



HAL
open science

Approche biophysique des processus de développement et de croissance des couverts végétaux : Interaction avec le stress hydrique et optimisation des pratiques culturales en climat méditerranéen

Samir Meridja

► To cite this version:

Samir Meridja. Approche biophysique des processus de développement et de croissance des couverts végétaux : Interaction avec le stress hydrique et optimisation des pratiques culturales en climat méditerranéen. Sciences agricoles. AgroParisTech, 2011. Français. NNT : 2011AGPT0057 . pastel-00776775

HAL Id: pastel-00776775

<https://pastel.hal.science/pastel-00776775>

Submitted on 16 Jan 2013

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.

Doctorat ParisTech

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement

(AgroParisTech)

présentée et soutenue publiquement par

Spécialité : Agronomie-Environnement

Samir MERIDJA

Le 27 Septembre 2011

Approche biophysique des processus de développement et de croissance des couverts végétaux : Interaction avec le stress hydrique et optimisation des pratiques culturales en climats méditerranéens

Directeur de thèse : **Alain PERRIER**

Jury

M. Abdellah AIDAOUI,	Professeur,	ENSA d'Alger (Algérie),	Examineur
M. Sami BOUARFA,	Ingénieur du GREF,	CEMAGREF (Montpellier),	Examineur
M. Yves COQUET,	Professeur,	AgroParisTech,	Examineur
M. Cyril KAO,	Ingénieur ENGREF,	AgroParisTech,	Rapporteur
Mme. Katia LAVAL,	Professeur,	UPMC (Jussieu)	Examineur
M. Alain PERRIER,	Professeur,	AgroParisTech,	Directeur de thèse
M. Pierre RIBSTEIN,	Professeur,	UPMC (Jussieu),	Rapporteur
Mme. Andrée TUZET,	Chargée de Recherche,	INRA-Grignon,	Examineur

REMERCIEMENTS

Mon travail étant réalisé sur plusieurs années dans le cadre d'une collaboration de plusieurs équipes françaises et algériennes, il m'est difficile de dresser une liste exhaustive de tous ceux qui m'ont aidé pour accomplir ce travail. Je tiens ici à remercier chaleureusement toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'accomplissement de ce travail.

Mes remerciements vont tout d'abord au professeur Alain Perrier, que j'ai eu l'honneur d'avoir comme encadrant pour ce travail. Je lui suis reconnaissant d'avoir partagé avec moi sa grande expérience. Je tiens aussi à le remercier pour sa patience, sa rigueur et ses conseils très avisés, mais aussi pour m'avoir prodigué un soutien et une amitié son faille.

Mes remerciements vont également aux membres de jury pour le temps qu'ils ont pris pour examiner ce travail et les remarques constructives qu'ils ont pu formuler.

Ce travail a fait l'objet d'une collaboration franco-algérienne de plusieurs équipes, je voudrai remercier :

Pour la partie française :

Andrée Tuzet et Erwan Personne, pour l'aide précieuse qu'ils m'ont prodiguée et pour leurs remarques et conseils pertinents.

Olivier Zurflu qui, grâce à son excellent travail de programmation, a permis au modèle d'être rapidement opérationnel.

L'ensemble du personnel de l'EGC de grignon où j'ai effectué mon stage, de même que l'ensemble du personnel du département SIAFEE de l'AgroParisTech. En particulier, je remercie Christine Dante pour son soutien et son aide.

Pour la partie algérienne :

Aidaoui Abdelah, pour avoir accepté présidé cette coopération du coté algérien et pour avoir facilité la mise en place des expérimentations et leurs déroulements.

Sellam Fouad, pour avoir contribué de près à la réussite des tests expérimentaux.

L'ensemble des enseignants du département Génie Rural de l'ENSA d'Alger, pour le soutien et l'intérêt qu'ils ont manifesté à cette collaboration scientifique.

Tous les étudiants qui ont participé à ce projet. Je citerai en particulier Hichem Mokrani et Fahima Filali.

En fin, je tiens à remercier vivement mes parents ainsi que mes frères et soeur de m'avoir permis de poursuivre mes études supérieures et de m'avoir prodigué soutiens et aides durant tout ce parcours.

Résumé :

En vue de rendre le modèle « Bilhyna » des échanges énergétiques et hydriques mieux adapté à des études concrètes sur l'eau et la production réelle par rapport aux valeurs potentielles d'une culture, il est important d'effectuer une meilleure analyse des grandeurs de développement et croissance des couverts. Cette approche est donc nécessaire, soit pour analyser les consommations en eau et les besoins en conditions d'irrigations de complément, en particulier pour des zones semi-arides selon le niveau de satisfaction régionalement possible, soit pour pouvoir conduire efficacement des analyses prospectives liant climat et ressources en eau

C'est pourquoi ce travail présente un modèle biophysique de fonctionnement de culture capable de traduire la dynamique de l'évolution de tout couvert végétal, sous différentes conditions abiotiques du milieu (température, eau et rayonnement) mais aussi de sols et de climats. L'approche développée pour le suivi de la cinétique de développement et de croissance des couverts reste très proche de la réalité physiologique globale des fonctionnements des cultures et prend en compte aussi le poids des interventions techniques qui restent compatibles avec l'échelle de notre modélisation (travail du sol, type de culture, semis, irrigations, récolte avec la succession des cultures en intra annuelles et inter annuelles).

Alors que la plupart des modèles de fonctionnement des cultures permettent de prendre seulement l'effet d'une simple loi linéaire d'action de la température sur une gamme assez limitée de températures actives pour une espèce végétale, l'approche plus générique adoptée dans ce modèle cherche à prendre en compte les différents processus biologiques liés au développement et à la croissance, valable pour toute la gamme des températures biologiquement actives. Aussi, cette approche très générique permet de suivre la cinétique des vitesses d'évolution de toutes entités d'une plante, quelle que soit l'espèce ou la variété, et de travailler à n'importe quelle échelle de temps (du jour à la demie heure) et de suivre les bilans sur des périodes annuelles aussi longues que souhaitées.

L'adaptation du modèle logistique, largement utilisé pour décrire les processus biologiques, est appliquée au contexte physiologique des plantes et a permis une description assez originale de la dynamique de la croissance en fonction du temps physiologique (somme des vitesses de développement) et, à chaque instant, en fonction de l'effet d'une contrainte du milieu et de sa rétroaction sur la dynamique d'évolution du couvert. La régulation de la croissance par des contraintes au sein de ce modèle de développement-croissance se fait à travers le coefficient de modulation de la vitesse de croissance (processus le plus sensible au stress). Les deux principales contraintes analysées, car les plus importantes chez les végétaux, sont d'ordre climatiques, soit hydriques (édaphique) et radiatives. A partir d'un petit nombre de paramètres facilement abordables par la bibliographie pour une espèce ou une variété donnée, il est possible de caractériser la dynamique d'évolution de tout type de couvert végétal évoluant en conditions de sol et de climat variés.

Couplé au modèle de bilan hydrique « Bilhyna », ce dernier est capable de fonctionner sous différentes situations de milieu, avec notamment des conditions pluviales limitantes ; il s'agit de gérer au mieux le manque d'eau par une bonne répartition des apports disponibles ou encore de limiter les apports aux besoins d'une croissance non potentielle acceptée.

Pour étudier notre modèle, nous avons confronté dans un premier temps les sorties du modèle de loi d'action de la température sur les vitesses de développement aux résultats expérimentaux concernant les cultures de lin, de maïs et de blé, issus de plusieurs travaux d'auteurs assez connus et tirés de la bibliographie. La confrontation des résultats modèle-

mesures a donné des résultats très satisfaisants. Nous avons dans une seconde partie confronté les sorties de l'ensemble du modèle biophysique couplé à « Bilhyna » aux mesures expérimentales que nous avons réalisées au champ sur une période de cinq années, et portant sur deux cultures : le sorgho et le blé. Nous avons ainsi suivi l'évolution de la dynamique de ces couverts à travers leurs trois composantes (l'indice de surface foliaire, LAI, la hauteur du couvert, Zh, et la profondeur de ses racines, Zr) et leurs conséquences au niveau des stocks d'eau du sol durant toute la période de la croissance des cultures. Les résultats de la confrontation des sorties du modèle avec les mesures expérimentales ont été assez satisfaisants.

L'introduction de deux modules liés aux pratiques agricoles, que sont le labour et le semis, a de plus permis au modèle « Bilhyna » d'élargir son champ d'aide à la décision pour les producteurs qui désirent réaliser ces pratiques dans des conditions favorables de croissance de leurs cultures, tout en préservant le potentiel de production sol contre d'éventuelles conséquences liées à une mauvaise conduite de ces deux pratiques.

Ainsi complété, le modèle « Bilhyna » couple à présent trois sous-modules : (i) modèle biophysique de développement-croissance ; (ii) loi de modulation par les contraintes ; (iii) modèle d'interventions techniques (labour et semis). Il est capable, avec un petit nombre de paramètres définis dans la bibliographie, de suivre le bilan hydrique d'un système de culture évoluant sous différentes situations de milieu et de gérer tout manque d'eau avec des apports possibles par irrigation de complément. Avec ces aspects automatiques, le suivi optimal d'une culture sur des données climatiques régionales simulées permet un cycle réaliste d'évolution du couvert modulé par le climat réel, au décisions prises en fonction du climat passé et de la statistique du climat proche (basée sur une moyenne de 10 par exemple) afin de gérer aussi les besoins en eau en fonction des réservoirs en eau (naturels ou artificiels) régionalement disponibles

Compte tenu des variations et des changements climatiques à venir (élévation des températures, manque d'eau dans certaines régions et à certaines périodes, aléas d'extrêmes en particulier de températures, etc.) auxquels devront faire face de nombreuses régions dans le monde et dans la zone du bassin méditerranéen en particulier, cet outil commence à être bien adapté. Succession de cultures et adaptation du cycle de culture aux conditions climatiques et aux disponibilités en eau pour l'irrigation seront, grâce à ce travail, d'une part possibles et d'autre part mieux adaptées à la recherche d'optima eau-production.

TABLE DES MATIERES

Résumé	03
Introduction générale	16
CHAPITRE I. BILHYNA : Rappels des bases physiques du modèle	20
I.1. Introduction	21
I.2. Modèle physique	23
I.2.1. Schématisation des processus	23
I.2.2. Modèle de bilan d'énergie	25
I.2.2.1. Chaleur latente ou évaporation d'une surface, Φ_L	25
I.2.2.2. Chaleur sensible d'une surface Φ_s	25
I.2.2.3. Expressions générales et Demande climatique (EP)	26
I.2.2.4. Expressions utilisées dans le modèle	26
I.2.3. Couplage sol-végétation	27
I.2.3.1 Système sol	28
I.2.3.2 La transpiration du couvert	29
I.2.3.3 Prélèvement d'eau dans le sol par la plante	30
I.2.3.4 Conclusions couplage sol-végétation	31
I.2.4. Les bilans d'eau : Apports et devenirs (pluie - irrigation)	32
I.2.4.1. Intensité de la pluie	32
I.2.4.2. Les irrigations	33
I.2.4.3. Interception	33
I.2.4.4. Infiltration et ruissellement de surface :	34
I.2.4.5. Redistribution entre couches et flux profonds	36
I.3. Conclusion	38
CHAPITRE II. Modèle biophysique de développement-croissance	39
II.1. Généralités	40
II.1.1. Évolution de la culture et phases de développement	40
II.1.2. Vitesse de développement au cours d'une phase	42
II.1.2.1. Définition de la vitesse de développement	42
II.1.2.2. Définition du temps physiologique	42
II.1.3. Loi de croissance au sein d'un stade	43
II.2. Modèle biophysique développement-croissance	43
II.2.1. Modélisation de la vitesse de développement.....	43
II.2.1.1. Généralités	43
II.2.1.2. Élaboration de la solution proposée pour la vitesse de développement	44
II.2.1.3. Analyse des variations de la vitesse de développement en fonction de la température optimale des grands types de végétation	47
II.2.1.4. Illustration	48
II.2.1.5 Sensibilité du modèle de vitesse de développement	50
1- Paramétrisation du modèle	50
2- Sensibilité du modèle	51
II.2.2. Modélisation de la vitesse de croissance	53
II.2.2.1. Généralités	53
1- La croissance cumulée	53

2- Application de la logistique aux grandeurs (LAI, Z_h, Z_R)	54
3- Illustration : cas de l'évolution du LAI et Z_h	55
II.2.2.2. Élaboration de la solution proposée pour le cycle de végétation : croissance (<i>trois phases</i>) et sénescence (<i>une phase</i>)	56
1- Phase d'installation	56
2- Phase de développement végétatif (ou foliaire)	57
3- Phase de palier ou de reproduction (début reproduction à début maturation)	58
4- Phase de sénescence	58
II.2.2.3. Illustration de l'évolution du LAI sur le blé d'hiver (les quatre phases) en l'absence de contrainte du milieu (exemple de l'année 1993 dans la Mitidja)	58
II.3. Stress (contrainte) environnemental et réponse des cultures	59
II.3.1. Notion de stress ou de contrainte	59
II.3.2. Facteurs de stress et fonctions de contraintes à la croissance dues au milieu	60
II.3.2.1. Fonction de contrainte due au manque de lumière (f_{PAR})	61
1- Généralités	61
2- Fonction de contrainte proposée (f_{PAR})	62
II.3.2.2. Fonction de contrainte due au manque d'eau dans le sol (f_{EAU})	62
1- Généralités	62
2- fonction de contrainte proposée (f_{EAU})	65
II.3.3 Prise en compte des fonctions de contraintes dans la modulation de la croissance durant le cycle de développement d'un couvert	68
II.3.3.1 La croissance potentielle (absence de contraintes) de LAI_{vert} , Z_h et Z_r	68
II.3.3.2 Modulation de la croissance continue de LAI_{vert} , Z_h et Z_r , sous contraintes du milieu	69
1- Réduction de la croissance pour le LAI_{vert} et Z_h	69
2- Augmentation de la croissance pour Z_r	70
3- Illustration des deux modulations de la croissance sous contraintes du milieu : réduction pour le LAI_{vert} (et donc de Z_h) et augmentation de Z_r	71
II.3.3.3 Modulation de la sénescence continue de LAI_{vert} sous contraintes	72
1- Accélération de la sénescence du LAI_{vert}	72
2- Illustration de la modulation de la sénescence : accélération de la perte du LAI_{vert}	74
II.3.4. Illustration de l'évolution globale du LAI_{vert} du blé : les quatre phases du cycle de développement-croissance	75
II.4. Prise en compte du modèle biophysique (développement-croissance) dans Bilhyna..	76
II.5. Sensibilité du modèle biophysique (développement-croissance) couplé au modèle Bilhyna	79
1- Paramétrisation du modèle	79
2- Sensibilité du modèle	82
3- Conclusion à la sensibilité du modèle et enseignements pratiques à retenir ..	84
II. 6. Conclusion au chapitre modèle biophysique	85
CHAPITRE III. Expérimentation-validation	86
III.1. Expérimentation	87
III.1.1. Site expérimental	87
III.1.1.1 Localisation du site	87
III.1.1.2. Nature et caractéristiques des sols	88
III.1.2. Le matériel végétal	88
III.1.3. Dispositifs, méthodes et conditions expérimentales	89

