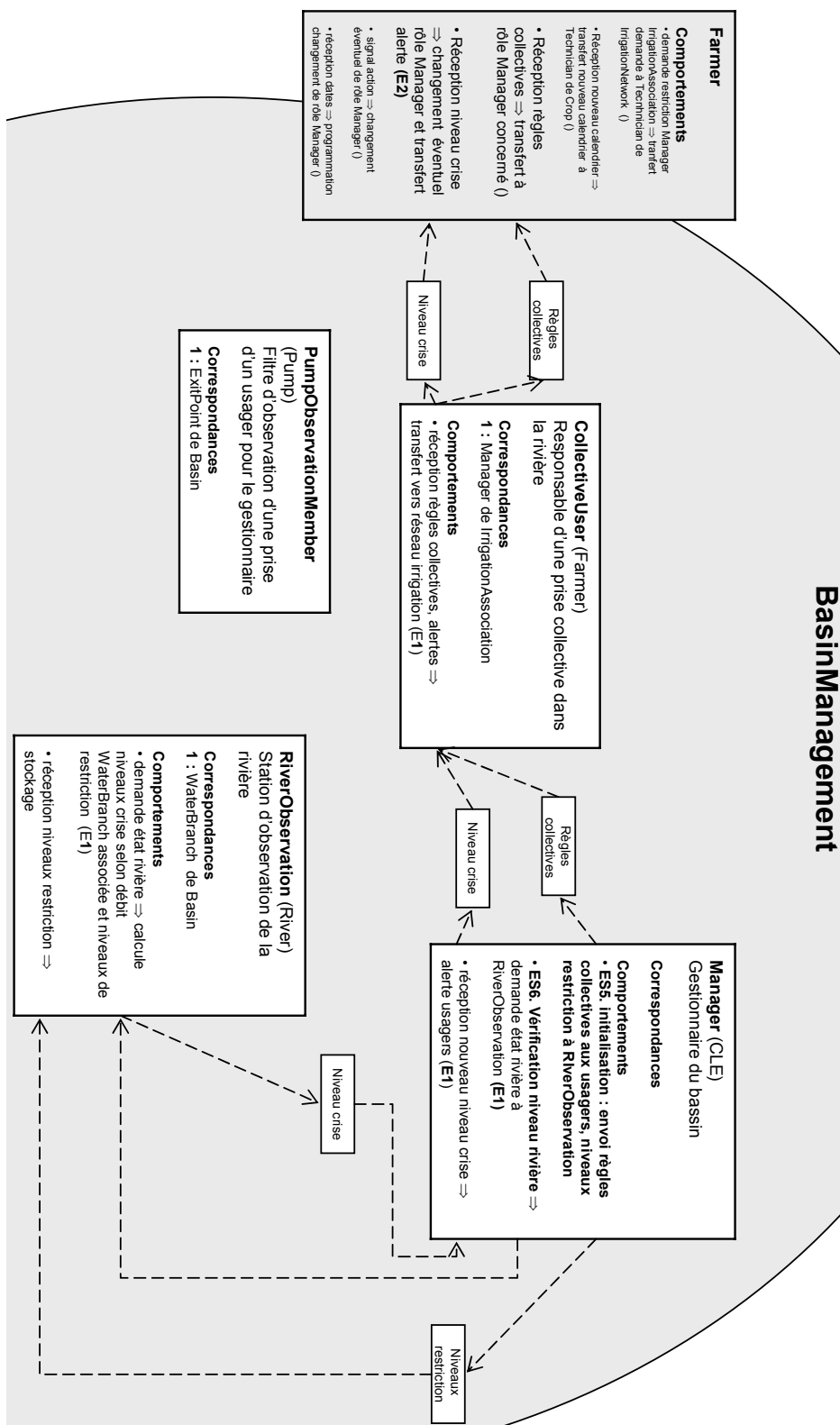


FIG. 4 – Role Model du groupe BasinManagement

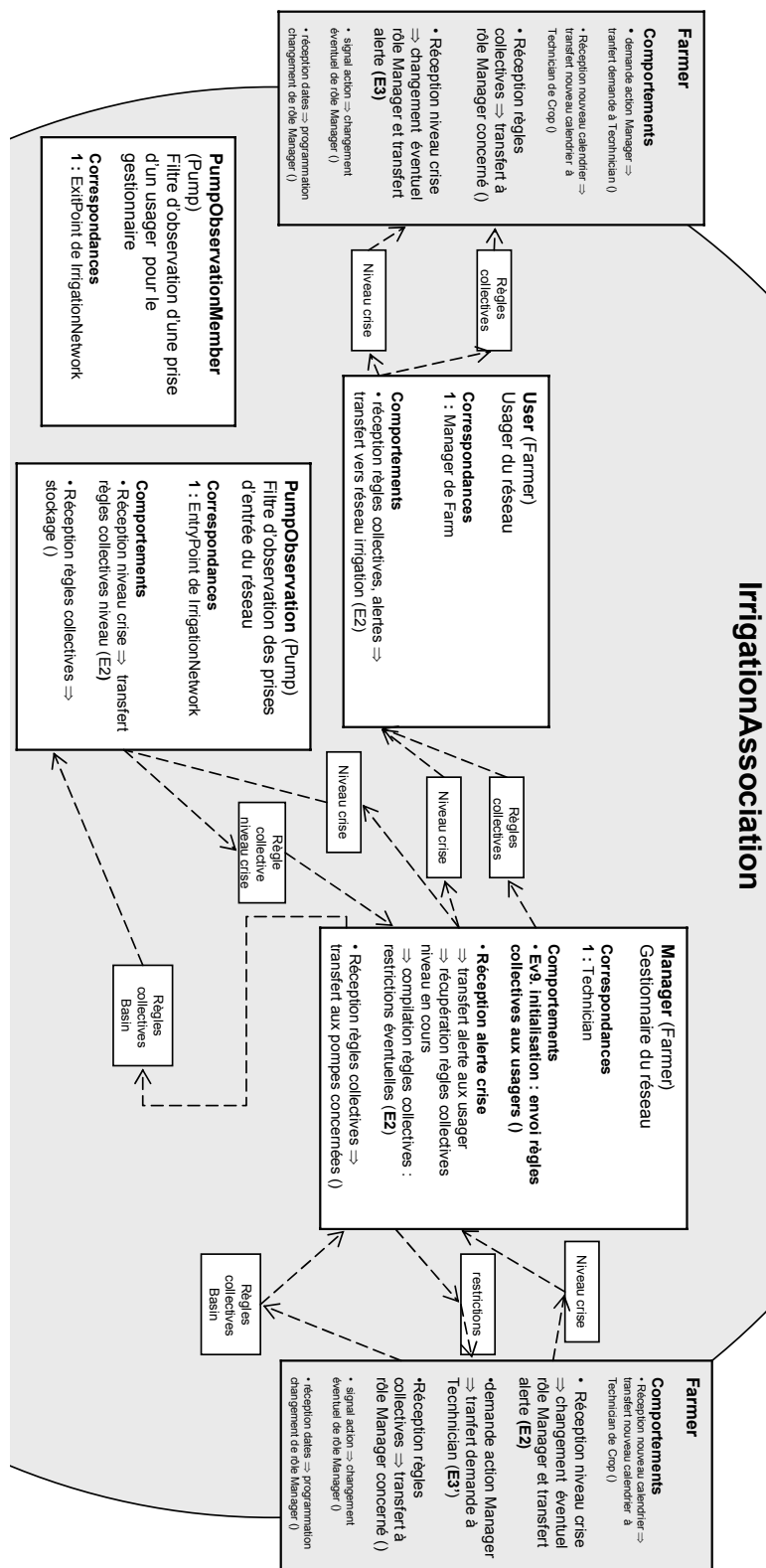


FIG. 5 – Role Model du groupe IrrigationAssociation

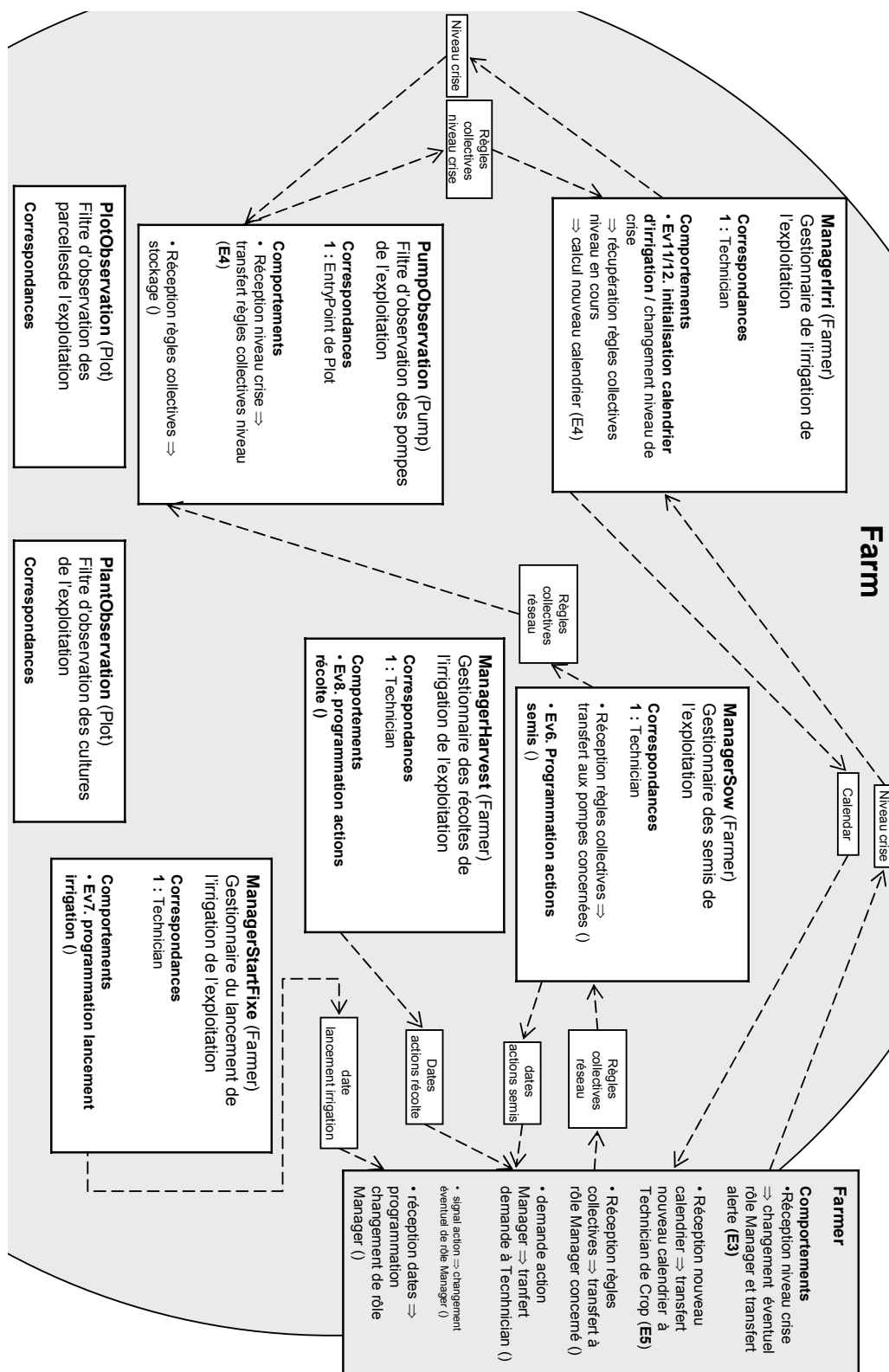


FIG. 6 – Role Model du groupe Farm

inutilement le diagramme.

Toutefois, ces rôles d'observation pourront développer un comportement dans des versions plus élaborées du modèle.

D'autre part, là encore dans le groupe **Farm**, les dynamiques organisationnelles n'ont pu être représentées et les différentes modalités de **Manager** sont donc représentées simultanément. On retrouvera ces dynamiques organisationnelles sur le diagramme de séquences 7.

E.2 Dynamique : vues globales

E.2.1 Les différentes phases de la simulation

Le diagramme de séquence 7 montre comment les différentes phases de la simulation se succèdent au gré des changements de rôle des agriculteurs.

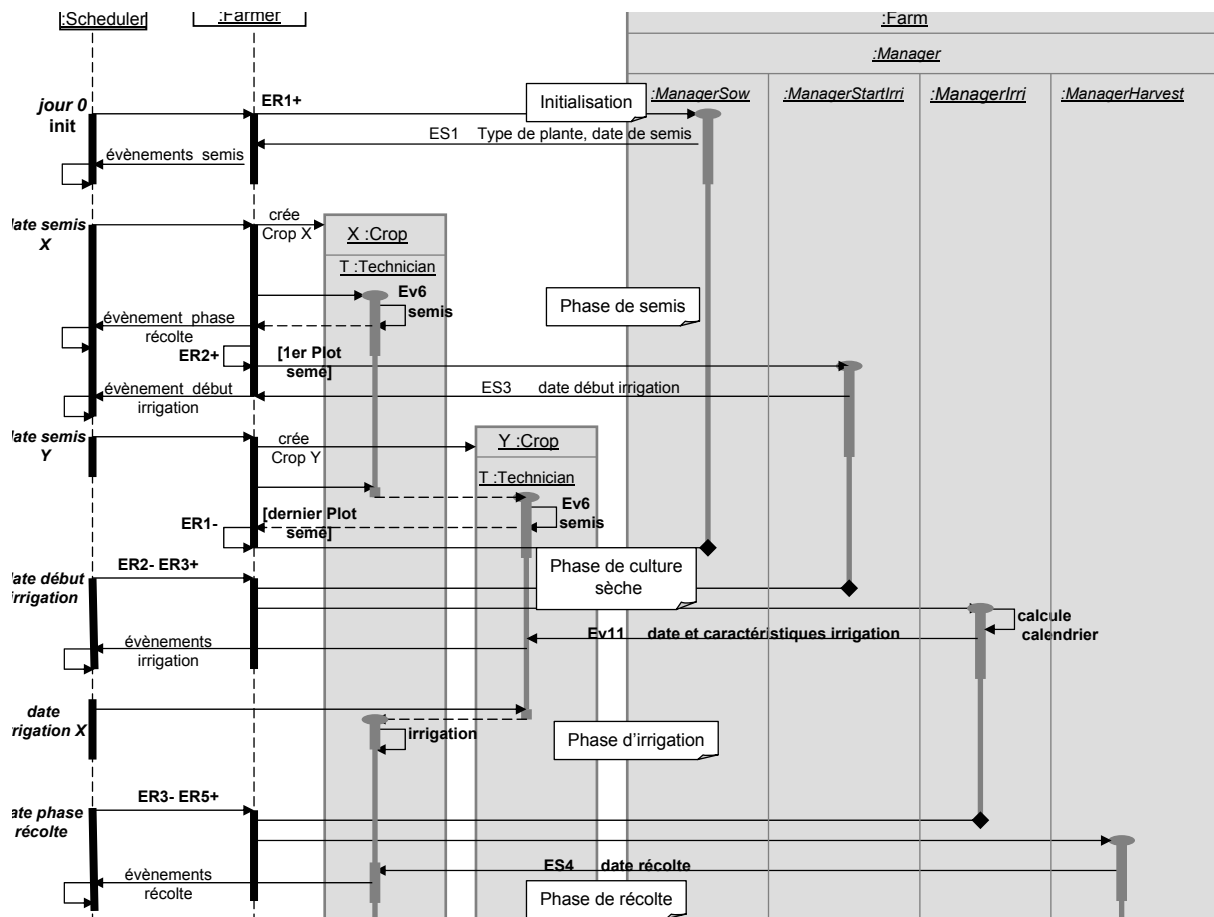


FIG. 7 – Diagramme de séquence de la succession de rôles **Manager** pris en charge par **Farmer** pour modéliser les différentes phases de la simulation

Sur le diagramme, il apparaît que :

- **ManagerSow** définit l'assolement et le calcul des dates de semis. A l'initialisation, c'est un rôle de type **ManagerSow** qui est pris en charge par **Farmer**. La prise en charge de ce rôle déclenche les calculs de semis et renvoie ces informations à l'agent.

Celui-ci peut alors paramétrer et programmer les actions de semis pour ses rôles **Tech-**

nician des groupes Crop.

- **ManagerStartIrri** définit la méthode de détermination du lancement de l'irrigation. Les différentes possibilités représentées dans GibiDrome sont modélisées par des sous-classes de **ManagerStartIrri**. Le passage au rôle **ManagerStartIrri** se fait quand la dernière parcelle a été semée. **ManagerStartIrri** lance alors le calcul de la date de lancement de l'irrigation et renvoie cette information à **Farmer** (selon le type de **ManagerStartIrri**, ce calcul eut être reconduit tous les jours jusqu'à trouver des conditions satisfaisantes, ou dépendre de l'arrivée d'informations extérieures... c'est ces différentes possibilités que permettent de représenter les différents rôles d'un même type).