III.1.3.1. Dispositifs et protocoles expérimentaux	89
III.1.3.2. Méthodes et paramètres de mesures	91
III.1.3.3. Conditions pluviométriques de la période d'essai	92
III.1.4. Résultats expérimentaux	93
III.1.4.1. Sorgho	94
1- Cinétique hydrique	94
2- Cinétique de croissance	95
3- Suivi phénologique et développement (temps physiologique en °Cj)	96
III.1.4.2. Blé	96
1- Cinétique hydrique	96
2- Cinétique de croissance	101
3- Suivi phénologique et développement (temps physiologique en °Cj)	107
III.1.5. Conclusions à l'expérimentation	108
III.2. Validation du modèle biophysique (développement croissance)	110
III.2.1. Validation du modèle de vitesse de développement	110
III.2.1.1. Culture de Lin	110
III.2.1.2. Culture de Maïs	111
III.2.1.3. Culture de Blé	112
III.2.1.4. Conclusion à la validation du modèle de vitesse de développement	112
III.2.2. Validation du modèle biophysique (développement-croissance)	114
III.2.2.1. Introduction	114
III.2.2.2. Evolution du couvert (LAI, Zh et Zr)	116
1- Indice de surface foliaire (LAI)	118
2- Hauteur du couvert (Zh)	121
3- Profondeur des racines (Zr)	122
III.2.2.3. Développement et durée physiologique	122
III.2.2.4. Evolution des stocks d'eau du sol	123
1- Introduction	123
2- Bilan global	124
3- Stock d'eau par traitement et par essai	125
III.2.2.5. Conclusion à la validation du modèle biophysique (développement-croissance)	127
III.3. Conclusion au chapitre expérimentation-validation	128
CHAPITRE IV. Interventions techniques : modèle de prise de décision	
Labour-semis	129
IV.1. Module labour et prise de décision	130
IV.2. Module semis et prise de décision	132
IV.2.1. Conditions nécessaires à la prise de décision d'un semis	132
IV.2.2. Base méthodologique d'analyse du risque	132
IV.3. Application et résultats des simulations (labour-semis)	134
IV.3.1. Données d'entrée pour le modèle labour-semis	134
IV.3.2. Résultats pour le module labour	135
IV.3.3. Résultats pour le module semis	136
IV.4. Conclusion au chapitre modèle labour-semis	137
Conclusion générale	139
Références bibliographiques	143
Annexes	157

Listes des figures

Figure 1. (a) Cumuls annuels des précipitations enregistrées sur Alger entre 1936 et 2004 (données combinées des stations de météorologie de Baraki et de Dar-El-Beida) et (b) Bilan climatique mensuel ($\sum \text{Pluies} - \sum \text{ETP}_{\text{pen}}$) établi sur 37 ans (période de 1967 à 2004) pour la région d'Alger (données météorologiques provenant de la station de météorologie de Dar-El-Beida)	17
Figure 2. Les principales composantes d'un système de culture	21
Figure 2bis. Schéma simplifié des différents processus physiques pris en compte dans le modèle Bilhyna et les principales interactions pouvant exister entre ces processus.	23
Figure 3. Pondération de la transpiration en fonction de l'humidité du sol	30
Figure 4. Fraction de l'eau du sol disponible pour les racines en fonction de la répartition de la densité racinaire le long du profil du sol exploité	31
Figure 5. Quatre principales phases de développement chez le blé (plantes monocarpiques), telles que prises en compte dans le module biophysique de développement-croissance .	40
Figure 6. Vitesse de développement de quatre types de plantes agronomiques en fonction de la température journalière (Salisbury et Ross., 1991)	42
Figure 7. Loi d'action de la température (T en °C et X en adimensionnée) sur la vitesse de développement V_d (courbe rouge) et approximation linéaire, $y = a(T_a - T_0)$, adaptée à un lieu donné (droite bleue)	46
Figure 8. Loi théorique de l'action de la température sur la vitesse de développement selon différentes valeurs de températures optimales (X_{opt}) représentatives des grands types climatiques des cultures	48
Figure 9. (a) Evolution de la vitesse de développement journalière, V_d , selon deux modes de calculs des températures physiologiques donnés : (i) par une approximation par linéarisation et (ii) par la nouvelle solution thermophysique (notre modèle donné au paragraphe II.2.1.2) et (b) cumul des températures physiologiques issues de ces deux modes de calcul (i) et (ii).	49
Figure 10. (a) Evolution de la vitesse de développement journalière, V_d , en fonction des températures physiologiques obtenues avec la nouvelle solution thermophysique (notre modèle tel que donné dans le paragraphe II.2.1.2) pour deux années consécutives et (b) cumul de ces températures physiologiques sur l'ensemble de la phase de développement foliaire considérée.	49
Figure 11. Loi d'action de la température sur la vitesse de développement des cultures : Le Lin (Durant et al 1967), Le Mas (Tollenaar et al 1979) et le Blé (Geslin 1944)	50
Figure 12. Evolution dans le temps (compté en jour) de la croissance de LAI (phase de développement foliaire) selon la logistique de croissance (relation 2bis) en fonction des vitesses de développement imposées par les températures physiologiques journalières : établie sur Versailles pour les années 1975 et 1976 (a) et établie sur Alger pour les années 1992 et 1994 (en conditions potentielles pour les deux sites) (b)	55

Figure 13. Durée physiologique de la phase installation modélisée par Bilhyna en fonction de la profondeur de semis (Z_{semis}) et du coefficient de tallage ($\sigma = 1$ pour la levée et $\sigma = 0.5$ pour début à mi tallage).	57
Figure 14 : Evolution au cours d'une phase de croissance : (a) de la hauteur cumulée d'un article d' <i>Hevea brasiliensis</i> , d'après Halle et Martin 1968 (cité par Lioret, 1974), (b) du LAI du Maïs d'après Racquel (1995) et (c) % du total de la profondeur racinaire du blé d'après ITCG (2002)	57
Figure 15. Evolution dans le temps (compté en jour durant l'hiver 93 à Alger) de la croissance du LAI du blé simulée par le modèle biophysique Bilhyna (logistique de croissance en fonction des vitesses de développement imposées par les températures physiologiques journalières), en l'absence de toutes contraintes du milieu.	59
Figure 16. Assimilation foliaire de trois types de plantes en fonction du rayonnement d'après Leopold & Kriedemann, 1975 (cité in Salisbury et Ross, 1991)	62
Figure 17. Rapport classique montrant la baisse de production, MS_{ETR}/MS_{ETM} , en fonction de la baisse de la consommation en eau, Y_{ETR}/Y_{ETM} , (Rollier 197)	63
Figure 18. Relation entre l'évolution du couvert (dans cet exemple, le taux d'expansion, NLE , et de production des feuilles, RLP) en fonction de la fraction de l'eau du sol disponible pour la transpiration, d'après Lecoer & Sinclair, 1996 (l'auteur donne aussi la relation transpiration, NTR , fonction de l'eau du sol disponible).	63
Figure 19 : Réponse des plantes à une limitation en eau progressive : (a) sensibilité et réaction des différents processus et fonctionnalités cellulaires à une limitation en eau. (b) temps de réaction cellulaire à un déficit hydrique (réponse à la turgescence et réactions moléculaires) (in Larcher 2003)	64
Figure 20. Réponse de l'expansion foliaire (NLE) et de la transpiration de la plante (NTR) pour deux génotypes de tournesol (a) Molody et (b) XRQ*PPR9), en fonction du dessèchement progressif du sol (Casadebaig et al., 2008)	64
Figure 21. Modélisation de la courbe de réduction de la croissance du couvert en réponse à une contrainte hydrique édaphique (fonction de contrainte hydrique f_{EAU}) et pour une gamme variée de sensibilités possibles des cultures et espèces (α).	66
Figure 22. Modélisation de la courbe de réduction de la croissance du couvert en réponse à une contrainte hydrique édaphique (fonction de contrainte hydrique f_{EAU}) et pour deux valeurs de coefficient de contrainte hydrique α (2 et 0.2 pour les courbes en trait fin), et pour deux valeurs de $R_{cr_{max}}$, ($R_{cr_{max}} = R_{cc}$, et $R_{cr_{max}} = 0.5.R_{cc}$) d'un sol donné défini par une seule réserve minimale, R_{min} , et une seule réserve à la capacité au champ, R_{cc}	68
Figure 23 : Effets d'une contrainte hydrique sur la croissance : (A) épuisement modéré de la plante (segment ab) suivi de la perte partielle des fonctionnalités de croissance (segment bc) puis leur récupération sans rattrapage de la croissance non réalisée r_d (segment cd), (B) fort épuisement de la plante (segment ab) suivi de forte perte des fonctionnalités de la croissance (segment bc) sans grandes possibilités de récupération de ces fonctionnalités et par là de la croissance générale de la plante, conduisant à une mort certaine (segment cd) (d'après Hârtel, 1976 (cité in Larcher, 1981).	69

Figure 24. Réduction de la croissance aérienne du couvert (LAI et Zh) au profit d'une stimulation de la croissance en profondeur des racines : (i) en fonction de la contrainte F pour le LAI et Zh (n étant nul pour le LAI et Zh) et (ii) en fonction de la contrainte F et du coefficient de synergie ou d'accélération n pour les racines (n étant toujours supérieur à 1)	72
Figure 25. Evolution de la sénescence en fonction de la contrainte (F) et du coefficient de sensibilité de la sénescence (n)	74
Figure 26. Evolution dans le temps (compté en jours durant l'hiver 93 à Alger) de la croissance du LAI du blé selon la logistique de croissance appliquée à chacune des quatre phases et en fonction des vitesses de développement imposées par les températures physiologiques journalières et soumise à différentes valeurs de contraintes du milieu λ_S (i) maintenues constantes à 1 et à 0.6, pour les courbes (o) et (+), tout au long du développement de la culture (ii) et variables entre 0 (stress infini) et 1 (stress nul) en fonction des apports en eau pour la courbe (Δ), du semis à la récolte	76
Figure 27. Evolution de la profondeur des racines dans les tranches du sol travaillé et non travaillé, tels que pris en compte dans le modèle Bilhyna	78
Figure 28. Evolution du rapport de consommation en eau du blé (ETR/ETM) pour les stades épiaison et floraison et leur moyenne établie sur le sol du site expérimental de l'ENS d'Alger (essai 2000).	81
Figure 29. Sensibilité des différents paramètres d'entrée du modèle sur un cycle de culture depuis le semis jusqu'à la récolte établie sur 37 années.	83
Figure 30. La plaine de la Mitidja (Bassin hydrologique Algérois)	87
Figure 31. Dispositifs expérimentaux établis durant les cinq années d'essais	90
Figure 32. Cumul des pluies en fonction des stades de développement mesurés lors des essais expérimentaux (flèches) et selon les années pour le sorgho et le blé (S, semis; 3f, 3 feuilles; D.tall, début tallage; ep, épiaison; 12 f, 12 feuilles; flor, floraison; Gp, Grain pateux)... ..	93
Figure 33. Mesures des profils d'humidité réalisés sur les quatre traitements (essai sur sorgho été_1999), à partir du 29-07-1999	94
Figure 34A. Mesure de l'indice de surface foliaire LAI sur sorgho (<i>Expérimentation été-1999</i>)	95
Figure 34B. Mesure de la hauteur du couvert Zh sur le sorgho (<i>Expérimentation été-1999</i>)	95
Figure 35. Mesures des profils d'humidités réalisés sur les quatre traitements (essai sur blé <i>vitron hiver_2000</i>) à partir du 29 ^{ième} jour après semis (J.A.S)	97
Figure 36. Mesures des profils d'humidités réalisés sur les quatre traitements (essai sur blé <i>sémito hiver_2001</i>) à partir du 64 ^{ième} jour après semis (J.A.S)	98
Figure 37. Mesures des profils d'humidité réalisés sur les quatre traitements (essai sur blé <i>vitron hiver_2002</i>) à partir du 7 ^{ième} jour après semis (J.A.S)	99

Figure 38. Mesures des profils d'humidité réalisés à partir du 16 ^{ième} jour après semis (J.A.S), sur le seul traitement pluvial conduit durant cet essai sur blé <i>sémito</i> (hiver_2004)	100
Figure 39. Mesures de l'indice de surface foliaire (LAI), de la hauteur du couvert (Zh) et de la profondeur des racines (Zr) sur blé <i>vitron</i> durant l'essai 2000.	102
Figure 40. Mesures de l'indice de surface foliaire (LAI), de la hauteur du couvert (Zh) et de la profondeur des racines (Zr) sur blé <i>semito</i> durant l'essai 2001.	104
Figure 41. Mesures de l'indice de surface foliaire (LAI), de la hauteur du couvert (Zh) et de la profondeur des racines (Zr) sur blé <i>vitron</i> durant l'essai 2002.	105
Figure 42. Mesures de l'indice de surface foliaire (LAI), de la hauteur du couvert (Zh) et de la profondeur des racines (Zr) sur blé <i>semito</i> durant l'essai 2004.	106
Figure 43. (a) Action de la température sur la vitesse de développement du lin (ici germination) mesurée expérimentalement par Durant, R & al. 1967 (courbe en x), comparée à la courbe de cette vitesse simulée par notre modèle de vitesse de développement (courbe en points) et (b) Confrontation entre les valeurs de ces vitesses mesurées expérimentalement et celles simulées par notre modèle de vitesse de développement (Bilhyna)	111
Figure 44. (a) Action de la température sur la vitesse de développement du maïs (ici germination) mesurée expérimentalement par Tollenaar, M et Daynard, T.B . 1978 (courbe en x), comparée à la courbe de cette vitesse simulée par notre modèle de vitesse de développement (courbe en points) et (b) Confrontation entre les valeurs de ces vitesses mesurées expérimentalement et celles simulées par notre modèle de vitesse de développement (Bilhyna)	111
Figure 45. (a) Action de la température sur la vitesse de développement du blé (ici germination) mesurée expérimentalement par Geslin, H. 1944 (courbe en x), comparée à la courbe de cette vitesse simulée par notre modèle de vitesse de développement (courbe en points) et (b) Confrontation entre les valeurs de ces vitesses mesurées expérimentalement et celles simulées par notre modèle de vitesse de développement (Bilhyna)	112
Figure 46. Confrontation globale entre les vitesses de développement simulées par notre modèle (bilhyna) et celles mesurées expérimentalement pour les trois cultures citées dans ce paragraphe III.2.I (toutes valeurs confondues du lin, du maïs et du blé)	113
Figure 47. Evolution du LAI simulée par le modèle Bilhyna en l'absence de toute contrainte due à l'eau ($f_{PAR} = 1$) et : (i) en l'absence de toute contrainte due au manque de lumière, soit $f_{PAR} = 1$, (courbe - - -) ; (ii) en présence de contrainte due au manque de lumière imposé par les conditions réelles de la période de simulation, soit $f_{PAR} \leq 1$, (courbe - - - -). Le niveau de la contrainte due au manque de lumière pour l'ensemble de la période soit $f_{PAR} \leq 1$ représenté par la courbe (—)	115
Figure 48. Simulation du LAIvert (sorgho 1999) selon les conditions hydriques expérimentales imposées pour les différents traitements jusqu'à la fin de la sénescence (a) avec levée du stress hydrique (sans contrainte hydrique, soit $f_{EAU} = 1$) sur tous les traitements depuis le début de la sénescence et jusqu'à la fin du cycle (b)	116
Figure 49. Fréquence des écarts entre les valeurs simulées par le modèle Bilhyna et celles mesurées expérimentalement pour le LAI et Zh (tous les traitements hydriques et années	

d'essais confondus) de même que celles données par l'ITGC (tous les traitements ETM et années d'essais confondus). 117

Figure 50. Confrontation entre les sorties du modèle Bilhyna et (i) les valeurs expérimentales mesurées (a) de l'indice de surface foliaire LAI ; (b) de la hauteur du couvert Zh et (c) de la profondeur des racines Zr ; (ii) de même que les valeurs de la profondeur des racines données par l'ITGC pour une croissance potentielle (d) donnée à titre d'exemple. 117

Figure 51A. Comparaison entre les valeurs de Lai, de Zh et de Zr, mesurées expérimentalement sur traitements ETM, ETR2, ETR1 et Pluv (représentées par \diamond , \square , Δ , \times , respectivement) et celles simulées par le modèle Bilhyna : (i) pour les mêmes conditions expérimentales sur chacun des quatre traitements (courbes en —, —, —, — respectivement) ; (ii) et en l'absence de toute contrainte hydrique (croissance potentielle Pot donnée par la courbe en -). Les valeurs de Zr de l'ITGC (courbe en +) sont présentées à titre indicatif. 119

Figure 51B. Comparaison entre les valeurs de Lai, de Zh et de Zr, mesurées expérimentalement sur traitements ETM, ETR2, ETR1 et Pluv (représentées par \diamond , \square , Δ , \times , respectivement) et celles simulées par le modèle Bilhyna : (i) pour les mêmes conditions expérimentales sur chacun des quatre traitements (courbes en —, —, —, — respectivement) ; (ii) et en l'absence de toute contrainte hydrique (croissance potentielle Pot donnée par la courbe en -). Les valeurs de Zr de l'ITGC (courbe en +) sont présentées à titre indicatif. 120

Figure 51C. Comparaison entre les valeurs de Lai, de Zh et de Zr, mesurées expérimentalement le traitement Pluv (représentées par \times) et celles simulées par le modèle Bilhyna pour les mêmes conditions expérimentales (courbe en trait plein) et (ii) et en l'absence de toute contrainte hydrique (croissance potentielle Pot donnée par la courbe en -). Les valeurs de Zr de l'ITGC (courbe en +) sont présentées à titre indicatif. 121

Figure 52. Confrontation des valeurs simulées par le modèle et celles mesurées expérimentalement (tous traitements et années confondus) pour les deux cultures (a) et fréquences des écarts entre ces valeurs mesurées et simulées (b) 124

Figure 53A. Evolution des stocks d'eau mesurés expérimentalement (sorgho été 1999) et simulés par le modèle Bilhyna pour deux niveaux de confort hydriques imposés : celui du traitement proche de l'ETM (pluies + irrigations) et celui du traitement conduit sous conditions uniquement pluviales (sans irrigation) 125

Figure 53B. Evolution des stocks d'eau mesurés expérimentalement (blé 2000, 2001, 2002 et 2004) et simulés par le modèle Bilhyna pour deux niveaux de confort hydriques imposés : celui du traitement proche de l'ETM (pluies + irrigations) et celui du traitement conduit sous conditions uniquement pluviales (sans irrigation) 126

Figure 54. (a) Evolution de la consommation (ou besoin) en eau possible (E) pour la période d'étude statistique (pour une réserve en eau supérieure ou égale à 75% de R_{max}), associée à un niveau de probabilité obtenu à partir de cinq dates de semis réalisés durant cette même période d'étude (chaque courbe exponentielle ajuste les points des besoins en eau de la culture obtenus chaque jours et appartenant au même niveau de probabilité) et (b) Evolution (i) de la profondeur de semis (droite en noir) en fonction des dates de semis prises en compte durant la période d'étude statistique (évolution journalière assimilée à une droite Zr_{fin}) ; (ii) et de la réserve de sécurité $R_{sécu}$ (droite en rouge) 133

Figure 55. Premières dates de labours et des semis simulées par Bilhyna durant la période de simulation (période allant du 15 septembre pour le labour et du 20 octobre pour le semis jusqu'au début janvier). 135

Figure 56. Effet de la prise en compte de la valeur de la réserve de sécurité (Rsécu) sur la prise de décision des dates de semis par le modèle Bilhyna : **(a)** semis possible à partir du 04 octobre pour une Rsécu = 50 mm (point d'intersection entre besoin probable de la période (consommation E+Rsécu)j et les disponibilités réelles en eau du sol pour la plante Bj) ; mais **(b)** semis retardé de 16 jours pour les mêmes conditions de consommation (E) mais avec, cette fois, ci une Rsécu = 88 mm (risque plus élevé), soit un semis possible à partir du 20 octobre. 137

Listes des tableaux

Tableau 1 : Valeurs des quatre paramètres de températures utilisés comme paramètres d'entrée de références pour l'étude de sensibilité du modèle en fonction des températures.	51
Tableau 2 : Sensibilité de la loi d'action de la température à la variation des principaux paramètres du modèle de développement.	52
Tableau 3 : paramètres physiques et de transpiration des couverts	81
Tableau 4. Paramètres de croissance du couvert	82
Tableau 5 : Paramètres du modèle Bilhyna analysés et intervalles de variations pris en compte dans l'analyse de sensibilité	82
Tableau 6: Granulométrie dominante des deux parcelles expérimentales I et II ...	88
Tableau 7. Caractéristiques du matériel végétal utilisé et dates de semis	88
Tableau 8. Totaux des apports d'eau par irrigation (par traitement et par année expérimentale en mm)	89
Tableau 9. Durées des stades de développement du blé obtenues sur les seuls traitements ETM (bien alimentés en eau) et cumulées depuis le semis et à partir d'une température seuil de -1 °C.	107
Tableau 10: Raccourcissement du cycle total du blé (semis à fin sénescence) dû aux limitations en alimentation hydrique imposées selon les traitements (expérimentation de l'année 2000)	123

Listes des photos

Photo n°1 . Humidimètre à neutron (modèle TROXLER 4300) ayant servi pour le suivi des humidités du sol en profondeur	91
Photo 2. Fosse réalisée pour le suivi de la progression des racines en profondeur	91
Photo 3 : Accélération de la phase de sénescence du blé sur le traitement ayant subi un fort stress hydrique comparé au traitement ETM (peu ou pas de stress hydrique), observée au 130 ^{ième} jour après semis (entre les stades grain laiteux et grain pâteux).	108

Listes des figures et schémas dans les annexes

Annexes II.1.b) Schéma général du déroulement des principaux stades de développement et succession de leurs déroulements selon la classification BBCH (gauche) et des quatre phases de développement, tel les que prises en compte dans Bilhyna (droite).	161
Annexes II.3.Figure 1 . Sensibilité du modèle de la loi d'action des températures sur la vitesse de développement (le lin, le maïs et le sorgho) selon l'erreur minimale pour (b), (c), (d), (e), et maximale pour (f), (g), (h), (i), correspondant à l'ordre de grandeur des erreurs pouvant être commises par l'utilisateur par rapport à la référence (a) et confrontation entre ces valeurs simulées par le modèle et celles mesurées expérimentalement par plusieurs auteurs et tirées de la bibliographie.	163
Annexes III.2.Figure 1A. Confrontation des simulations du modèle aux mesures expérimentales du LAIvert sur les cultures de sorgho et du blé et pour tous les traitements hydriques imposés chaque année	169
Annexes III.2.Figure 1B. Confrontation des simulations du modèle aux mesures expérimentales de la hauteur du couvert Zh sur les cultures de sorgho et du blé, pour tous les traitements hydriques	170
Annexes III.2.Figure 1C. Confrontation des simulations modèle/courbe ITGC de la croissance des racines en profondeur Zr pour le blé en l'absence de tout stress hydrique	170
Annexes III.2.Figure 2A. Evolution des stocks d'eau du sol sur chacun des traitements hydrique imposés pour le sorgho (été 1999) et le blé (variétés vitron 2000 et sémito 2001) : (i) stocks mesurés expérimentalement et (ii) stocks modélisés par le modèle Bilhyna pour les mêmes conditions expérimentales.	171
Annexes III.2.Figure 2B. Evolution des stocks d'eau du sol sur chacun des traitements hydrique imposés pour le blé (variétés vitron 2002 et sémito 2004) : (i) stocks mesurés expérimentalement et (ii) stocks modélisés par le modèle Bilhyna pour les mêmes conditions expérimentales.	172
Annexes IV. Figure 1. Evolution des besoins en eau (ou de consommation) établie sur une culture du blé (pour un niveau de confort supérieur ou égale à 75% R _{max}) simulées par le	

modèle Bilhyna sur la période d'étude statistique allant du 15 octobre à la mi-janvier) : cinq niveaux de probabilités du risque sont données allant du plus intense, pour lequel un risque élevé d'une tarification de l'eau de la réserve du sol est possible avant le début de la période humide (courbe Q5 en couleur marron), au plus faible pour lequel ce risque de tarification de la réserve en eau du sol est très faible (courbe Q1 en couleur verte). 174

Listes des tableaux dans les annexes

Annexes I. Tableau 1: Liste des principaux paramètres et données d'entrées du modèle Bilhyna (Les paramètres spécifiques liés aux lois de développement-croissance sont résumés dans le tableau 2 suivant de la même annexe.	158
Annexes I. Tableau 2 . Liste des paramètres d'entrés du modèle Biophysique.	160
Annexe II.1. a) Tableau récapitulatif des stades de développement des mono et dicotylédones selon l'échelle de classification améliorée de BBCH (Biologische Bundesanstalt, Boundessortenamt et Chemische Industrie) d'après Uwe Meier. 2001.	161
Annexes II.4. Tableau 1. Listes des paramètres analysés dans l'étude de la sensibilité du modèle Bilhyna (développement-croissance).	166
Annexes III.1. Tableau 1. Dates des doses d'irrigations pour chacun des traitements (sorgho 1999).	167
Annexes III.1. Tableau 2. Dates des doses d'irrigation pour chacun des traitements (blé vitron 2000).	167
Annexes III.1. Tableau 2. Dates des doses d'irrigation pour chacun des traitements (blé sémito 2001). ;;	167
Annexes III.1. Tableau 2. Dates des doses d'irrigation pour chacun des traitements (blé vitron 2002).	167
Annexes III.2 Tableau 1 : Principaux paramètres liées au sol, à la plante et au climat, tels que pris en compte dans le modèle Bilhyna pour la validation.	168
Annexes IV. Tableau des valeurs d'humidités utilisées dans le modèle Bilhyna pour simuler les dates de labours et de semis.	173

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

La problématique grandissante des changements climatiques, avec ses conséquences sur les ressources du milieu, est considérée aujourd'hui comme étant le principal frein au développement de nombreuses régions dans le monde. En méditerranée, l'agriculture demeure le secteur le plus directement menacé par ces changements. La diversité des sols, la variabilité interannuelle du climat et le tarissement de la ressource en eau non renouvelable, ou très peu renouvelable, contribuent fortement à l'instabilité des rendements dans cette région, tout particulièrement sur la rive sud où l'agriculture pluviale prédomine encore. Dans ces régions où la ressource en eau est naturellement limitante alors que les consommations anthropiques croissent, raisonner un système de culture et optimiser sa gestion pour régulariser la production annuelle et sa performance, ont un impact non négligeable sur la ressource disponible. Une telle gestion reste cependant d'autant plus difficile que la conduite d'un tel système dépend de nombreux facteurs exogènes aux exploitants agricoles et sur lesquels il n'ont pas prise. Le facteur climatique, aux échelles qui nous intéressent, est celui qui, de tous, présente le plus de sensibilité et de variabilité de tous et pour lequel on doit chercher à s'adapter au mieux.