- **ManagerIrri** est le rôle qui calcule le calendrier d'irrigation. Il est pris en charge à la date prévue du lancement de l'irrigation. Quand le calendrier d'irrigation est calculé, ses informations sont transmises au rôle **Technician** qui se charge de programmer les actions d'irrigation. **ManagerIrri** ne sera plus sollicité que quand des changements dans le calendrier sont nécessaires (nouvelles contraintes, passages en crise...). C'est donc un rôle pivot du modèle puisque c'est lui qui définit le comportement de l'agriculteur face à l'irrigation
- Enfin, **ManagerSow** définit les dates de récolte. Il est pris en charge quand la campagne d'irrigation prend fin.

Farmer définit une méthode spéciale **turn :to** : qui lui permet d'effectuer ses changements de rôle en conservant des attributs communs aux 2 rôles. C'est donc **Farmer** qui fixe ses propres règles de changement de rôle, en gérant les informations que lui renvoient ses rôles.

Enfin, le rôle **Technician** est un rôle purement effecteur. Il accomplit les actions de semis, d'irrigation et de récolte programmé par **Farmer** ou ses rôles **Manager**.

On se concentrera désormais sur la phase d'irrigation, qui mobilise l'essentiel de la simulation.

E.2.2 Déroulement d'une journée normale durant la phase d'irrigation

Le déroulement d'une journée « normale » d'irrigation (sans crise) est décrit par le diagramme de séquence 8.

La journée commence par le déroulement des dynamiques hydrauliques : rafraîchissement du débit entrant, lancement des irrigations et pluie.

Le lancement des irrigations a lieu à 1h00 (heure indiquée dans le calendrier des irrigants), et la pluie à un moment aléatoire dans la journée. Puis en milieu de journée a lieu l'observation de la CLE (pendant les irrigations). On pourra par la suite faire varier l'heure de cette observation. Enfin, la journée se termine par l'arrêt des irrigations et la croissance des champs (bilan des irrigations de la journée).

On remarquera que les groupes de type **Farm** ou **IrrigationAssociation** n'apparaissent pas. En effet ces groupes, responsables de la gestion de l'irrigation ne sont actifs que lorsqu'il est nécessaire de calculer de nouveaux paramètres d'irrigation, au début de la phase d'irrigation, ou en cas de changement de niveau de crise.

La section E.3 détaillera les processus étiquetés « Dynamiques Eau » et « Dynamiques cultures » sur le diagramme 8 (diffusion des débits, bilan hydrique). La section E.4 en détaillera le processus étiqueté « Dynamiques institutionnelles » (observation quotidienne de la rivière), ainsi que les processus de gestion proprement dite, qui apparaissent sur le diagramme 7, à l'initialisation de la phase d'irrigation.