C'est le cas, à titre d'exemple, de la plaine de la Mitidja où le cumul des précipitations annuelles varie du simple au quadruple (*Figure 1a*), passant de 300 mm (valeur caractéristique des zones semi arides) à près de 1200 mm (valeur caractéristique des zones tempérées) avec en moyenne 655mm/an. Compte tenu du cumul annuel d'évaporation très peu variable dans cette région, centré autour de 1200 mm, la période humide s'étale sur six mois (saison d'automne et d'hiver) pour les années les plus arrosées, soit pour une année sur cinq (*Figure 1b*, courbe bleue) mais est réduite à trois mois seulement (saison d'automne) pour une année sur deux (*Figure 1b*, courbe en noir) et disparaît totalement durant les années sèches, soit une année sur cinq (*Figure 1b*, courbe en rouge)

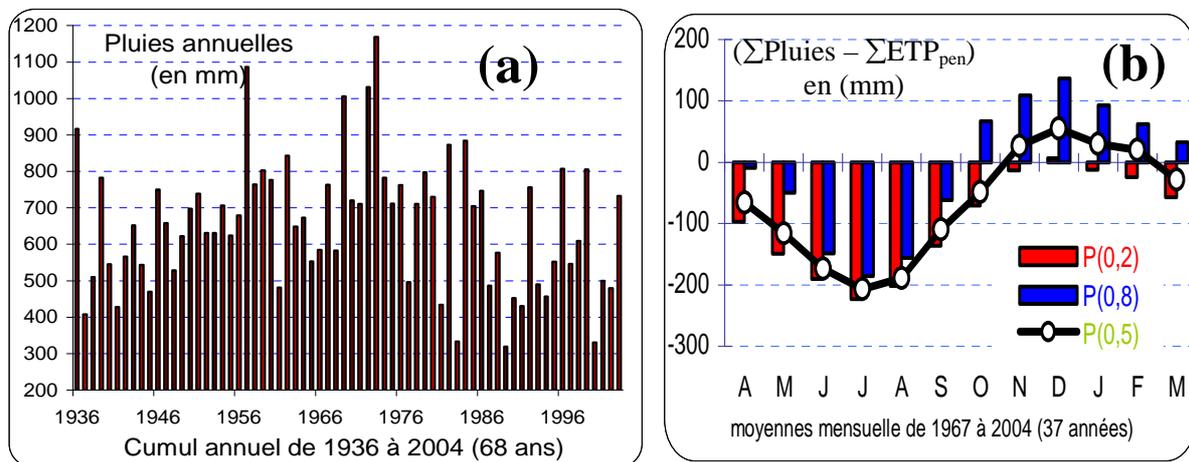


Figure 1. (a) Cumuls annuels des précipitations enregistrées sur Alger entre 1936 et 2004 (données combinées des stations de météorologie de Baraki et de Dar-El-Beida) et **(b)** Bilan climatique mensuel ($\Sigma\text{Pluies} - \Sigma\text{ETP}_{\text{pen}}$) établi sur 37 ans (période de 1967 à 2004) pour la région d'Alger (données météorologiques provenant de la station de météorologie de Dar-El-Beida)

Face à ces problèmes, la recherche scientifique est plus que jamais sollicitée par les producteurs et les pouvoirs publics pour trouver des solutions concrètes, efficaces, réalistes et

applicables aisément. Bien que des méthodes et des techniques soient proposées en réponse à des problématiques bien spécifiques liées soit au sol, soit au climat, soit encore aux cultures et aux interventions techniques, leurs efficacités restent naturellement limitées et seule l'étude d'un système complexe dont le fonctionnement est dicté avant tout par un ensemble de paramètres physico-biologiques en interactions avec le contexte pédoclimatique, ouvre des voies positives pour répondre à de telles problématiques. C'est aussi pourquoi on a souvent recours au domaine de la modélisation qui apparaît particulièrement recommandée pour prendre en charge la diversité et la variabilité des paramètres caractérisant ce système : sols, climats, cultures ainsi que les pratiques culturales plus ou moins spécifiques, intégrant leurs effets combinés sur la production. Plusieurs laboratoires se sont donc orientés vers cette voie afin d'appréhender le fonctionnement des cultures en interaction avec leurs milieux et y maîtriser de façon plus ou moins complète les phénomènes qui s'y déroulent et qui induisent in fine la production.

C'est dans ce contexte que l'équipe de recherche 'Biosphère Atmosphère' de l'UMR EGC (Unité Mixte de Recherche INRA-AgroParisTech, Environnement et Grandes Cultures), basée à Grignon, a développé un modèle de fonctionnement hydrique des couverts végétaux sur des bases analytiques simples pour répondre aux besoins de gestion des irrigations et faire des analyses sur les périodes de croissance des cultures qui nécessitent toujours des besoins en eau plus ou moins satisfaits par l'eau des sols et par le climat annuel; l'objectif étant de conduire des rotations optimales qui maintiennent une irrigation régionale durable.

Le modèle utilisé, dit « Bilhyna » s'applique à toute surface de sol nu, de couvert interface sol-végétation et utilise les bilans d'énergie et de masse pour suivre, de façon annuelle et par des approches robustes et fiables, la dynamique des éco et agrosystèmes. Il conduit à travers différents paramètres physiques du milieu et biologiques des plantes à définir tout au long de l'année, en fonction de la succession des cultures, leur croissance et les divers flux d'échanges dont les termes du bilan hydrologique comme l'interception, l'infiltration, le ruissellement, les flux profonds de drainage et l'évolution des réserves en eau des couches de sol.

Le contexte contraignant de conditions environnementales sévères n'était jusqu'alors pas vraiment pris en compte par ce type de modèle, négligeant toute une série de rétroactions liées aux facteurs climatiques, qui induisent pourtant des modifications physiologiques à long terme sur le développement, la croissance et les régulations stomatiques. En particulier, les éco et agrosystèmes en conditions de climats méditerranéens sont soumis à l'action fréquente de fortes températures et de conditions de sécheresse édaphique souvent récurrentes et donc drastiques ; ces rétroactions ont fait l'objet de notre attention.

Ainsi, l'objectif majeur de ce travail de thèse consiste à enrichir le modèle de fonctionnalités biophysiques tenant compte de différentes contraintes liées au milieu ; ce sont principalement les effets de rétroactions dus à un stress hydrique édaphique et/ou lumineux sur la croissance d'un couvert végétal. Seules ces interactions permettent de prévoir à chaque instant le poids de la disponibilité en eau sur le devenir des couverts et de prévoir une gestion optimale, via l'irrigation de complément qui doit rester en adéquation avec les quantités d'eau mobilisables durablement au niveau régional.

Ce document de travail se présente en quatre chapitres :

* Dans le premier chapitre, les bases physiques du modèle « Bilhyna » et les principaux aspects sur lesquels il se fonde et ce qu'il est capable de fournir comme résultats. Ces rappels présentent les points forts mais aussi les points faibles qui ont amené à développer plusieurs modules pour augmenter sa pertinence et généraliser son utilisation à tous les milieux agropédoclimatiques.

* Le deuxième chapitre présente de façon détaillée l'approche biophysique qui permet d'élargir le domaine d'application du modèle à un grand nombre de couverts végétaux, évoluant dans différentes conditions environnementales, notamment en terme de disponibilité en eau, d'évolution des énergies radiatives et de températures. Le formalisme adopté a permis de décrire adéquatement les principaux processus de fonctionnement de la plante, en tenant compte de leurs réponses physiologiques aux conditions limites du milieu, selon des fonctions biophysiques naturelles et donc non forcément linéaires, ce qui fait toute l'originalité de ce travail.

* Le troisième chapitre présente l'étude expérimentale de cinq années réalisée aux champs sur deux cultures au nord de l'Algérie (plaine de la Mitidja) afin de pouvoir tester le réalisme du modèle en situations environnementales méditerranéennes pluriannuelles, dans un premier temps, suivie d'une analyse de validation basée en grande partie sur ce jeu de données expérimentales. Cette partie est très importante dans la conception des modules additionnels car elle fournit des informations sur sa qualité (modèle) et sa pertinence dans la mesure où celui-ci est amené à être utilisé dans différentes situations et contextes. Elle permet aussi de dégager les orientations nécessaires à une certaine amélioration future du modèle

* Le quatrième, quant à lui, est plus spécifiquement consacré à l'application du modèle à une région de type méditerranéen en vue de parfaire sa généralité et son automaticité en vue d'analyser sur le long terme le poids des choix cultureux sur la gestion durable des irrigations. De même que les rétroactions ont été essentielles pour améliorer l'optimisation de la gestion de l'eau, de même des modules d'optimisation des interventions techniques dont le poids demeure très important pour l'optimisation de l'eau, devient aussi un élément majeur de la valorisation des capacités du modèle. Dans le cas de la céréaliculture méditerranéenne le choix automatique du labour puis du semis en fonction du bilan hydrique réel au jour (j) et des probabilités du bilan hydrique et du développement jusqu'à la fin de la période pluviale selon ce jour (j) est considérable. Ainsi, favoriser la meilleure adaptation du cycle de la culture pour des analyses pluriannuelles est le meilleur moyen de valoriser ce modèle dans le cadre d'une analyse optimale de l'eau selon des conditions agropédologiques

CHAPITRE I.

BILHÝNA : RAPPELS DES BASES

PHÝSIQUES DU MODÈLE

I. BILHYNA : Rappels des bases physiques du modèle

I.1. Introduction

La description et la représentation des différents processus physiques et biologiques d'un système cultural, souvent traduit sous forme de programmes informatiques appelés modèles, permettent de décrire qualitativement et quantitativement l'évolution spatio-temporelle de ses principales caractéristiques. En agronomie, le système en question est constitué en général d'une surface appelée sol, recouverte le plus souvent par une couverture végétale évoluant sous l'effet de conditions imposées, appelées « variables de forçages » et représentées généralement par les conditions climatiques et les pratiques agricoles (*Figure 2*). Modéliser le bilan hydrique exige non seulement la prise en compte de nombreux processus mais aussi de leurs interactivités. Son évolution se trouve alors directement soumis à un ensemble de facteurs : (1) ceux relatifs au forçage climatique dont les éléments moteurs sont la pluie, le vent, l'humidité relative de l'air, la température de l'air et le bilan radiatif ; (2) ceux relatifs au sol et au sous-sol et aux paramètres et grandeurs qui caractérisent les états physique et hydrique) ; (3) enfin ceux relatifs à la culture, principalement la couverture végétale dont le fonctionnement et l'évolution conditionnent fortement les échanges entre l'atmosphère et le sol (échanges radiatifs et convectifs de masses et de chaleurs) et sa sensibilité aux stress environnementaux liés au milieu.

Bien sûr cette analyse est sous la dépendance globale des interventions humaines à travers les pratiques agricoles, et en particulier des interventions techniques relatives à la préparation du sol, mais aussi à la conduite de la culture.

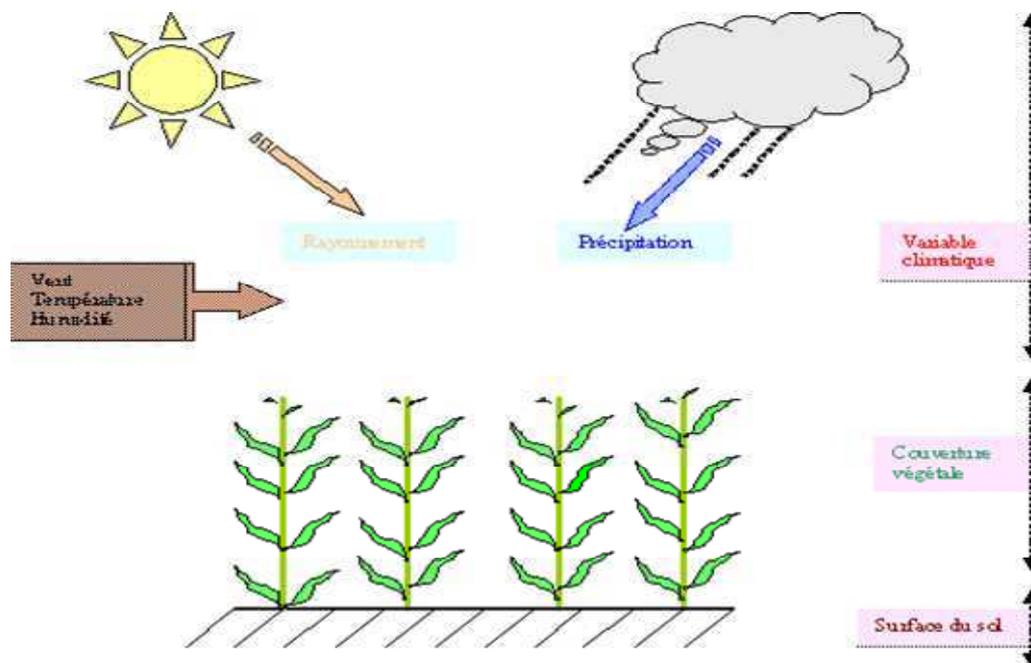


Figure 2. Les principales composantes d'un système de culture

Si le système végétal, par son développement continu, conduit à une réduction considérable des pertes en eau de la surface du sol par évaporation il augmente en revanche les échanges entre sa surface et l'atmosphère à travers une transpiration souvent beaucoup plus importante. D'autres processus du bilan tels que l'infiltration, le ruissellement de surface et la captation, se trouvent alors fortement conditionnés par le développement de ce système au point que tout modèle de bilan hydrique doit impérativement prendre en compte la couverture végétale, non seulement en tant que paramètre instantané du bilan mais aussi en

tant que système dynamique d'évolution à travers la modélisation de sa cinétique de développement.

Les modèles de fonctionnement des cultures dont l'élaboration répond à des objectifs bien ciblés peuvent être abordés de diverses façons, conduisant à des constructions allant d'un simple modèle empirique à des modèles mécanistes plus ou moins complexes (Whisler et al., 1986, Monteith, 1996). L'examen bibliographique riche sur le sujet témoigne du grand intérêt que suscitent les modèles de simulation auprès de la communauté scientifique (Bonhomme et al., 1995), dont les premiers principes ont été énoncés vers le début des années 70. Depuis, on assiste à l'émergence d'un certain nombre de modèles, en particulier dans les pays à forte tradition de modélisation, le plus souvent tournés vers une prévision de la production de biomasse, malheureusement encore très difficile à atteindre et nécessitant de nombreux calages. Beaucoup d'entre eux ont des objectifs plus ciblés pour répondre à des problématiques de recherche plus particulières, mais aux résultats le plus souvent beaucoup plus robustes (ce qui est le cas du bilan hydrique et du modèle faisant l'objet de cette thèse « Modèle Bilhyna »).

Ainsi, certains modèles se sont attachés à décrire l'écophysiologie des plantes (Wit., 1978 ; Van Ittersum et al., 2002), alors que d'autres comme CERES (Ritchie et Otter, 1985, Jones et Kiniry, 1986) et la famille des modèles CROPGRO (Boote et al., 1998, Jones et al., 2002) se sont plutôt rapprochés des objectifs agronomiques en prenant en compte certaines pratiques culturales, fertilisation notamment. Si certains modèles comme DAISY (Hansen et al., 1990) et PARTIS (Lafolie, 1991) sont conçus pour l'unique vocation environnementale, d'autres se veulent être des modèles agro-environnementaux, visant la prédiction des rendements sous l'effet de certaines pratiques agricoles et leurs répercussions sur l'environnement (Singh and Thornton, 1992). Malgré de grands efforts visant l'adaptation de ces modèles à différentes situations pédoclimatiques et culturales, dans le but d'accroître leur caractère générique, il est indispensable tout de même de réaliser une validation pour toute application à un contexte environnemental nouveau (différent de celui dans lequel ils ont été établis), et cela, avant toute utilisation.

Développé depuis plus d'une vingtaine d'années à l'UMR INRA-AgroParisTech de Grignon, Bilhyna est un modèle de type « agrométéorologique » conçu initialement pour prévoir les besoins en eau des cultures et mieux gérer les irrigations ; il a évolué vers un suivi fin et continu du bilan hydrique à l'échelle de la parcelle et à un pas de temps journalier (Tuzet et al., 1992) sur des systèmes de cultures variés et des périodes pouvant atteindre facilement le siècle. Les nombreuses utilisations du modèle sur plusieurs cultures et sous différentes conditions environnementales ainsi que l'introduction de nouvelles fonctionnalités, en particulier celles liées aux transferts de l'eau dans le sol et au rôle du couvert végétal dans la captation des eaux de pluies et dans les processus infiltration/ruissellement, lui ont permis d'acquérir une certaine notoriété à la fois dans la recherche et dans le transfert de connaissances. Le travail que nous nous proposons de réaliser sur la modélisation de la croissance de la plante et son développement en fonction des conditions environnementales vise donc à améliorer le calcul du bilan hydrique dans le modèle existant, pour lui permettre de fonctionner dans des situations les plus diverses possibles en termes de sols, de végétations et d'évolutions climatiques tout en prenant en compte les pratiques culturales adaptées aux systèmes de cultures envisagés.

I.2. Modèle physique

I.2.1. Schématisation des processus

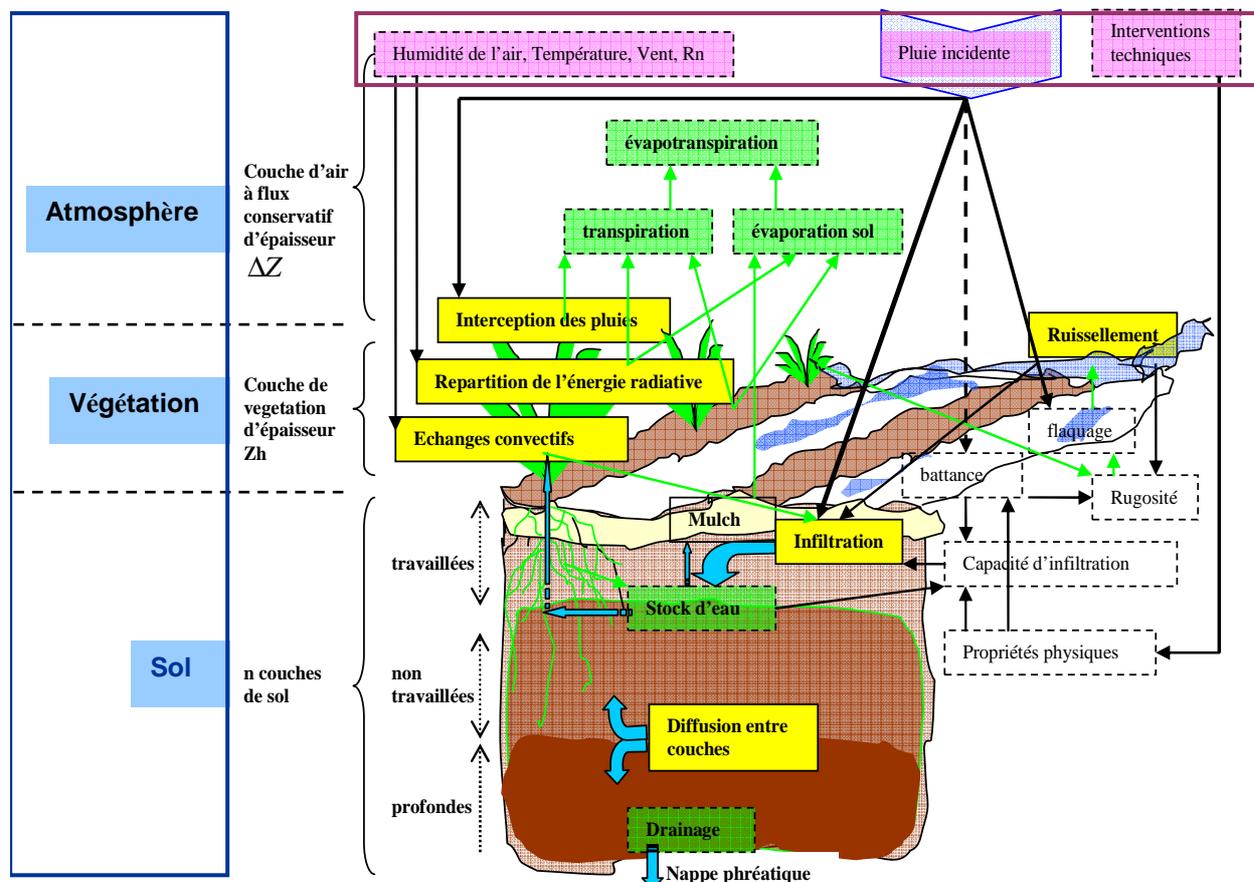


Figure 2bis. Schéma simplifié des différents processus physiques pris en compte dans le modèle Bilhyna et les principales interactions pouvant exister entre ces processus.

La figure 2bis illustre les différents processus physiques mis en jeu lors du suivi du bilan hydrique par Bilhyna et les principales interactions pouvant exister entre ces processus (afin de conserver une certaine lisibilité, certaines relations et processus physiques ayant un rôle secondaire dans le bilan ne sont pas indiqués sur cette figure 2bis).

Trois principaux compartiments d'échanges sont ainsi définis :

* L'atmosphère, représentée par une couche d'air à flux conservatif (ΔZ) comprise entre le sommet de la végétation Z_h , ou la surface du sol ($Z_h=0$) lorsqu'il n'y a pas de végétation, et sa limite supérieure au niveau de référence (Z_R), hauteur à laquelle les grandeurs de forçages climatiques s'appliquent. Cette hauteur de référence se situe à une hauteur telle que les échanges convectifs respectent l'hypothèse de flux conservatifs, soit une hauteur de référence (environ $5/3$ de la hauteur de couvert Z_h) ; cette approche nécessite, bien sûr, un recalcul des températures de l'air et de la vitesse du vent (T_a , T_r et U) pour ce niveau de référence, calcul fait par le modèle à partir des données climatiques d'entrée et mesurées à une hauteur propre connue notée Z_{Ro} (profil logarithmique pour $U(Z_R)$ et pour $T_a(Z_R)$ et $T_r(Z_R)$ qui dépendent aussi un peu du bilan hydrique d'un gazon, ETMg, placé dans les mêmes conditions).

* La végétation est représentée par une couche d'épaisseur (Z_h). En plus de son rôle dans l'interception des eaux de pluies, elle est aussi le siège d'absorption, à la fois de quantité de

mouvement (généralisant les échanges avec la couche d'air à flux conservatif) et d'énergie radiative nette.

* Le sol, divisé en n couches, est défini selon trois compartiments appelés horizons: (i) la zone supérieure labourée où l'essentiel de l'eau utilisée par la plante est rendue disponible grâce aux racines qui colonisent de façon homogène et optimale ce volume mais dans laquelle se développe en surface une zone sèche par rapport à l'air (mulch) résultant de l'évaporation de la surface du sol, (ii) la zone sous-jacente non labourée, toujours accessible aux racines mais dont la densité décroît avec la profondeur, rendant donc la disponibilité de l'eau utile pour la plante de plus en plus faible (iii) enfin, une zone tampon profonde introduite pour rendre possible des échanges par diffusion avec la zone racinaire et mieux préciser les flux profonds (Drainage) qui quittent le système (horizon dans lequel les racines ne se développent pas). Cette zone peut aussi être celle du battement d'une nappe surmontée d'une zone de remontée de la frange capillaire et permet une réalimentation vers la couche racinaire sus-jacente

La gestion des processus d'échanges est largement dépendante des surfaces d'échanges et donc du suivi de la surface végétative, suivi à la fois de la surface de feuilles, de la hauteur du couvert (LAI pour une hauteur Z_h) et de la profondeur racinaire (Z_r). Ces grandeurs modulent les processus d'échanges, d'une part avec l'atmosphère et d'autre part avec le sol. Les équations utilisées dans le modèle, tirées de processus physiques mathématiquement bien formulés, traduisent en particulier le bilan d'énergie et ses échanges radiatifs et convectifs en couplage avec le bilan hydrique. Cette approche intègre, de façon assez complète, à la fois le fonctionnement du sol et de la végétation. Ce modèle (voir schéma) prend en compte bien sûr la répartition des apports d'eau entre captation, infiltration, et remontées par diffusion ou capillarité, et les pertes que sont le ruissellement, l'évaporation du feuillage et le drainage. Le stock d'eau du sol résultant alimente l'évaporation de la surface du sol et à travers le fonctionnement des plantes, la transpiration.

Ce double bilan (énergétique et hydrique), modulé par l'état du couvert du jour (voir chapitre II) est soumis aux grandeurs de forçage climatique, et aux capacités des différentes couches de sol à transférer de l'eau soit entre elles (rediffusion selon la loi de Richards), soit vers les racines.

L'objectif est de gérer pour des raisons pratiques ces bilans en vue de répondre aux besoins des agriculteurs et des gestionnaires des espaces.

- L'échelle temporelle d'application est le cycle cultural avec un pas de temps journalier relativement bien adapté à ces besoins de gestion et surtout aux processus utilisés et aux données de forçages climatiques indispensables au modèle (valeurs journalières moyennes). Ces valeurs journalières sont les plus couramment disponibles, comme par exemple en zone semi-aride (objectif de cette thèse).

- L'échelle spatiale, compte tenu des objectifs, de la validité des données de forçages (Pluie en particulier) et des processus utilisés, est celle de la parcelle agricole (de quelques ha au km^2). Cette échelle spatiale, permet aussi à travers la connaissance des exploitations et de leur fonctionnement, d'introduire dans le modèle (calendrier cultural) les rotations les plus aptes à valoriser les disponibilités en eau (via l'irrigation) et, si possible, de rechercher le bilan durable en eau optimum.

Ces échelles de base du fonctionnement du modèle permettent d'appliquer le modèle à des problématiques d'échelles spatio-temporelles plus vastes. L'échelle temporelle peut s'étendre sur plusieurs décennies en introduisant une succession de cultures bien définies, avec leurs caractéristiques et répartition au sein d'une année et dans la succession des années. Cette approche permet d'introduire l'assolement et d'en analyser les effets sur le bilan d'eau annuel à l'échelle d'une exploitation. Dans ces analyses les interventions techniques sont soit

renseignées, soit déterminées au cours de la simulation par des modules adaptés à ces interventions (labour, semis, travail du sol, récolte, irrigation). Le dernier chapitre de cette thèse aborde précisément pour le labour et le semis un choix de modèles de décision. Compte tenu de ces extensions possibles des échelles du modèle, l'analyse des effets dus aux changements climatiques sur une région donnée devient alors possible dès lors que les données climatiques de forçage sont connues pour un climat passé ou sont estimées pour un climat futur. De nos jours, grâce à cette disponibilité de données climatiques et de caractéristiques des sols spatialisées, combinées aux caractéristiques des cultures et de leurs variétés, l'échelle d'espace peut être étendue sans difficultés à celle d'un bassin versant moyennant un couplage avec un système d'information géographique (SIG) qui prend en compte la spatialisation de la description pédologique et le parcellaire avec les successions de types des cultures ;

I.2.2. Modèle de bilan d'énergie

Le bilan d'énergie appliqué à une surface d'échange avec l'atmosphère (mince couche de sol, d'eau ou de végétation), représente la somme algébrique des principaux flux radiatifs, traduisant alors la variation d'énergie au niveau de cette même couche, soit :

$$Rn + \Phi_0 + \Phi_s + \Phi_L = \Delta E = 0$$

où : Rn est le rayonnement net de l'interface (en $W.m^{-2}$)

Φ_0 est le flux de conduction de chaleur échangé avec la surface (en $W.m^{-2}$)

Φ_s et Φ_L sont respectivement les flux de chaleur sensible et latente (en $W.m^{-2}$)

ΔE est la variation d'énergie supposée négligeable au sein de l'interface air-surface (en $W.m^{-2}$)

Par convention, ces flux, exprimés en $W.m^{-2}$, sont comptés positivement lorsqu'ils sont un gain pour l'interface, couche de végétation, et négativement lorsqu'ils sont une perte.