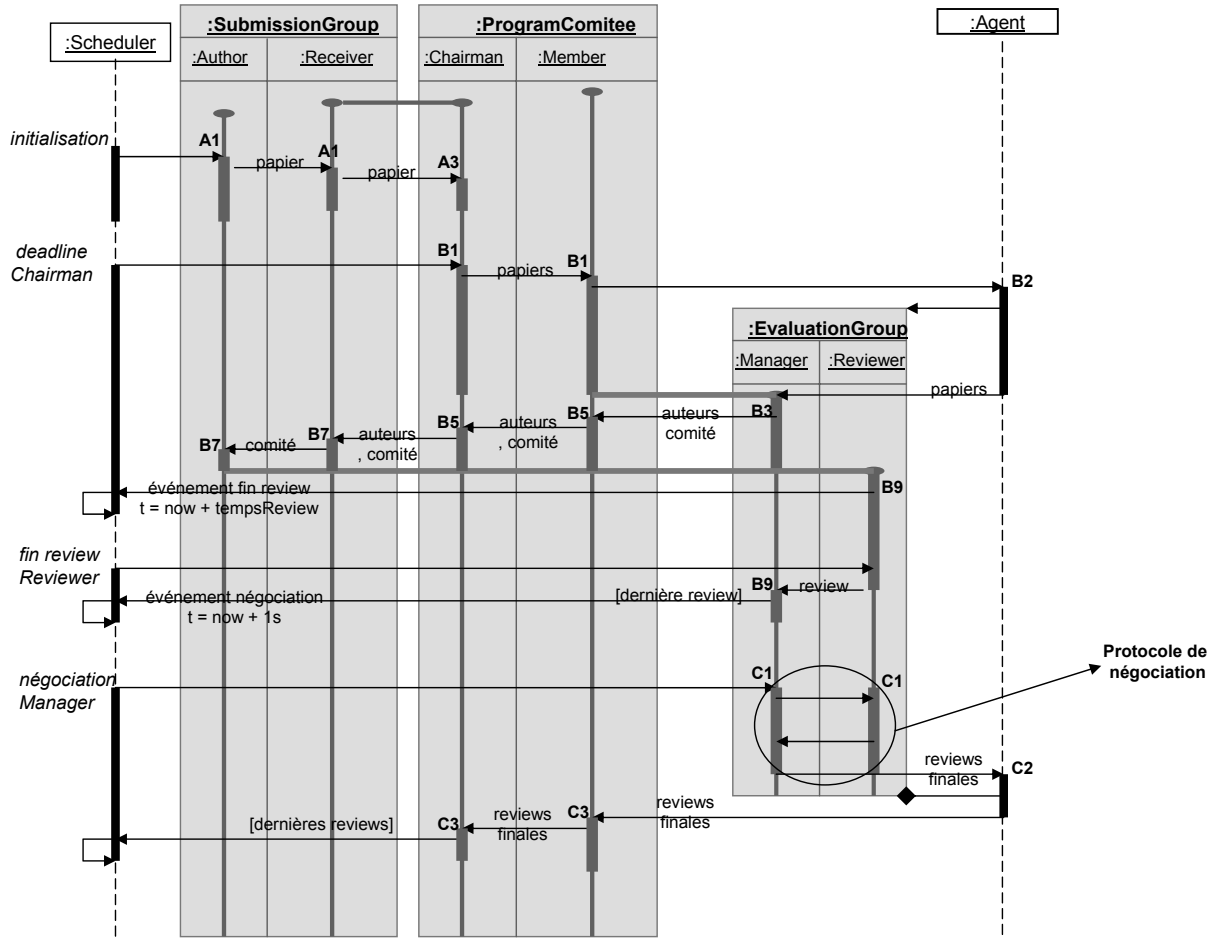


FIG. 8 – Diagramme de séquences organisationnel d’une journée sans crise en phase d’irrigation. Seule une exploitation et représentée à travers 2 de ses parcelles (celle qui a été arrosée la veille et celle qui est arrosée ce jour là).

Pour la clarté du diagramme, les agents et certains rôles intermédiaires n’apparaissent pas

E.3 Dynamique : processus physiques

La mise en œuvre des processus physiques est décrite avec des diagrammes d’activité organisationnels. Ces diagrammes tracent la séquence d’actions déclenchée par l’activation d’un événement, i.e. d’une méthode proactive, jusqu’à l’intérieur des groupes. Ils permettent de faire la synthèse des diagrammes dynamiques locaux et des role models, tout en rajoutant des détails d’implémentation. On les utilise donc au moment du codage des dynamiques.

E.3.1 Propagation du débit

Le diagramme d’activité organisationnel 9 décrit la propagation du débit dans le système.

Le débit entrant est rafraîchi tous les jours à minuit par l’agent **Climate**. Celui-ci renvoie l’information à son rôle **EntryPoint** dans le groupe de type **Basin**. Le nouveau débit descend alors à travers les branches et les nœuds. Lorsqu’il arrive à un **ExitPoint**, celui-ci informe l’agent qui le prend en charge, qui rafraîchit son propre débit et propage l’infor-

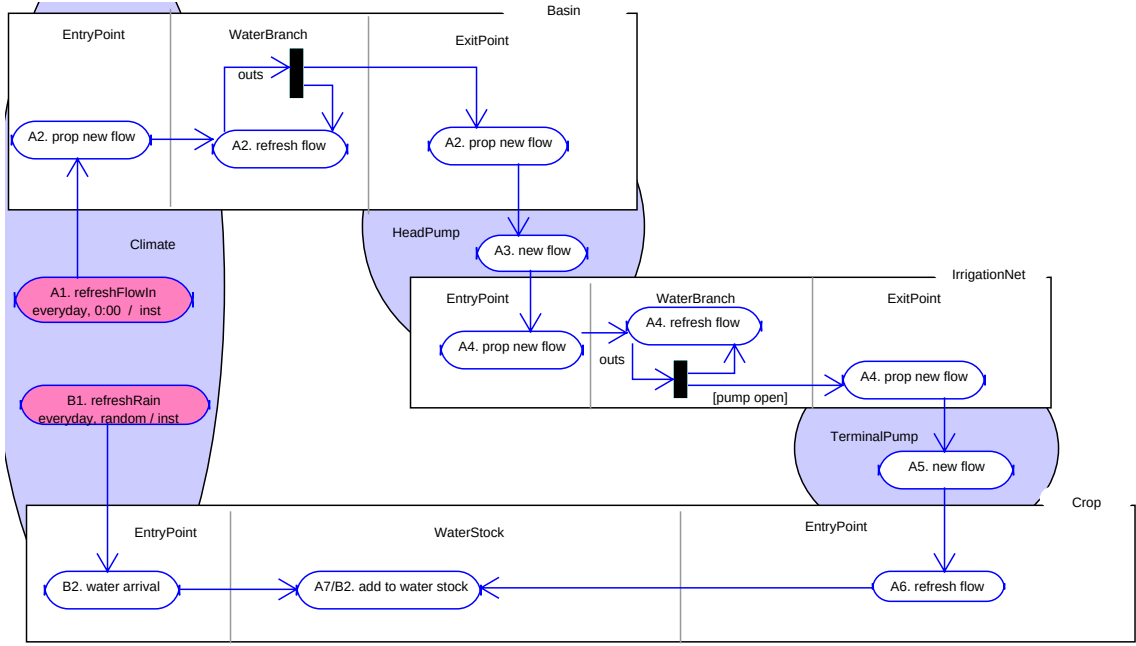


FIG. 9 – Diagramme d'activité organisationnel : propagation des débits dans le modèle jouet. La séquence d'actions se lit en partant de l'action proactive, en rose foncé

mation à son éventuel rôle **EntryPoint** d'un autre groupe. Dans les groupes de type **Crop**, la propagation du nouveau débit s'arrête sur les rôles **WaterStock** qui notent le nouveau débit et l'heure de son rafraîchissement et intègrent l'ancien débit en quantité d'eau rajoutée à leur stock (**apportsEau**).

L'autre information rafraîchie par le climat tous les jours est la pluie. Si la pluie du jour est non nulle (séries climatiques), **Climate** tire aléatoirement un moment de la journée et programme la tombée de la pluie pour cette heure-ci (envoi à lui même d'une influence retardée).

E.3.2 Demande et débit

L'ouverture ou la fermeture d'une pompe est décrite en détail dans le diagramme d'activité organisationnel 10.

Elle se traduit par l'envoi d'une demande en eau dans le système (demande égale à la capacité - éventuellement restreinte - de la pompe lors de son ouverture, à 0 lors de sa fermeture). Cette demande se propage à partir du rôle **EntryPoint** de la pompe en remontant les branches et les nœuds, dans le sens inverse du débit. Au passage à travers une pompe la demande propagée est limitée par la capacité de celle-ci. Si la demande d'un **EntryPoint** porte l'accumulation des demandes du réseau qu'il dessert, la demande d'un **ExitPoint** ne peut excéder la capacité de la pompe qui le prend en charge.

Quand la demande arrive à un point de sortie du groupe de type **Basin**, celui-ci envoie une influence anonyme (traitement asynchrone instantané) à la branche qui le dessert : la branche programme le traitement de la demande la seconde suivante. Si dans le même cycle de simulation, d'autres influences anonymes du même type arrivent, la branche ne reprogramme pas de nouvelle réaction. L'information n'est ainsi traitée qu'une seule fois pour toutes les sollicitations simultanées.