I.2.2.1. Chaleur latente ou évaporation d'une surface, Φ_L

L'évaporation traduit le transfert de la masse d'eau de l'interface à l'air libre au-dessus de la sous couche à flux conservatif, comprise entre la surface et un niveau de référence (Perrier et Tuzet, 1998), et a pour expression :

$$\Phi_L = \frac{L_v M}{RT_a} h(U) [P(Tr) - P(Tr_s)]$$

Avec: L_v , la chaleur latente de vaporisation de l'eau ($J.kg^{-1}$),

R , la constante des gaz parfaits (en $J.K^{-1}.mole^{-1}$) et M , la masse molaire de l'eau ($kg.mole^{-1}$)

$h(U)$: est le coefficient d'échange entre la surface et le niveau de référence (en $m.s^{-1}$)

T_a : la température de l'air au niveau de référence (en K)

$P(Tr)$ et $P(Tr_s)$, représentent respectivement la pression de vapeur de l'air au niveau référence, et la pression de vapeur saturante de la surface en Pa (valeur en équilibre avec l'interface feuille-air)

I.2.2.2. Chaleur sensible d'une surface Φ_s

De même l'expression de la chaleur sensible s'exprimera de la façon suivante :

$$\Phi_s = \rho.C_p.h(U).(T_a - T_s)$$

Avec : T_s : la température de l'air au niveau de la surface (en K)
 ρ_a : densité de l'air (en Kg.m^{-3})
 C_p : chaleur spécifique de l'air à potentiel constant ($\text{J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)
 T_a la température de l'air et $h(U)$ le coefficient d'échange (comme au paragraphe précédent)

I.2.2.3. Expressions générales et Demande climatique (EP)

La combinaison du bilan d'énergie et de ces deux flux convectifs permet d'écrire la relation générale dans laquelle Φ_L est donc toujours négatif (Perrier, 1975) :

$$|\Phi_L| = \frac{P'}{P' + \gamma} \cdot \left[(R_n + \Phi_0) + \frac{\rho C_p \cdot h(U)}{P'} \cdot (D_a - D_s) \right]$$

avec en plus des paramètres définis ci-dessus :

P' : pente de la courbe de pression de vapeur saturante pour T_a (en Pa.K^{-1})

$\gamma = \frac{\rho C_p}{(LM/RT)}$: constante psychrométrique (en Pa.K^{-1})

D_a : déficit hydrique de l'air au niveau de référence (Pa.K^{-1})

D_s : déficit hydrique de l'air à la surface (Pa.K^{-1})

Ainsi calculé, ce terme positif, $|\Phi_L|$, représente l'évapotranspiration du couvert (sol et végétation) ; cette valeur résulte du forçage climatique, de la plante et de l'eau du sol. Si la disponibilité en eau de cette même surface est totale ($D_s=0$, qui correspond à la saturation de la surface ou eau libre à la surface) alors la température de rosée à la surface, Tr_s , n'est autre que la température de surface, T_s . Compte tenu de cette égalité ($Tr_s=T_s$), on obtient alors :

$$EP = \frac{P'}{P' + \gamma} \left[R_n + \frac{h(U) \cdot \rho C_p}{P'} \cdot (P(T_a) - P(Tr)) \right]$$

Ce terme d'évaporation ($EP > 0$) est appelé évaporation potentielle (valeur maximum) et ne dépend que des facteurs climatiques, d'où son expression classique de **demande climatique (EP)** ; c'est l'évaporation qu'impose le climat à une surface saturée.

Pour $D_s \neq 0$, l'évapotranspiration est réduite par des résistances (r_s), soit une résistance stomatique du couvert, soit du sol (résistance du mulch de la surface du sol), c'est l'évapotranspiration réelle ET dont l'expression utilisée sera décrite au paragraphe couplage sol-végétation (I.2.3).

$$\Phi_L = \frac{L.M}{R.T} \cdot \frac{D_s}{r_s}$$

I.2.2.4. Expressions utilisées dans le modèle

Les couverts, représentés par une interface d'épaisseur Z_h de végétation, échangent donc de la masse et de la chaleur par convection et répondent aux relations précédentes. Ces échanges, ayant lieu entre Z_h et le niveau de référence Z_R , sont exprimés par le coefficient d'échange $h(U)$, souvent utilisé sous la forme d'une résistance dite aérodynamique r_a ($r_a = 1/h(U)$). Son expression est donnée ci-contre et fait ressortir le poids important de la vitesse du vent. Elle s'applique, indépendamment du facteur vent, au sol (résistance fonction de sa rugosité) et à la végétation (fonction de sa rugosité et de sa hauteur de déplacement et de sa hauteur). Les rugosités et la hauteur de déplacement sont elles-mêmes fortement dépendantes de l'indice foliaire du couvert et de sa hauteur, (voir ci-contre). (Perrier 1987 ; Tuzet et Perrier 1998).

Compte tenu de l'approche du couplage sol-végétation qui sera présentée ci-dessous, le modèle utilise :

- La demande climatique EP suivant l'expression :

$$EP = \frac{P'}{P' + \gamma} \left[R_n + \frac{\rho C_p}{P'} \left(\frac{P(Ta) - P(Tr)}{ra} \right) \right]$$

appliquée aussi bien au sol, soit $EP_{sol}(ra_{sol})$, qu'à la végétation, soit $EP_{veg}(ra_{veg})$

- L'évapotranspiration réelle d'un couvert végétal (ET), d'épaisseur Z_h , s'exprimera par la relation suivante (ET) :

$$ET_x = \frac{EP_x}{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} \cdot \frac{r_{sX}}{r_{aX}}}$$

L'indice (x) se réfère soit au sol, soit à la végétation.

Il existe cependant, pour la végétation, une résistance convective (r_0), aux transferts de chaleurs et de masses au sein du couvert, très dépendante de la structure de la végétation, dite résistance de structure, $r_{aX} = r_{avg} + r_0$ (voir ci-contre)

Dans ce cas, le bilan d'énergie conduit à une relation qui rejoint la forme de celle donnée par Monteith (1965) mais avec des paramètres substantiellement différents.

I.2.3. Couplage sol-végétation

Pour simplifier l'approche, on analyse tour à tour deux systèmes (l'un lié au sol et l'autre à la végétation) ; ils sont, indépendant, l'un de l'autre, et donc appelés « virtuels ». Les relations du bilan d'énergie sont appliquées à chacun de ces systèmes virtuels. Puis le modèle couple les deux systèmes virtuels pour arriver à une solution réelle très réaliste. Le système lié au sol considère que tout se passe comme si le système de culture était inexistant, et répond aux échanges selon ses propriétés d'échanges propres. Le système lié à la végétation, quant à lui, considère que tout se passe comme s'il n'y avait qu'une couche de végétation complètement couvrante mais caractérisée par ses propriétés d'échanges propres. Ces deux systèmes virtuels sont soumis aux mêmes données climatiques du niveau de référence et caractérisés par l'état de développement réel de l'instant considéré.

Le principe général du modèle Bilhyna repose sur la répartition des énergies radiatives, via le LAI réel quotidien du couvert, qui modifie les grandeurs potentielles et réelles des évaporations et des transpirations relatives soit à la surface de sol nu, soit à la

Mode de calcul de h(U)

* pour le sol nu

$$r_{asol} = \frac{1}{k^2 U} \text{Log}^2 \left(\frac{Z_r}{Z_0} \right) \text{ avec } r_x = r_{mulch}$$

* pour la végétation

$$r_{aveg} = r_0 + \frac{1}{h(u)} = r_0 + \frac{1}{k^2 U} \ln \left(\frac{Z_R - D}{Z_h - D} \right) \cdot \ln \left(\frac{Z_R - D}{Z_{0veg}} \right)$$

$$r_x = \frac{r_{s \min}}{Lai}$$

Où

k , la constante de VON KARMAN (=0.4)

U est la vitesse du vent (m/s)

rad , résistance aérodynamique de diffusion (s/m)

r_0 , résistance de structure du couvert végétal,

$$r_0 = r_{0 \max} \cdot \frac{Lai}{Lai_{\max}} \text{ (s/m)}$$

Z_R, Z_0, Z_h sont les hauteurs respectives de référence, de rugosité du sol et du couvert (m).

D et Z_{0veg} croient en fonction du développement du Lai et de la hauteur du couvert Z_h (Perrier, 1982).

Leurs expressions valent alors :

$D = Z_h \left[1 - \frac{2}{Lai} \cdot (1 - \exp(-\frac{Lai}{2})) \right]$, qui représente la hauteur de déplacement (en m), valeur nulle pour un sol nu, mais positive en présence d'un couvert végétal).

La rugosité du sommet du couvert végétal (en m) est :

$$Z_{0veg} = Z_h \cdot \left[1 - \exp(-\frac{Lai}{2}) \right] \cdot \exp(-\frac{Lai}{2})$$

végétation. La solution finale combine simplement les solutions de ces deux systèmes et traduit ainsi les échanges au niveau du système couvert (sol + végétation). Dans la répartition réelle adoptée, seul l'effet dominant des énergies radiatives disponibles pour chacune des deux surfaces est pris en compte. Cette simplification conduit à négliger les interactions convectives entre la végétation et le sol.

Comme les valeurs de la distribution de ces énergies ne dépendent que des énergies propres absorbées par chacun de ces deux systèmes ($\exp(-k.Lai)$ étant l'expression classique de la fraction d'énergie radiative absorbée par le couvert), alors on peut écrire les relations de base suivantes :

$$EP_{sys} = EP_{sol} \cdot \exp(-k.Lai) + EP_{végét} \cdot (1 - \exp(-k.Lai))$$

$$ET_{sys} = ET_{sol} \cdot \exp(-k.Lai) + ET_{végét} \cdot (1 - \exp(-k.Lai))$$

I.2.3.1 Système sol

L'évaporation de la surface sol provoque un dessèchement de la surface qui conduit à la formation d'une zone sèche couramment appelée « mulch ». Celui-ci est un facteur dominant de la résistance à l'évaporation de la surface. Ce mulch est alors appréhendé selon un modèle théorique développé par Perrier (1973) et repris dans de nombreux modèles, qui se traduit par les deux expressions suivantes:

(i) La première expression est due à la résistance du mulch de surface. L'évaporation réelle du sol, ET_{sol} , comme décrite au paragraphe (I.2.2.4), est bien sûr fonction de l'évaporation potentielle du sol, EP_{sol} . Cette valeur est modulée par la résistance à la diffusion de la vapeur des couches sous-jacentes vers la surface du sol, en particulier à travers la zone sèche d'épaisseur d (en m). Cette résistance du « mulch » est naturellement proportionnelle à son épaisseur :

$$r_{mulch} = d \cdot \alpha$$

Avec : $\alpha = t_{tor} / D_v$ où t_{tor} , est un coefficient de tortuosité (chemin parcouru par la diffusion de la vapeur d'eau selon la porosité du sol de ce « mulch » par rapport à l'épaisseur ; et D_v , la diffusivité de la vapeur d'eau dans l'air (m^2s^{-1}).

Notons seulement que l'épaisseur d'un mulch est dynamique et croît naturellement de la surface vers la profondeur du sol ; la zone sèche créée est supposée homogène en humidité et correspond à celle en équilibre avec l'humidité de l'air au-dessus de l'interface sol-air. En fait, ce mulch protège de l'évaporation les couches du sol sous-jacentes et conduit selon la demande climatique du sol, EP_{sol} , à l'expression suivante :

$$ET_{sol} = \frac{EP_{sol}}{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} \cdot \frac{r_{mulch}}{ra_{sol}}}$$

(ii) La seconde expression traduit simplement le bilan de masse d'eau du mulch, soit de la zone de surface du sol devenue sèche sous l'effet de l'évaporation. Cette zone passe, par évaporation de surface, d'une humidité initiale de la surface à une humidité résiduelle finale en équilibre avec l'air. La valeur initiale, notée H_i , au temps $t (= 0)$, juste après pluie ou irrigation qui détruit le mulch précédent, est le plus souvent proche de la capacité au champ, H_{cc} . La valeur finale, celle de la zone sèche, notée H_a , dépend des données climatiques.

Au temps t , ce bilan de masse s'écrit :

$$\sum_0^t ET_{sol}(t) = \rho_s \cdot (H_i - H_a) \cdot d_{mulch} \quad \text{avec} \quad H_a \leq H_i \leq H_{cc}$$

avec H_a, H_i et H_{cc} , les humidités pondérales (kg d'eau/ kg de sol sec), et une masse volumique de sol sec, ρ_s , (kg de sol.m⁻³).

L'équation intégrée de l'évaporation de la surface d'un sol se déduit de la combinaison de ces deux relations. Ainsi l'évaporation réelle du sol, ET_{sol} , s'écrit :

$$\sum_0^t ET_{sol}(t) = \sqrt{\overline{A_n}^2 + 2 \cdot \overline{A_n}^2 \sum_0^t EP_{sol}(t) - \overline{A_n}^2} \quad \text{dans laquelle} \quad \overline{A_n} = \frac{1}{n} \sum_0^n A_i,$$

avec A_i la valeur du jour (i) et n le nombre de jour de la période considérée

$$A_i = \frac{P' + \gamma}{\gamma} \rho_{sol} (H_{cc} - H_a) \frac{D_v}{\alpha} ra_{sol}$$

Où : ra_{sol} , la résistance aérodynamique du sol nu (sm⁻¹) et D_v , le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air (m².s⁻¹)

Cette solution traduit ce qui se passe après chaque pluie ou irrigation (d'où $H_i = H_{cc}$ à $t=0$). Concrètement, pour éviter des dérives dues à des variations trop fortes du climat, il est préférable de limiter n à cinq jours environ ; dans ce cas au jour (n+1) on réinitialise artificiellement une nouvelle période d'assèchement avec l'épaisseur du mulch atteinte avec $H_i = H_{n+1}$ (H_{n+1} étant l'humidité de la couche sous le mulch au jour (n+1))

I.2.3.2 La transpiration du couvert

La transpiration du couvert est maximale quand les surfaces de végétation sont saturées (après rosée ou pluie) ; mais une fois cette eau libre disparue, c'est le transfert d'eau du sol vers les feuilles qui s'évapore au sein des feuilles et passe sous forme vapeur à travers les stomates. Cette transpiration peut être maximale lorsque la réserve en eau du sol se trouve au-dessus d'une certaine valeur limite (R_{Max}). Dans ce cas la transpiration est dite maximale (ETM) et ne dépend que de la demande climatique EP_c , fonction du développement du couvert (LAI) et des caractéristiques morphologiques des stomates exprimées par la résistance stomatique minimale. La réduction par rapport à l' EP_c s'exprime sous la forme d'un frein, représenté par cette résistance stomatique minimum propre à chaque type de couvert.

Selon cette résistance, l'expression déjà citée de l' ET_{veg} donne ETM :

$$ETM = a_0 \cdot EP_c$$

avec a_0 le coefficient de réduction qui, comme on l'a déjà vu, dépend de la résistance stomatique (rs_{min}), de la résistance aérodynamique du couvert (ra_{veg}) et du LAI :

$$a_0 = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{P' + \gamma} \cdot \frac{rs_{min} / LAI}{ra_{veg}}} \quad \text{avec} \quad \overline{a_0} = \frac{1}{n} \sum_0^n a_0(j)$$

Si l'on représente le rapport ET_{veg}/EP_{veg} en fonction de la réserve en eau du sol, on a les situations suivantes (Figure.3):

(i) lorsque la réserve en eau du sol R est supérieure ou égale à R_{\max} , l'évapotranspiration est maximale ($ET_{veg}=ETM$) ;

(ii) lorsque la réserve en eau du sol est inférieure à R_{\max} , la disponibilité en eau au niveau des racines se trouve alors réduite et l'évaporation qui en découle est moindre ($ET_{veg}<ETM$). La fermeture progressive des stomates contrôle les processus d'échanges à l'interface feuille/air. Une proportionnalité entre la transpiration du couvert et la disponibilité en eau au niveau des racines a donc été adoptée (Figure 3), telle que :

$$\frac{ET_{veg}}{EP_{veg}} = \frac{R_i - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}}$$

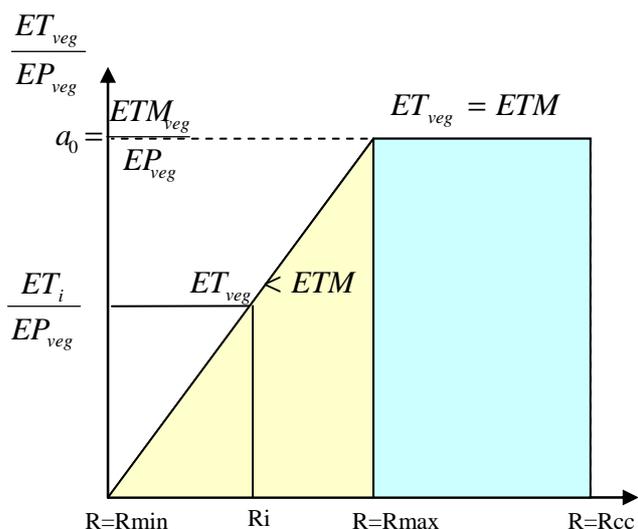


Figure 3. Pondération de la transpiration en fonction de l'humidité du sol

(iii) On notera que pour des humidités inférieures à H_{\min} , il n'est plus possible au végétal d'extraire significativement de l'eau via son système racinaire, la plante ne pouvant pas abaisser son potentiel en deçà de celle du sol pour H_{\min} . Les stomates sont alors considérés comme complètement fermés à tout échange, ce qui n'est jamais totalement le cas, mais la plante se dessèche progressivement..

Bien que cette hypothèse ne traduise pas la réalité stricte du phénomène (solution généralement non linéaire avec une concavité tournée vers le haut ou vers le bas), son approche en valeurs cumulées reste néanmoins très proche de la réalité.

Comme pour le sol, en combinant l'expression journalière de la transpiration avec le bilan d'eau du sol, on obtient la relation du cumul de la transpiration de la végétation pour un nombre de jours donné, entre R_{\max} et R_{\min} :

$$\sum_0^t ET_{veg}(t) = (R_i - R_{\min}) \left[1 - \exp\left(-\frac{\bar{a}_0}{R_{\max} - R_{\min}} \sum_0^t EP_{veg}(t)\right) \right]$$

et entre R_{cc} et R_{\max} :

$$\sum_0^t ET_{veg}(t) = \bar{a}_0 \cdot \sum_0^t EP_{veg}(t)$$

La solution ainsi présentée est donc fortement dépendante :

- du climat (EP),
- des caractéristiques des couverts (\bar{a}_0) et donc du LAI, de rs_{\min} et de ra_{veg} .
- du domaine de disponibilité potentielle de l'eau du sol pour les racines soit ($R_{\max} - R_{\min}$) et bien sûr de l'eau réellement initialement disponible au démarrage ($R_i - R_{\min}$) pour le couvert.

1.2.3.3 Prélèvement d'eau dans le sol par la plante

Le bilan des n couches de sol dépendra de l'eau prélevée par la plante dans chacune d'elle. Cette fraction de la transpiration journalière, ET_{veg} , dépend de la disponibilité en eau

du sol de la couche et de sa densité racinaire qui évolue chaque jour avec la plante. Cette quantité est donc exprimée selon la relation suivante :

$$\Delta ET_i = ET_{veg} \cdot \frac{(R_i - R_{min}) \cdot \tau_i}{\sum_1^n (R_i - R_{min}) \cdot \tau_i} = ET_{veg} \cdot \frac{\rho \cdot \Delta Z_i \cdot (H_i - H_{min}) \cdot \tau_i}{\sum_1^n \rho \cdot \Delta Z_i \cdot (H_i - H_{min}) \cdot \tau_i}$$

Celle-ci est supposée maximale pour une densité relative maximale (valeur de $\tau = 1$) et pour une réserve disponible maximale de la couche (i) ($(R_{max} - R_{min})$).

La répartition par couche de la densité racinaire relative (τ) évolue avec la croissance en profondeur des racines du couvert (voir chapitre croissance qui montre aussi sa dépendance aux stress).

Dans tous les cas, comme le montre la figure ci-contre (Figure 4), le schéma adopté pour cette densité racinaire relative suppose que la densité est optimale, ($\tau=1$) pour toute la profondeur de labour ($0-z_{rlabour}$).

Au-delà de cet horizon, la densité décroît linéairement jusqu'à s'annuler au voisinage de la profondeur maximale atteinte chaque jour par la croissance des racines (Z_r). Cependant cette profondeur peut être limitée par les caractéristiques du sol (Z_{rsol}) selon la profondeur du sous-sol (roche, couche impénétrable,...). Dans ce cas, on laisse croître la profondeur racinaire de façon virtuelle, ce qui revient à faire croître la densité racinaire selon cette pente et de ne retenir les valeurs de densité que jusqu'à Z_{rsol} .

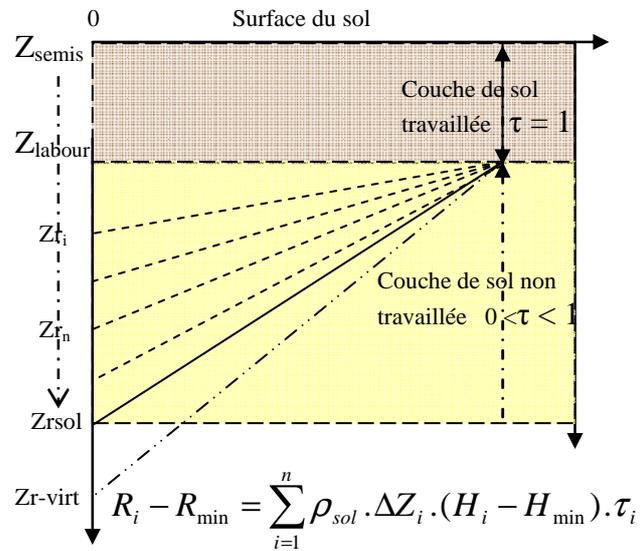


Figure 4. Fraction de l'eau du sol disponible pour les racines en fonction de la répartition de la densité racinaire le long du profil du sol exploitée

Pour les racines, le prélèvement direct dans chaque couche de sol est alors donné par ΔET_i ci-dessus.

Le processus de calcul sur une période permet, jour après jour, de calculer ΣET_{sol} (accroissement du mulch) et ΣET_{veg} , ainsi que les prélèvements dans les couches de sol explorées chaque jour par les racines :

$$ET_{jour} = \sum ET_{veg} + \sum ET_{veg} = \sum_0^i ET_{sys} - \sum_0^{i-1} ET_{sys}$$

1.2.3.4 Conclusions au couplage sol végétation

Dans le cas des cultures agronomiques annuelles (comme aussi des systèmes forestiers plus stables), les valeurs des paramètres évoluent chaque jour, au fur et à mesure du développement du couvert. Parmi les principaux paramètres moteurs qui répondent à cette évolution du développement et de la croissance, nous avons la surface foliaire (LAI), la

hauteur des plantes (Z_h) et la profondeur des racines (Z_r), ou encore ceux de la résistance journalière interne de structure du couvert r_0 . Il y en a d'autres, comme la résistance aérodynamique, r_a , qui en dépendent de façon plus secondaire. Les premiers sont tous appelés à évoluer d'une valeur initiale, souvent nulle, à une valeur potentielle de croissance maximale (LAI_{max} , $Z_{h_{max}}$, $Z_{r_{max}}$, $r_{0_{max}}$). En revanche, lors de l'installation d'un stress, ces valeurs demeurent en deçà de leur niveau potentiel, compte tenu de la prise en considération des contraintes conditionnant l'évolution du végétal. L'estimation adéquate de l'ET journalière d'une culture passe donc impérativement par une meilleure estimation de ces valeurs de croissance, quelle que soit la limitation imposée par le milieu (voir Chapt.II.3).

De plus, en fin de journée, après avoir pris en compte l'absorption racinaire dans les différentes couches de sol et la croissance du mulch et avant d'aborder une nouvelle journée, un bilan hydrique du sol avec ses transferts d'eau doit être effectué chaque jour (choix de minuit). Ceci, comme on va le voir (paragraphe I.2.4), suppose une analyse des apports d'eau (pluie et irrigation), des transferts sous forme de captation et ré-évaporation, puis d'infiltration et de ruissellement. Ces processus sont analysés avec des pas de temps compatibles avec leur intensité. Finalement., une fois le bilan d'eau de chaque couche réalisé, une dernière analyse permet d'établir les transferts entre couches, obtenus par un modèle classique de diffusion d'eau dans le sol (équation de Richards). Ainsi le rééquilibrage entre les couches, obtenu en général pour une journée fictive (de 24h), établit le profil d'humidité final, moteur de la distribution des prélèvements et des transpirations pour le jour suivant.

Ces bilans concernent toutes les couches de sol, dont celles de la zone profonde, non colonisée par les racines, zone présentée dans la schématisation (*Figure 2bis*, paragraphe I.2.1.) comme zone tampon permettant des rediffusions vers les couches exploitées par les racines et dont le flux profond est celui éliminé par le drainage profond vers les nappes où les exutoires profonds.

I.2.4. Les bilans d'eau : Apports et devenir (pluie - irrigation)

Un premier travail de modélisation réalisé sur ce modèle « Bilhyna » avait permis d'introduire une meilleure estimation de certaines grandeurs de ce bilan d'eau pour des couverts végétaux. Cette modélisation concernait le devenir des apports pluie et irrigation compte tenu des processus d'interception, d'infiltration et de ruissellement (Rosnoblet, 2002). Pour réaliser une telle approche, la pluviométrie dont le poids sur les divers flux est dominant, devait pouvoir être connue temporellement par ses caractéristiques majeures que sont sa quantité, sa durée, mais aussi et surtout son intensité.

A partir des quantités journalières de pluie, seul paramètre généralement disponible, sauf exception ou données obtenues par modèles climatiques, un premier modèle estime la durée et l'intensité de la pluie. Cette intensité est en effet l'élément clef qui modifie substantiellement les répartitions, d'eau dans la mesure où le ruissellement est directement lié aux fortes valeurs d'intensité.

I.2.4.1. Intensité de la pluie

Pour assurer un suivi fin des pluies, il a été décidé de déconvoluer la pluie journalière moyenne en la centrant sur midi et de la soumettre aux conditions journalières moyennes. Une durée probable (D_i) est alors prédéfinie pour chaque pluie à partir de sa quantité, du moment de l'année et des coordonnées géographiques du lieu (par ailleurs nécessaires pour le calcul du rayonnement et la répartition des grands types de climat sur le globe). Une répartition gaussienne temporelle est appliquée centrée sur midi (12h) et une intensité minimale $IP_m(t)$ aux bornes de cette courbe de répartition temporelle est fixée, valeur équivalente aux pertes diurnes moyennes liées à l'évaporation, EP_j ($kg.m^{-2}.s^{-1}$). Toute pluie

arrivant dont l'intensité est en deçà de cette valeur tend à s'évaporer, conduisant à un bilan d'eau nul. L'intégrale de l'intensité entre le début de la pluie ($t_i = 12 - \frac{Di}{2}$) et sa fin ($t_f = 12 + \frac{Di}{2}$) étant la quantité de la pluie moyenne journalière [$\int_0^t IP(t).dt = P(t)$]; cette simple approche, en moyenne assez réaliste, fournit l'évolution de l'intensité de la pluie qui permet l'analyse plus fine des grandeurs du bilan que sont l'interception, l'infiltration et le ruissellement.