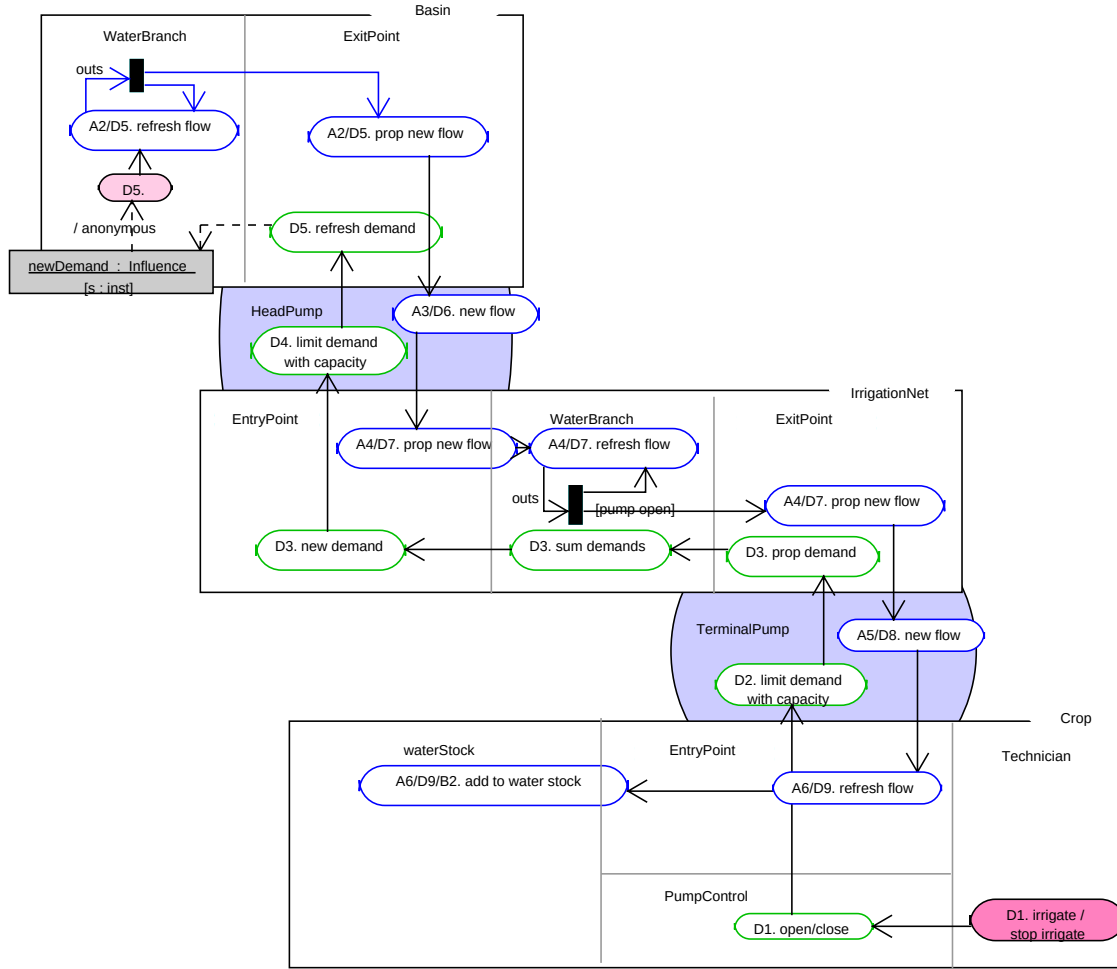


FIG. 10 – Diagramme d’activité organisationnel : propagation des demandes dans le modèle jouet. L’activité **refreshFlow** des **WaterBranch** qui correspond à la manière dont la répartition du débit s’effectue à une bifurcation est décrite plus avant dans le texte

Tout se passe alors comme si un nouveau débit était parvenu à la branche : celle-ci rafraîchit la répartition de son débit courant suivant la nouvelle demande.

E.3.3 Bilan hydrique

Le diagramme d’activité organisationnel 11 décrit le bilan hydrique.

Le bilan hydrique se fait en fin de journée, lancé par l’agent **Climate**, qui donne une nouvelle valeur à ses rôles **PET**, dans chacun des groupes de type **Crop**. Alors **WaterStock** rafraîchit sa variable **apportsEau** : si une irrigation est en cours, l’eau apportée depuis le début de l’irrigation est intégrée (l’eau à venir passera dans le prochains bilan). Il fait alors son bilan hydrique, comme décrit au D.2.2, p. 372

Lorsque les calculs ont été effectués, il faut réinitialiser la variable **apportEau**, qui représente l’eau amenée sur la parcelle depuis le dernier bilan hydrique. Par l’envoi d’une influence, on retarde d’une seconde cette réinitialisation pour pouvoir observer la quantité d’eau utilisée pour le bilan hydrique (l’observation se fait à la fin d’un cycle de simulation

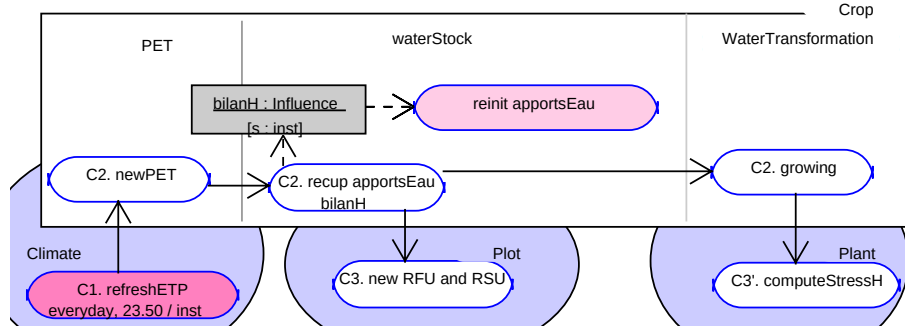


FIG. 11 – Diagramme d'activité organisationnel du bilan hydrique dans le modèle joué

dans Cormas). La réinitialisation se fait alors en retirant à **apportsEau** la masse d'eau utilisée pour la bilan (afin de ne pas effacer des apports ayant eu lieu entre temps).

Le diagramme d'activité organisationnel 12 rassemble tous les processus physiques.

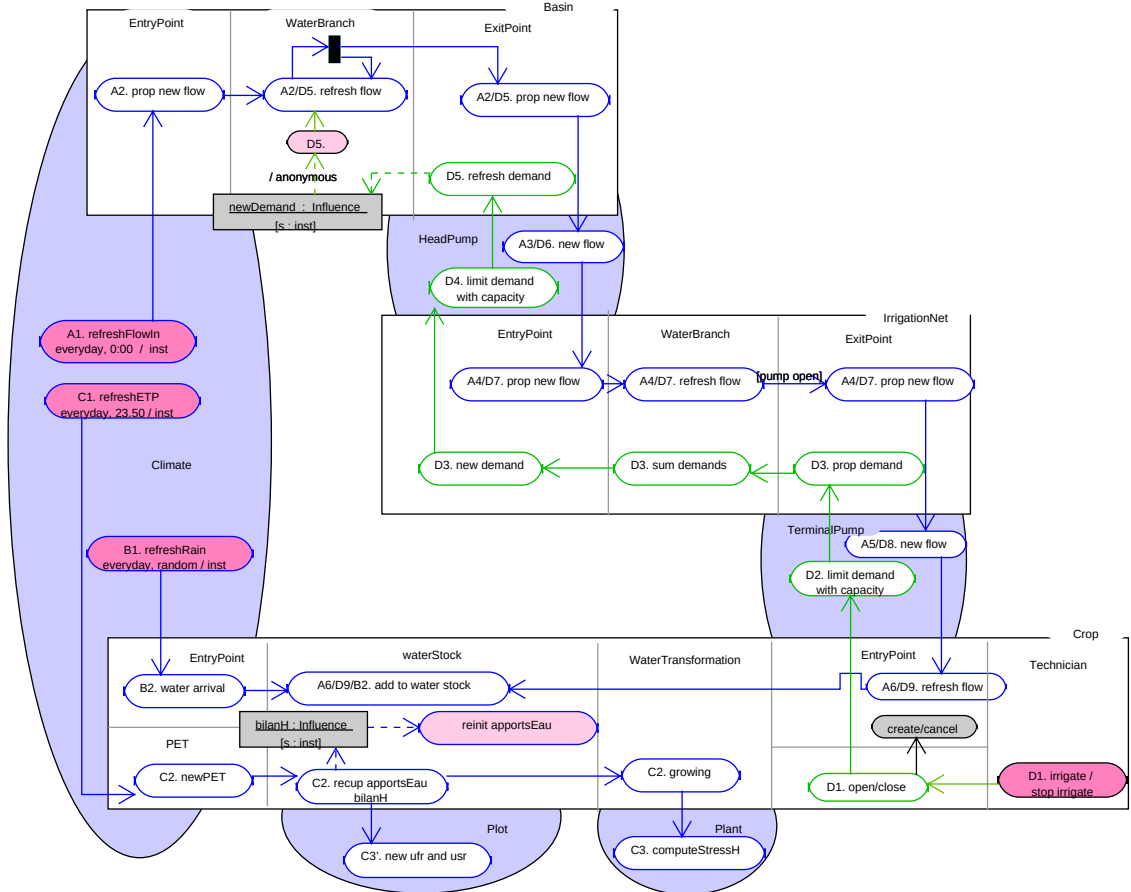


FIG. 12 – Diagramme d'activité organisationnel des processus physiques du modèle joué. Au diagramme 9 se rajoutent le diagramme 11, ainsi que la commande des pompes par les irrigants

E.4 Dynamique : processus sociaux

E.4.1 Initialisation de la phase d'irrigation

L'initialisation de la phase d'irrigation consiste à ce que chaque irrigant calcule son calendrier d'irrigation. Il doit pour cela prendre en compte les règles collectives auxquelles il est soumis. Ces règles collectives sont modélisées par des objets de type **Constraint**. Une contrainte est caractérisée par les variables :

- **access** : la pompe sur laquelle la règle porte.
- **crisis** : le niveau de crise auquel la contrainte est active. Dans le modèle jouet, **crisis** est donc égal à 0 (situation normale), 1 ou 2.
- **source** : le niveau d'organisation dans lequel la règle est définie. Ainsi, pour les règles collectives portant sur les usagers de la rivière (définies par la CLE), **source** est une instance de **BasinManagement**, alors que pour les règles collectives portant sur les usagers des réseaux (et internes aux réseaux), **source** est une instance de **IrrigationAssociation**.
- **type** est un descripteur du type de contrainte représentée par la règle.
- **args** sont les éventuels arguments venant compléter la description de la règle

Circulation des contraintes Les contraintes sont définies au niveau des groupes et transmises aux usagers des accès sur lesquelles elles portent en début de simulation.

Chaque usager d'un groupe est forcément manager d'un groupe à un niveau plus élémentaire. C'est ce rôle **Manager** qui est chargé de mettre en œuvre les contraintes dans le niveau dont il est responsable. Les rôles **Manager** doivent donc être capables de comprendre les descripteurs des contraintes qu'ils reçoivent.

Dans les niveaux où elles sont mises en œuvre, les contraintes sont associées aux accès concernés (rôles **PumpObservation**). Ainsi, un agriculteur possédant des pompes dans plusieurs réseaux recevra indépendamment pour chacune de ses pompes les contraintes provenant du réseau auquel elle appartient.

Le diagramme de séquence 13 illustre la manière dont les contraintes sont transmises de niveau à niveau.

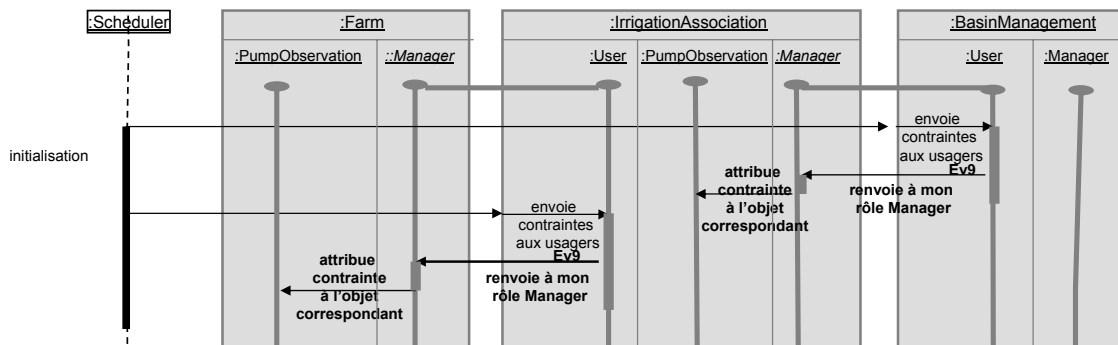


FIG. 13 – Diagramme de séquence de la propagation des contraintes dans le système à l'initialisation

Activation des contraintes La première action de mise en œuvre des contraintes a lieu au début de la phase d'irrigation, quand le rôle **ManagerIrriGibi** est pris en charge

(voir diagramme de séquences 14).

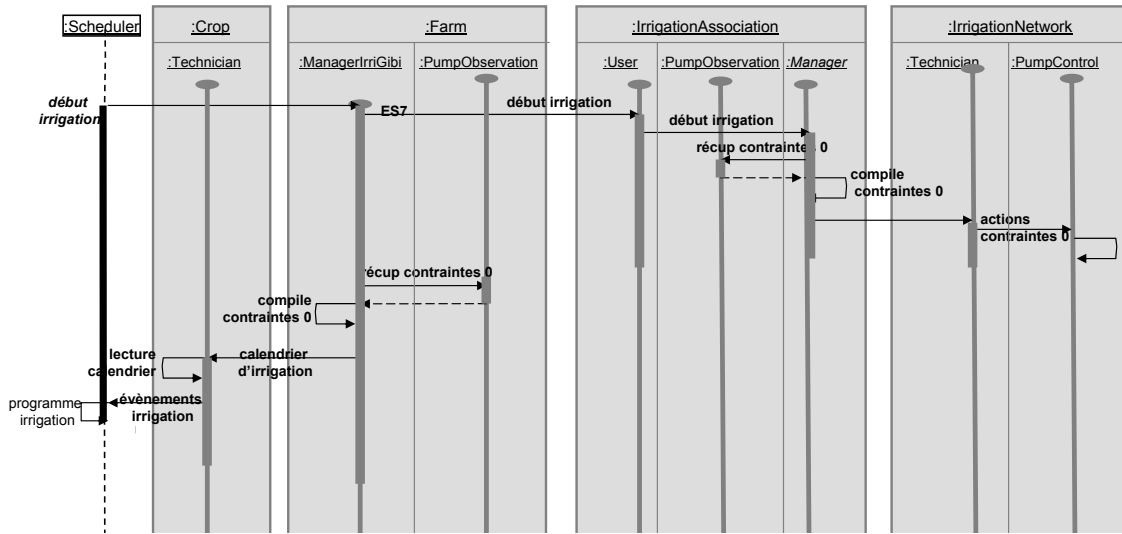


FIG. 14 – Diagramme de séquence de l'utilisation des contraintes à l'initialisation de la phase d'irrigation

A chacune de leurs pompes, les managers vont demander (rôles `PumpObservation`) les contraintes correspondant au niveau de crise qu'elle subit (cette information est entièrement portée par les `PumpObservation`); puis ils compilent les contraintes propre à la pompe en exécutant une méthode `turnToCrisisForPump` : qui leur est propre, et qui caractérise le comportement du manager face aux contraintes exogènes au niveau.

Pour les gestionnaires des réseaux d'irrigation, cette mise en œuvre se traduit par une action directe sur la prise d'entrée du réseau.

De nouvelles mises en œuvre ont lieu chaque fois qu'il faut réviser le calendrier d'irrigation, c'est à dire à chaque changement de niveau de crise (voir la suite).

Les paragraphes suivant décrivent respectivement l'action « compile contraintes » et l'action « lecture calendrier » qui apparaissent sur le diagramme.

Mise en œuvre des contraintes : le calendrier d'irrigation Les `ManagerIrri` sont en charge de la gestion de l'irrigation de l'exploitation représentée par leur groupe de type `Farm`. Pour cela, ils compilent les contraintes issues des niveaux supérieurs avec leurs propres contraintes et objectifs, et stockent le résultat de leur décision dans un objet de type `Calendar`.

Les `Calendar` sont des dictionnaires, associant à chacune des parcelles de groupe (rôles `PlotObservation`) une structure de données (`CalendarEvent`) décrivant les différents paramètres de l'irrigation de cette parcelle : pompe utilisée, fréquence, durée et débit d'irrigation, ainsi que son jour (index dans la période définie par la fréquence) et son heure.

Le diagramme 15 expose les éléments utilisés par les `ManagerIrri` pour leurs calculs de calendrier d'irrigation :

- `plantsIrriRef` est un dictionnaire qui associe à chaque type de plante cultivée par l'irrigant la période d'irrigation, et la quantité d'eau, en mm, à amener durant cette période. Dans le modèle-jouet, tous les `ManagerIrri` ne cultivent que du maïs et demandent 30 mm pour 7 jours, comme dans `GibiDrome`. `plantsIrriRef` est rafraîchi au 15 juillet

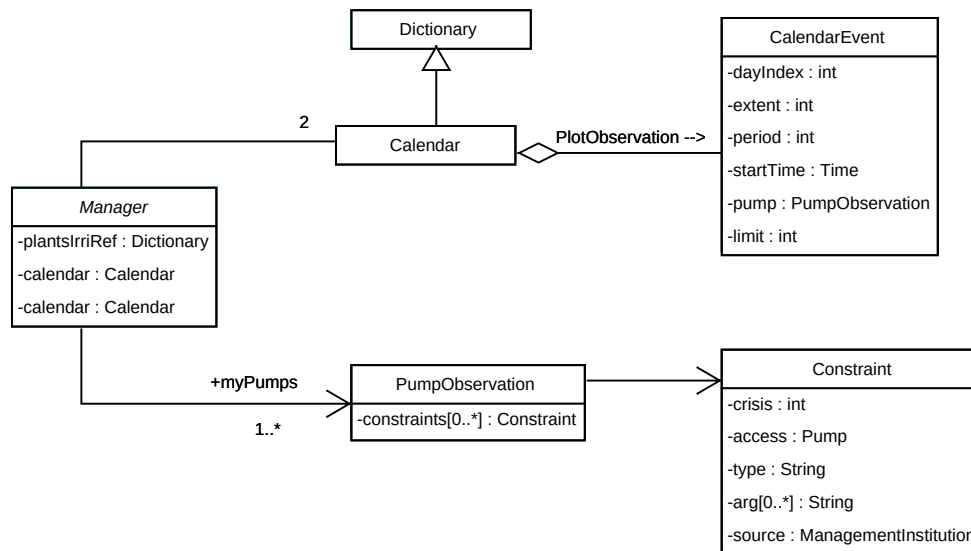


FIG. 15 – Classes utilisées pour la mise en œuvre des règles collectives d’irrigation

pour demander 40 mm, puis au 15 août pour demander à nouveau 30 mm.

- **calendarRef** est un **Calendar** qui décrit le calendrier d’irrigation « idéal » du **ManagerIrri**. Dans le modèle-jouet, **calendarRef** est décrit à la main, pour reproduire l’irrigation de GibiDrome : pour chacune des 6 parcelles, une fréquence d’irrigation de 7 jours, 1 jour dans la semaine, et une distribution sur 23 heures, de minuit à 23 h. Le débit nécessaire est calculé en fonction de la durée d’irrigation et de la quantité d’eau nécessaire (**plantsIrriRef**).

En effet, dans GibiDrome, tout se passe comme si l’irrigation était continue, et les variations sur la quantité d’eau apportée se font en modulant le débit. L’heure laissée libre dans le modèle jouet l’est afin que la fin d’une irrigation et le début de la suivante, qui sont des événements de **Technician** ne se chevauchent pas.

- **myPumps** donne accès aux pompes du groupes, et donc aux contraintes portées par ces pompes.
- **calendar** enfin est le calendrier d’irrigation résultant de la compilation des différents paramètres précédents.

calendar est calculé quand le rôle **ManagerIrri** s’initialise, puis à nouveau à chaque changement dans les contraintes, ou dans **plantsIrriRef**. La méthode de calcul est propre au rôle **ManagerIrriRef**. Dans le modèle-jouet, celui-ci prend toujours comme point de départ le **calendar** en cours puis applique les modifications dictées par les contraintes (voir paragraphe suivant pour plus de détails). Il faut donc toujours définir une contrainte de « retour à la normale » au niveau 0 pour pouvoir revenir à une situation hors restriction.

plantsIrriRef et **calendarRef** donnent donc les caractéristiques de l’irrigation « optimales », hors contraintes, propres au **ManagerIrri**, alors que **myPumps** donne accès aux contraintes issues de niveaux supérieurs, et que **calendar** décrit l’irrigation réellement pratiquée, résultant de la compilation par le **ManagerIrri** de ses caractéristiques et des contraintes qu’il subit.

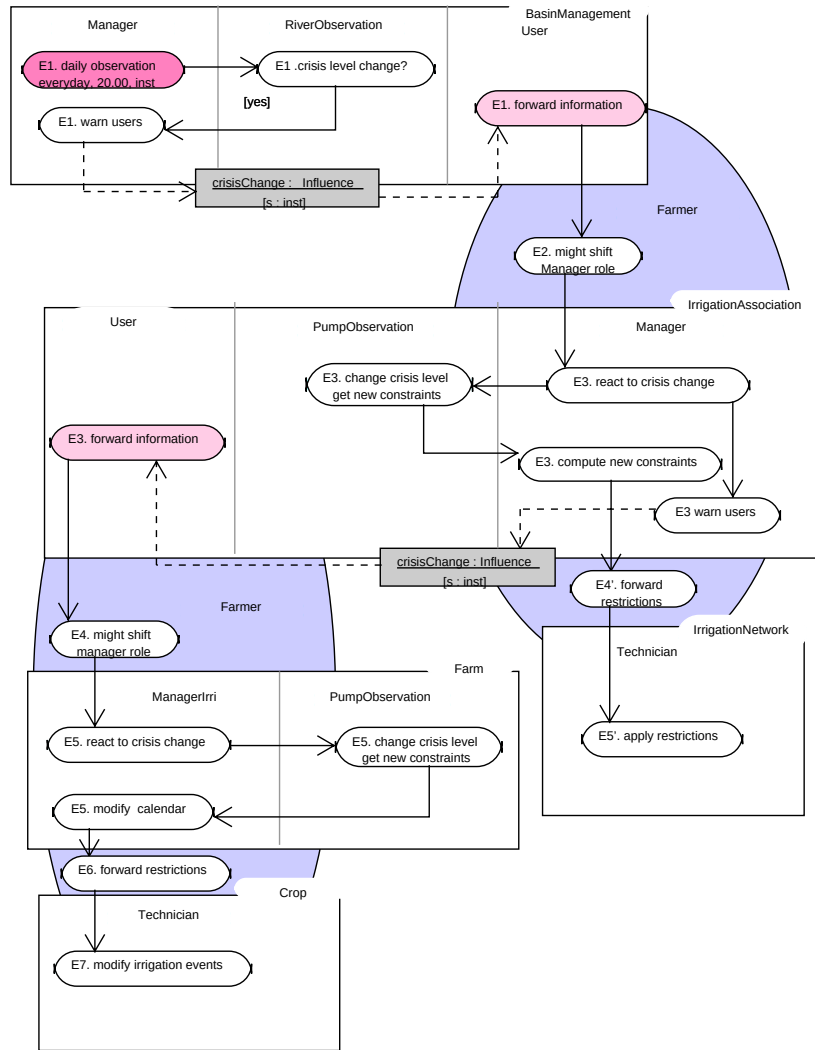


FIG. 17 – Diagramme d’activité des mécanismes du passage en crise : activité quotidienne de surveillance pour la CLE, débouchant sur une propagation de messages vers les niveaux inférieurs en cas de changement de niveau de crise

La circulation des influences annonçant un changement de crise suit le même chemin que celle des contraintes lors de l’initialisation de la simulation.

Changement de rôle lors du passage en crise Dans GibiDrome, les irrigants suivent un comportement différent en situation de crise et en situation normale : en situation de crise, ils irriguent le dimanche leur parcelle la plus sèche. Ce changement de comportement a été modélisé dans le modèle jouet par 2 rôles différents : un rôle **ManagerIrriGibi**, qui suit le comportement décrit jusqu’à présent, et un rôle **ManagerCrisisGibi** qui, en plus, irrigue tous les dimanches sa parcelle la plus sèche.

Le diagramme de séquences 18 illustre utilisation des contrainte et changement de rôle lors du passage en crise.

ManagerCrisisGibi repère chaque samedi sa parcelle la plus sèche (et qui n’est pas en

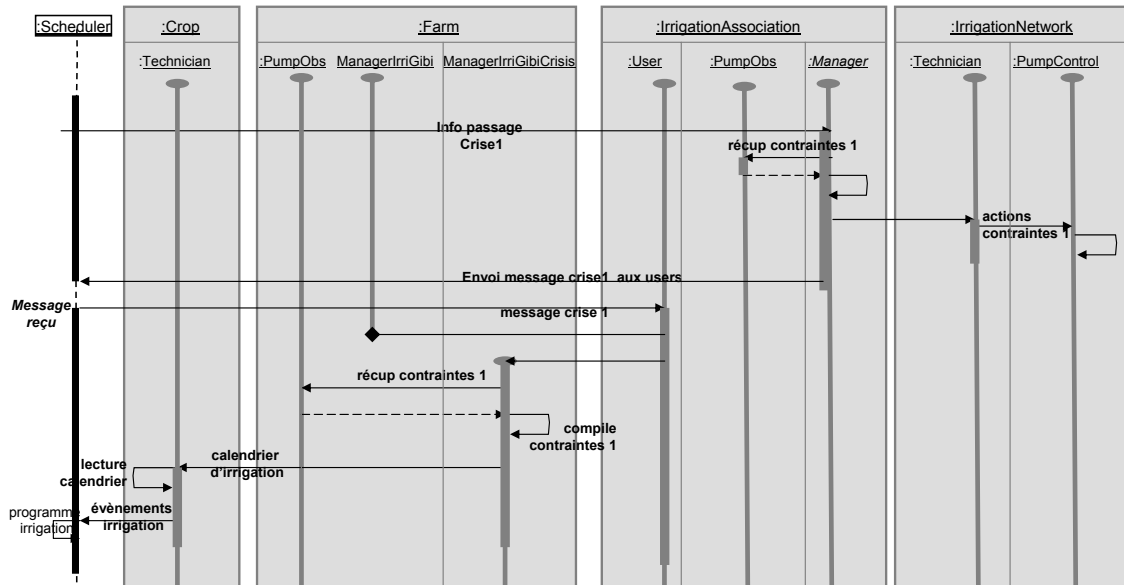


FIG. 18 – Diagramme de séquence de l'utilisation des contraintes et les changements de rôle lors d'un passage en crise

train d'être irriguée), et ajoute dans son calendrier l'irrigation de cette parcelle pour le lendemain. Cette opération est faite le samedi afin que l'irrigation soit bien programmée avant le dimanche. Le `CalendarEvent` correspondant a une fréquence nulle : il ne sera pas reconduit la semaine d'après.

Le changement de rôle se fait lors du passage en crise 1 dans un sens, lors du retour en crise 0 dans l'autre (voir diagramme 19). Les différentes caractéristiques (`plantsIrriRef`, `calendarRef`) sont par défaut passées d'un rôle à l'autre.

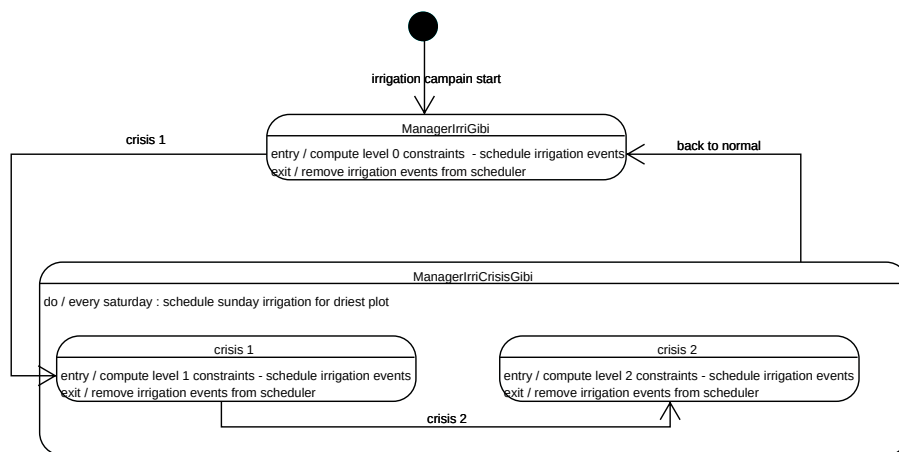


FIG. 19 – Diagramme d'état du rôle `ManagerIrri` : comment un changement de rôle s'effectue lors des changements de niveau de crise

E.4.3 Réalisation dans le modèle-jouet

Les règles collectives présentes dans le modèle-jouet sont traduites en contraintes comme il est présenté dans le tableau 1.

Situation		Modèle	
Accès concerné	Règle	Type contrainte	Arguments contraintes
prises d'entrée réseaux	réduction capacité si crise	flowLimit	partage crise : <code>prelevements</code> / <code>apports</code> niveau référence : <code>capacite</code> / <code>08Maze</code> / <code>10Maze</code> pourcentage réduction : 1 (C0) / 0.8 (C1) / 0.6 (C2)
bornes irrigants	tour d'eau si crise	tourEau	période tour (jours) : 7 index premier jour arrêt dans période : $1 \leq i \leq 7$ nombres jours arrêt : 0 (C0) / 1 (C1) / 2 (C2)

TAB. 1 – Contraintes du modèle jouet

Leur mise en œuvre se déroule comme suit :

- pour l'association d'irrigants : le **Manager** demande à son rôle **Technician** d'aller directement effectuer la modification de capacité de la borne d'entrée. La distinction **prelevement/apport** est caduque puisqu'il n'y a pas de ressource complémentaire dans le modèle-jouet
- pour les exploitations : il peut ne pas y avoir de contraintes. Alors en cas de crise, l'irrigation continue à se faire de la même façon, mais le débit reçu peut ne pas correspondre au débit demandé.

Pour la contrainte `tourEau`, `ManagerIrri` retire de son calendrier d'irrigation les `CalendarEvent` correspondants à la pompe concernée, aux jours d'arrêt du tour d'eau. S'il faut remettre des événements (fin du tour d'eau), il va les chercher dans son `calendar-Ref`. Si période du tour d'eau et période d'irrigation coïncident, cette opération n'est à effectuer qu'une seule fois (c'est toujours la même parcelle qui ne sera pas irriguée). Sinon, il faut la répéter à chaque période du tour d'eau.

Pour une contrainte de type `flowLimit`, c'est la valeur `limit` des `CalendarEvent` concernés qui serait changée.

Annexe F

Listing des classes des modèles

Les différentes classes des modèles sont présentées dans des tableaux :

- agents
- groupes
- rôles, présentés groupe par groupe

Agents		
Abréviations	Classe correspondante	Description
Entités actives		
CA	CA	Chambre d'Agriculture : observe exploitations et envoie bulletins d'information
CLE	CLE	Comité Local de l'Eau : entité porteuse de la gestion du bassin
CI	Climate	Entité responsable du rafraîchissement des séries climatiques
F	Farmer	Agriculteur : choisit des stratégies de gestion
Entités spatiales		
Pi	Pipe	Bief, défini par position géographique et connexions
PI	Plot	Parcelle, définie par type de sol, surface, réserve en eau
Riv	River	Rivière, définie par position géographique et connexions
Entités passives		
P	Pump	Pompe, définie par capacité et débit. Sait s'ouvrir et se fermer
HP	HeadPump	Prise de réseau, définie par le bief qu'elle dessert
TP	TerminalPump	Prise d'irrigant, définie par les parcelles qu'elle peut desservir
Pla	Plant	Culture, classe générique. Définie par coefficients cultureux
M	Maze	Maïs, précise ses propres coefficients cultureux
MS	MazeSemence	Maïs semence, précise ses propres coefficients cultureux
T	Tomato	Tomate, précise ses propres coefficients cultureux

Groupes		
Abréviations	Classe correspondante	Description
Unités fonctionnelles		
B	Basin	Circulation de l'eau au niveau du bassin
C	Crop	Circulation de l'eau au niveau de la parcelle
IN	IrrigationNetwork	Circulation de l'eau au niveau du réseau
Groupes de gestion		
BM	BasinManagement	Allocation de l'eau au niveau du bassin
F	Farm	Allocation de l'eau au niveau de l'exploitation
IA	IrrigationAssociation	Allocation de l'eau au niveau du réseau
Autres types de groupes		
DB	DashBoard	Tableau de bord (niveau du bassin)
ML	MailingList	Liste de diffusion
Ne	Neighbourhood	Voisinage (niveau d'un exploitation)

Rôles – Unités Fonctionnelles		
Abréviations	Classe correspondante	Description
Groupe Crop		
EnP_C	EntryPoint	Point d'entrée dans la parcelle : amène eau à Water_Stock
PC_C T_C	PumpControl Technician	Contrôle d'une pompe Rôle qui met en oeuvre les actions du Manager du groupe de gestion correspondant
WS_C	WaterStock	Réserve d'eau du sol : transforme débit entrant en volume stocké
WT_C PET_C	WaterTransformation PET	Opère le bilan hydrique des plantes Evapotranspiration
Groupe IrrigationNet		
EnP_IN	EntryPoint	Point d'entrée dans le réseau (depuis le bassin ou un autre réseau)
ExP_IN	ExitPoint	Point de sortie du réseau (vers une parcelle ou un autre réseau)
WBL_IN	WaterBranchLoad	Arc du réseau. Distribue débits et demandes aux points d'entrée du réseau
WB_IN	WaterBranch	Type spécial d'arc : distribue sans perte de charge
InfWB_IN	InfiniteWaterBranch	Type spécial d'arc : fournit toujours le débit demandé
PC_IN T_IN	PumpControl Technician	Contrôle d'une pompe Rôle qui met en oeuvre les actions du Manager du groupe de gestion correspondant
Groupe Basin		
EnP_B	EntryPoint	Point d'entrée dans le bassin (débit entrant donné par séries climatiques, ou ressource complémentaire)
ExP_B	ExitPoint	Point de sortie du bassin (vers réseau ou parcelle)
WB_B	WaterBranch	Arc du bassin. Distribue débit d'amont en aval
PC_B T_B	PumpControl Technician	Contrôle d'une pompe Rôle qui met en oeuvre les actions du Manager du groupe de gestion correspondant

Rôles – Groupes de gestion		
Abréviations	Classe correspondante	Description
Groupe Farm		
MI_F	ManagerIrri	rôle gestion irrigation générique
MIC_F	ManagerIrriCopy	rôle gestion irrigation doses selon voisins
MIF_F	ManagerIrriFixe	rôle gestion irrigation doses fixes
MIP_F	ManagerIrriPointu	rôle gestion irrigation doses selon valeurs ru et etp
MS_F	ManagerSow	rôle semis générique
MSA_F	ManagerSowAudacious	semis 3 tomates, 2 maïs semence, 1 maïs
MSD_F	ManagerSowDiversified	semis 1 tomates, 1 maïs semence, 4 maïs
MSM_F	ManagerSowMaze	semis tout maïs
MSt_F	ManagerStartIrri	rôle lancement irrigation générique
MStC_F	ManagerStartIrriCopy	rôle lancement irrigation selon voisins
MStCe_F	ManagerStartIrriCentral	rôle lancement irrigation selon bulletin d'information central
MStF_F	ManagerStartIrriFixe	rôle lancement irrigation à date fixe
MStP_F	ManagerStartIrriPointu	rôle lancement irrigation selon valeur ru
CM_F	CalendarManager	Rôle gestion calendrier irrigation générique
FM_F	FlowManager	Rôle gestion calendrier en modulation de débit
TM_F	TimeManager	Rôle gestion calendrier en modulation de temps générique
TMS_F	TimeManagerShort	Rôle gestion calendrier en modulation de temps ressource limitée : irrigations toute la journée
TMM_F	TimeManagerMiddle	Rôle gestion calendrier en modulation de temps ressource moyenne : irrigations la nuit
TMW_F	TimeManagerWide	Rôle gestion calendrier en modulation de temps ressource large : 2 irrigations par nuit
PO_F	PumpObservation	Point de vue sur une pompe
PIO_F	PlotObservation	Point de vue sur une parcelle
Groupe IrrigationAssociation		
M_IA	Manager	Gestionnaire du réseau
MFS_IA	ManagerFlowForSoil	Gestionnaire special : distribue debits suivant types de sols
Us_IA	User	Abonné du réseau
Cu_IA	Customer	Client du réseau (autre réseau ayant contrat de vente d'eau)
PO_IA	PumpObservation	Point de vue sur la prise d'entrée du réseau
POM_IA	PumpObservationMember	Point de vue sur une borne d'un abonné
POC_IA	PumpObservationCompl	Point de vue sur une ressource complémentaire du réseau
POCu_IA	PumpObservationCUser	Point de vue sur une borne d'un client
Groupe BasinManagement		
M_BM	Manager	Gestionnaire du Bassin
U_BM	User	Usager du bassin (classe générique)
CU_BM	CollectiveUser	Usager collectif du bassin
IU_BM	IndividualUser	Usager individuel du bassin
POC_BM	PumpObservationCompl	Point de vue sur une ressource complémentaire du bassin
POM_BM	PumpObservationMember	Point de vue sur une prise d'un usager du bassin
RO_BM	RiverObservation	Point de vue sur un point de la rivière

Rôles – Autres Groupes		
Abréviations	Classe correspondante	Description
Groupe DashBoard		
E_DB	Expert	Expert : observe le bassin et fournit des données pour l'irrigation
CO_DB	ClimateObservation	Point de vue sur le climat
PlaO_DB	PlantObservation	Point de vue sur une culture
PIO_DB	PlotObservation	Point de vue sur une parcelle
Groupe MailingList		
T_ML	Transmitter	Emetteur de la liste de diffusion
S_ML	Subscriber	Abonnés à la liste de diffusion
Groupe Neighbourhood		
M_Ne	Me	Rôle central du voisinage
N_Ne	Neighbour	Rôles périphériques du voisinage
PIO_Ne	PlotObservation	Point du vue sur une parcelle périphérique

Annexe G

Paramètres des modèles

Le tableau suivant présente l'ensemble des paramètres de GibiH. Les paramètres sont listés selon le niveau d'organisation où ils s'appliquent, puis par ordre alphabétique. Les paramètres indépendants sont en gras.

On peut toujours retrouver le modèle-jouet et GibiAGR en fixant certains de ces paramètres.

Paramètre	Espace de valeurs	Description
Niveau global		
clim	1971..1996	année climatique : détermine les séries climatiques utilisées
rCompl	{#rien, #Juanons}	ressources complémentaires : fixe $nCompl_i$ et $capaCompl_{i,l}$
Niveau du tableau de bord		
errClim	[0, 1]	erreur sur les prévisions climatiques : détermine l'erreur maximale sur l'ETP envoyée dans le bulletin d'information $(etp_{envoyee} = \frac{\sum_{semaine} (etp_{vraies} * (1 + errClim * (2 * rand - 1)))}{7})$ avec $rand$ tirage uniforme entre 0 et 1 pour chaque valeur d'ETP)
errKc	[0, 1]	erreur sur les données culturales : détermine l'erreur maximale sur le kc envoyée dans le bulletin d'information (même calcul que pour l'ETP)
Niveau du bassin		
nInds	N^*	Nombre d'irrigants individuels
nR	N^*	Nombre de réseaux
nF	N^*	Nombre total d'exploitations. Toutes les exploitations ont 1 seule prise donc $nF = nInds + \sum_{i=1}^{nR} nPr_i$
partageRestr	{#apports, #prelevements}	règle de partage des restrictions (fixe modalité contraintes #flowLimitRelative)
refRestr	{#capacite, #08maze, #10maze}	niveau de référence des restrictions (fixe modalité contraintes #flowLimitRelative)
hObs	0..23	heure à laquelle la CLE effectue l'observation quotidienne de la rivière.
Niveau du réseau d'irrigation		
i	$1..nR$	référence du réseau
capaMain_i (l/s)	N^*	capacité de l'entrée principale du réseau i
capaCompl_{i,l} (l/s)	N^* $l \in 1..nCompl_i$	capacité de l'entrée complémentaire l du réseau i
<i>suite page suivante ...</i>		

suite de la page précédente		
Paramètre	Espace de valeurs	Description
$nCompl_i$	N^*	nombre d'entrées complémentaires du réseau i
nPr_i	N^*	nombre de prises desservies par le réseau i
$rCol_i$	$\{\emptyset, \#tourEau, \#flowForSoil\}$	règle collective dans le réseau i.
$surf_i(ha)$	N^*	surface irriguée du réseau i . Toutes les exploitations ont 1 prise et 6 parcelles de 2 ha, donc $surf_i = 12 * nPr_i$
Niveau de l'exploitation		
j	1..nF	référence de l'exploitation
$modCal$	$\{\#flow, \#time\}$	mode de calcul des calendriers d'irrigation $modCal = \#flow \Rightarrow$ modulation par le débit $modCal = \#time \Rightarrow$ modulation par la durée d'irrigation
$capa_j$	$\{\#short, \#middle, \#wide, \#flowCapa\}$	niveau de ressource en eau de l'exploitation. si $modCal = \#flow$, $capa_j = \#flowCapa$, sinon $capa_j$ est tiré aléatoirement selon les probabilités $p(\#short)$, $p(\#middle)$ et $p(\#wide)$ si $capa_j = \#short$, $\{capaPr_j = 45, roleCal_j = TMS\}$ si $capa_j = \#middle$, $\{capaPr_j = 90, roleCal_j = TMM\}$ si $capa_j = \#wide$, $\{capaPr_j = 200, roleCal_j = TMW\}$ si $capa_j = \#flowCapa$, $\{capaPr_j = 80, roleCal_j = FM\}$
$capaPr_j(l/s)$	N^*	capacité de la prise de l'exploitation
CM_j	$\{TMS\_F, TMM\_F, TMW\_F, FM\_F\}$	rôle de gestion du calendrier d'irrigation (voir annexe F)
$p(\#short)$, $p(\#middle)$, $p(\#wide)$	$[0,1]$	probabilités de réalisation de $capa_j$ $p(\#short) + p(\#middle) + p(\#wide) = 1$
MC_j	$\{MCE\_F, MCG\_F\}$	rôle de gestion de crise (voir annexe F), tiré aléatoirement selon les probabilités $p(MCE\_F)$ et $p(MCG\_F)$
$p(MCE\_F)$, $p(MCG\_F)$	$[0,1]$	probabilités de réalisation de MC_j $p(MCE\_F) + p(MCG\_F) = 1$
MI_j	$\{MIC\_F, MIF\_F, MIP\_F\}$	rôle de gestion de l'irrigation (voir annexe F), tiré aléatoirement selon les probabilités $p(MIC\_F)$, $p(MIF\_F)$ et $p(MIP\_F)$
$p(MIC\_F)$, $p(MIF\_F)$, $p(MIP\_F)$	$[0,1]$	probabilités de réalisation de MI_j $p(MIC\_F) + p(MIF\_F) + p(MIP\_F) = 1$
MS_j	$\{MSA\_F, MSD\_F, MSM\_F\}$	rôle de semis (voir annexe F), tiré aléatoirement selon les probabilités $p(MSA\_F)$, $p(MSD\_F)$ et $p(MSM\_F)$
$p(MSA\_F)$, $p(MSD\_F)$, $p(MSM\_F)$	$[0,1]$	probabilités de réalisation de MS_j $p(MSA\_F) + p(MSD\_F) + p(MSM\_F) = 1$
MSt_j	$\{MStC\_F, MStCe\_F, MStF\_F, MStP\_F\}$	rôle de lancement de l'irrigation (voir annexe F), tiré aléatoirement selon les probabilités $p(MStC\_F)$, $p(MStCe\_F)$, $p(MStF\_F)$ et $p(MStP\_F)$
$p(MStC\_F)$, $p(MStCe\_F)$, $p(MStF\_F)$, $p(MStP\_F)$	$[0,1]$	probabilités de réalisation de MSt_j $p(MStC\_F) + p(MStCe\_F) + p(MStF\_F) + p(MStP\_F) = 1$
Niveau de la parcelle		
k	1..6*nF	référence de la parcelle
$prof_k$	$\{\#leger, \#moyen, \#profond\}$	profondeur du sol de la parcelle. Tiré aléatoirement selon les probabilités $p(\#leger)$, $p(\#moyen)$ et $p(\#profond)$
$p(\#leger)$, $p(\#moyen)$, $p(\#profond)$	$[0,1]$	probabilités de réalisation de $prof_k$ $p(\#leger) + p(\#moyen) + p(\#profond) = 1$

TAB. 1 – Paramètres des modèles : espace de valeurs et description. Se reporter aux figures 83, 84 et 85 pour les abréviations

Annexe H

Définitions générales sur les protocoles de tests de vérification et de sensibilité

Un test de vérification consiste à confronter les valeurs de variables du modèle observées au cours d'une simulation aux valeurs théorique des ces variables selon les hypothèses de modélisation.

Un test de sensibilité consiste à confronter entre elles les valeurs de variables du modèle observées au cours des simulations de différents scénarios.

Dans un cas comme dans l'autre, le test est constitué par la simulation éventuellement répétée d'un ensemble de scénarios.

H.1 Étapes de mise en œuvre d'un test (d'après [Saltelli, 2000])

.

1. Définition du **protocole** du test
 - (a) identification de la **question** à laquelle doit répondre le test : processus à vérifier, hypothèse à examiner
 - (b) identification des **paramètres** du modèle et des **variables à observer** qui permettent d'aborder la question
 - (c) définition de l'**espace des valeurs des paramètres** : valeurs discrètes ou de densités de probabilités que les paramètres doivent parcourir.
 On note l'ensemble des valeurs d'un paramètre $\mathbf{e}_i$ $E_i = \{e_i\}$.
 Il est fréquent que l'espace des valeurs d'un paramètre soit constitué de la valeur de référence (valeur moyenne), d'une valeur haute et d'une valeur basse (bornes) de ce paramètre. Alors $E_i = \{e_{-i}, e_{Ref_i}, e_{+i}\}$.
 - (d) génération des **scénarios** par exploration de l'espace des paramètres en utilisant une technique appropriée (voir plus loin)
2. **Simulations** des scénarios du protocole, chaque scénario pouvant être simulé plusieurs fois afin de prendre en compte les aléas du modèle.
3. **Analyse** des observations des simulations : comparaison à des valeurs théoriques ou attendues (vérification), analyses graphiques ou statistiques (sensibilité)

Les mathématiques et les statistiques fournissent des techniques éprouvées pour mener des analyses systématiques sur des modèles mathématiques et fournir des mesures quantitatives d'incertitude ou de l'importance relative de tous les paramètres du modèle : analyses locales utilisant des dérivées partielles, ou globales telle que la méthode de Monte-Carlo [Campolongo *et al.*, 2000]. Ces méthodes mathématiques ne sont pas adaptées à ce stade de l'exploration du modèle qui est avant tout qualitative et explicative.

La méthode expérimentale est plus adaptée pour aborder les modèles complexes [Legay, 1997]. Les **techniques de criblage** (screening) se rapprochent des sciences expérimentales, en ce qu'elles fournissent des techniques pour construire des plans d'expériences. Ces méthodes s'efforcent de minimiser le coût d'un plan (nombre de scénarios définis par le plan) en proposant des méthodes d'exploration de l'espace des paramètres.

H.2 Techniques de criblage

Définitions et notations

Les techniques de criblage fournissent des méthodes d'exploration raisonnées de l'espace des paramètres d'un modèle.

On définit la **matrice de criblage** M d'un test comme le sous-ensemble de l'espace des paramètres résultant de l'application d'une technique de criblage qui sera simulé durant le test.

Par exemple, si un modèle est défini par 3 paramètres $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ et $\mathbf{c}$, et qu'un test se propose d'explorer des valeurs de référence, hautes et basses de ces paramètres, l'espace des valeurs des paramètres est défini par la matrice

$$E = \begin{pmatrix} aRef & aRef & aRef & a- & a- & a- & a+ & a+ & a+ \\ bRef & b- & b+ & bRef & b- & b+ & bRef & b- & b+ \end{pmatrix}$$

Chaque colonne de E définit une combinaison possible de valeurs de paramètres pour le test, et un criblage consiste à restreindre l'espace de ces combinaisons en sélectionnant selon une technique appropriée un ensemble de colonnes de E . Ainsi, une matrice de criblage peut être

$$M = \begin{pmatrix} aRef & a+ & a+ \\ bRef & b- & b+ \end{pmatrix}$$

La matrice de criblage peut être utilisée pour définir les différents scénarios explorés par un test (1 colonne pour chaque scénario), ou bien elle peut être utilisée pour définir les valeurs parcourues par des paramètres de forçage durant une simulation.

[Campolongo *et al.*, 2000] présentent les techniques de criblage les plus employées.

One-At-Time (OAT) Cette technique consiste à faire ne faire varier un paramètre à la fois sur la base d'un scénario de référence : en reprenant l'exemple de l'encadré,

$$M_{OAT(1)} = \begin{pmatrix} aRef & a- & a+ & aRef & aRef \\ bRef & bRef & bRef & b- & b+ \end{pmatrix}$$

C'est la méthode la plus simple et la moins coûteuse ($2*n_e + 1$ scénarios pour n_e paramètres à 3 valeurs) mais elle n'explore pas les effets des interactions entre les paramètres.

Plan factoriel complet Il s'agit alors d'explorer l'espace des paramètres dans son entier. C'est la plus complète mais la plus coûteuse (3^{n_e} scénarios pour n_e paramètres à 3 valeurs).

Plans factoriels fractionnels Il s'agit alors d'explorer l'espace des paramètres de manière partielle suivant différentes techniques plus ou moins raisonnées :

- parcours aléatoire du plan factoriel
- élimination a priori des interactions entre les paramètres jugés indépendants
- élimination a priori des interactions d'ordre élevé ((une interaction d'ordre i est générée par la combinaison des variations de $i + 1$ paramètres par rapport au scénario de référence))
- méthodes dynamiques qui cernent des régions de l'espace des paramètres au fur et à mesure des simulations