I.2.4.2. Les irrigations

Sur un espace ou une parcelle, en complément des apports pluviométriques il y a les quantités d'irrigation qui sont soit connues, en cas d'analyse d'un système expérimental, soit déterminées par le modèle en fonction d'un module gérant les besoins en fonction de l'état des contraintes et des disponibilités en eau. Mais la dose d'irrigation apportée, capitale dans les analyses de bilan d'eau descriptives peut être imposée ou laissée libre selon les critères retenus pour combler les besoins. Dans tous les cas, l'eau apportée au cours de la journée ou de la nuit est prise en compte (dans le modèle) le lendemain comme pluies ou comme supplément à toute pluie de la journée suivante.

I.2.4.3. Interception

Un modèle physique classique de la captation selon un pas de temps fin a été couplé à « Bilhyna ». Ce modèle est basé sur la formule classique de Merriam (1960), soit un stockage par captation $S_c = C_{\max} [1 - \exp(-P/C_{\max})]$, où P est la pluie totale et C_{\max} est la capacité maximale d'un couvert à retenir une fraction de la pluie interceptée. Une analyse dynamique de cette relation conduit à la loi générale de l'eau stockée qui dépend de l'intensité de la pluie diminuée de l'évaporation potentielle (surface d'eau) (Perrier, communication personnelle):

$$S_c(t) = C_0 + (C_{\max} - C_0) \left\{ 1 - \exp\left(-\left[\sum_{t=0}^t IP(t) - \sum_{t=0}^t EP(t) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{LAI}{2}\right)\right)\right] / C_{\max}\right) \right\}$$

avec $C_{\max} = 0.145 * (1 + 0.25 * Zh) * LAI_{total}$, la capacité de saturation, C_0 la valeur initiale (mm) le plus souvent nulle ;

Dans ce modèle (Rosnoblet, 2002), le processus de captation est divisé en trois phases :

* Dans une première phase (de t_i à t_{f1}), l'eau de la pluie atteignant les feuilles est dite interceptée et partiellement stockée jusqu'à atteindre un niveau de saturation, C_{\max} , sa durée dépend de l'intensité de la pluie et de la valeur de l'évapotranspiration potentielle durant cette phase. En effet, l'évaporation potentielle abaisse la valeur du stock d'eau finalement gardé et augmente d'autant le cumul possible de l'interception journalière.

* Dans une seconde phase (de t_{f1} à t_{f2}), la valeur stockée reste constante, C_{\max} , mais l'interception se poursuit pour alimenter l'évaporation potentielle et l'égouttement du feuillage. Cette seconde phase permet de séparer la pluie atteignant directement le sol (non interceptée avec forte énergie cinétique) et celle s'égouttant sur le sol à plus faible énergie cinétique (rôle sur les agrégats du sol et la battance). L'infiltration et le ruissellement dépendent de ces deux types de pluie atteignant la surface du sol.

* Dans une troisième phase, la pluie s'arrête. Il y a alors persistance de l'eau captée sur le couvert durant la journée, jusqu'à ce que le stock soit totalement évaporé.

Ces trois phases permettent de définir avec précision la durée de mouillage (DM) si importante pour la pathologie des couverts qui commence avec le début de la pluie, si le coefficient de rétention initial est nul, et finira quand le stock deviendra nul après un ou plusieurs épisodes pluvieux.

De plus cette analyse permet de définir avec rigueur ce qu'est la pluie efficace d'un couvert ($P_{efficace}$) qui est considérée comme étant la pluie reçue, diminuée de la quantité d'eau qui ne pénètre pas dans le volume de sol et qui ne peut alors servir à l'alimentation hydrique de la plante ou des réservoirs (nappes ou écoulement profond vers les rivières). Si les apports sont souvent facilement pris en compte, ces quantités perdues sont difficiles à estimer. Parmi ces pertes, celles dues à l'évaporation potentielle de l'eau captée sont souvent mises en exergue lorsqu'il y a apport par irrigation ; cependant, on oublie le plus souvent de rappeler que ces pertes évitent la transpiration du couvert, transpiration annulée par la captation et par conséquent eau non prélevée dans le sol, soit de facto une quantité économisée.

Aussi les pluies efficaces (relation ci-dessous) sont données par la relation suivante dont tous les termes sont fournis par cette analyse systématiquement conduite au sein de « Bihyna » (EP(t), ET(t) souvent voisin d'ETM(t) et par le ruissellement (voir paragraphe suivant).

$$P_{efficace} = \sum_0^{fin} Ip(t) - \left(\sum_0^{DM} (EP(t)_{couvert} - ET(t)_{couvert}) \right) - R_{ruis}$$

I.2.4.4. Infiltration et ruissellement de surface :

De façon générale, on déduit des analyses décrites au paragraphe précédent la pluie arrivant à la surface du sol $P_s(t)$

$$P_s(t) = \sum_{t_0}^{fin} IP_s(t)$$

Cette quantité d'eau au sol est destinée soit à s'infiltrer soit à ruisseler. Dans un premier temps elle comble le mulch jusqu'à la valeur H_1 de l'humidité de la première couche de sol, ce qui homogénéise cette première couche de sol ; t_0 est le moment nécessaire pour combler le mulch :

$$\text{avec } \sum_0^{t_0} IP_s(t) = \rho_s \cdot (H_s - H_a) \cdot Z_{mulch}$$

Puis à partir de ce moment, tant que l'intensité de la pluie ($IP_s(t)$) reste inférieure à la vitesse momentanée d'infiltration de la surface, le ruissellement ne peut débuter. Cependant si l'intensité de la pluie croît, la vitesse d'infiltration croît avec l'humidité de la couche mais tend vers une limite, celle de la vitesse à saturation (Soit K_{sat}). Dès que l'intensité des apports dépasse cette valeur il y aura début de ruissellement.. Le modèle d'infiltration basé sur celui de Green et Ampt, suivra dans chaque couche le front d'humectation et l'évolution de cette vitesse d'infiltration en surface, selon la vitesse du front d'humectation en profondeur.

Aux échelles de temps concernées, les équations utilisées dans ce modèle découlent donc directement de celui de Green-Ampt, modèle largement utilisé dans les études de bilan hydrique. Il se fonde sur la loi Darcy qui exprime le flux dans un milieu poreux entre deux points :

$$q = -\overline{K}_{(\psi)} \cdot \left[\frac{\Delta h}{\Delta Z} - 1 \right]$$

L'expression de Green-Ampt suppose un front d'humectation homogène avec un gradient de potentiel exprimé ici en hauteur d'eau (m), soit ($h_0 - h_f$) entre la surface et la

profondeur du front d'humectation Z_{fh} (m) et où h_0 représente la charge éventuelle d'eau en surface (égale à la rugosité du sol en surface plane). Cette profondeur d'humectation, Z_{fh} , correspond à l'eau déjà infiltrée (en m), depuis le temps initial de la pluie arrivant à la surface du sol jusqu'au temps (t) considéré, soit :

$$\sum_0^t [IP_s(t) - IR_{ruis.}(t)] = \sum_1^{n-1} \left([(\theta_{sat} - \theta_i)_x \cdot \Delta z_x] + [(\theta_{sat} - \theta_i)_n \cdot (Z_{fh} - \sum_1^{n-1} \Delta z_x)] \right)$$

$$\text{avec } x \Rightarrow (1, n) \Leftrightarrow \sum_1^{n-1} \Delta z_x < Z_{fh} < \sum_1^n \Delta z_x$$

$$q = K_{sat} \cdot \left[\frac{(h_f - h_0) \cdot (\theta_{sat} - \theta_i)}{\sum_0^t [IP_s(t) - IR_{ruis.}(t)]} + 1 \right]$$

avec : θ_i, θ_{sat} , les humidités volumiques de la couche considérée de sol (valeurs respectivement pour le sol sous le front d'humectation et pour ce sol saturé ;
 K_{sat} , la conductivité hydraulique du sol saturé ($m \cdot s^{-1}$)
 q , le flux d'eau infiltrée ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ou $m \cdot s^{-1}$)

L'adaptation du modèle Green-Ampt aux caractéristiques des parcelles cultivées a nécessité la prise en compte de la variabilité verticale des paramètres d'infiltration et de leur dynamique, couche par couche puisque le sol est modélisé comme un empilement de couches (avec chacune ses valeurs de θ_i, θ_{sat} au moment d'une pluie), la première couche pouvant être une couche de battance, modifiant fortement l'infiltration (Rosnoblet, 2002).

En fonction de l'évolution de la pluie cumulée arrivant au sol et s'infiltrant, $\sum_0^t [IP_s(t) - IR_{ruis.}(t)]$, la distribution de l'eau est suivie couche par couche en fonction de l'humidité volumique initiale de la couche considérée, $(\theta_i)_x$, et d'une humidité volumique, $\theta(t)_x$, correspondant à l'instant (t) considéré à l'égalité suivante $K(\theta(t)_x) = IP_s(t)$. Cette valeur $\theta(t)_x$, évolue avec la pluie pour atteindre $(\theta(t)_x)_{Max}$, telle que $K((\theta(t)_x)_{Max}) = (IP_s)_{Max}$, mais le plus souvent $\theta(t)_x$ atteint θ_{sat} , mais dès que $IP_s(t) > K(\theta_{sat})$ alors le ruissellement se produit.

Les relations de Green et Ampt restent d'une utilisation générale avec :

- K_{sat} remplacée par $K(\theta_x)$
- θ_{sat} de la couche remplacée par $\theta(t)_x$ du sommet de la couche ($\theta_i < \theta(t)_x < \theta_{sat}$)
- h_f remplacée par h_i sous le front d'humectation
- h_0 remplacée par h_x correspondant à $\theta(t)_x$

Le défaut d'infiltration apparaît chaque fois que $IP_s(t)$ dépasse θ_{sat} , la somme de ces dépassements constitue alors le ruissellement potentiel dont une partie quitte réellement la parcelle lorsque la capacité maximale de flaquage est dépassée. Celle-ci serait alors déterminée en fonction de la rugosité de la surface du sol, elle-même soumise à une évolution temporelle due aux travaux agricoles et à l'impact des pluies successives, notamment.

Le phénomène d'infiltration ainsi approché montre que tout $K(\theta_{sat})$ qui définit la vitesse d'infiltration d'une couche (i) plus profonde atteinte par le front d'humectation est soit limitée par la vitesse d'infiltration atteinte dans la couche (i-1) si $v(i-1) < v(i)$ et, au contraire imposera à toutes les couches supérieures jusqu'à la surface du sol sa vitesse $v(i)$ si $v(i) < v(i-1)$.

Ainsi tout au long d'un épisode de pluie, l'infiltration est calculée ainsi que le ruissellement potentiel résultant. La profondeur du front d'humectation connue permet de donner pour toutes les couches concernées les nouvelles valeurs d'humidité volumique, soit $\theta_i(t+1)$ de chaque couche et en fin de pluie $\theta_i(t_f)$. Le modèle fournit ainsi l'évolution

temporelle de l'infiltration et du ruissellement, pour un pas de temps pris comme étant au moins le centième de la durée estimée de la pluie.

I.2.4.5. Redistribution entre couches et flux profonds

Le bilan d'énergie (paragraphe I.2.2) avec son couplage sol végétation (paragraphe I.2.3) modulé par le bilan hydrique des apports et des pertes (paragraphe I.2.4.(1 à 3)) est en grande partie suffisant pour conduire le bilan complet du sol. Cependant ce sol est représenté selon trois horizons de sol, chacun divisé en (n_i) couches (paragraphe I.2.1.). L'humidité de ces couches évolue en fonction du temps selon le prélèvement des racines et seule la surface se dessèche, régulée par l'évolution du « mulch ».

Puisque chaque couche évolue sous cette contrainte de prélèvement, une analyse de la redistribution de l'eau entre elles devient nécessaire. C'est pourquoi entre deux jours successifs, une redistribution entre les couches est effectuée sur une journée fictive à partir des valeurs obtenues en fin de journée à partir de tous les autres processus pris en compte.

Cette évolution temporelle du stock d'eau due aux transferts liquides entre couches du sol est calculée par un modèle multicouche classique fondé sur la loi DARCY, étendu aux milieux non saturés et sur l'équation de la conservation de la masse (équation de continuité). L'équation ci-dessous, résultant de cette combinaison est connue sous le nom d'Equation de Richards :

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{1}{C(\Psi, z)} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K(\Psi, z) \cdot \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z} - 1 \right) \right\}$$

K , la conductivité hydraulique en $m.s^{-1}$,

h = charge hydraulique ($h = \psi - z$, ψ le potentiel matriciel en m), (m),

z = profondeur (m),

ρ = masse volumique de l'eau ($kg.m^3$),

$C(\Psi, z) = \partial \theta_v / \partial \Psi$ c'est la capacité Capillaire du sol à la profondeur z (en m^{-1}).

La diffusion en phase vapeur n'est pas prise en compte ; l'effet de la température sur l'ensemble des processus de rediffusion de l'eau dans le sol est supposé négligeable devant la rediffusion passive due au gradient de potentiel hydrique. De plus, les mouvements d'eau répondent uniquement aux transferts passifs liés aux gradients de potentiel matriciel et gravitaire (le gradient osmotique n'est pas pris en compte dans le potentiel total, comme cela peut exister sous certaines conditions).

La description du sol est limitée à des paramètres homogènes par horizon pédologique différencié et qui sont supposés constants au cours du temps. Les relations, potentiel hydrique (humidité pondérale ou volumique) et conductivité hydraulique, sont dictées par les relations de Van Genuchten et Mualem (1981) dont les paramètres, propres à chaque type de sol, doivent être déterminés expérimentalement ou être établis sur la base de relations de pédo-transfert.

L'équation de Richards est discrétisée dans le modèle selon un schéma implicite et une résolution par différences finies. Les conditions de flux sont celles admises dans l'approche du mulch de surface ce qui impose avec le sol sous-jacent une condition de flux nul. En profondeur, sous la zone de développement racinaire maximal là où se situe la dernière couche, c'est une condition de drainage libre qui est admise à la base de cette dernière ; soit un flux imposé égal à la conductivité hydraulique de la dernière couche, limitant ainsi le gradient de potentiel à la seule charge gravitaire, choix simple et classique (plus de détails dans Personne, 1998)

Le modèle recalcule donc, jour après jour, les transferts par diffusion entre couches, qui tiennent compte des apports d'eau au sol (infiltration d'eau de pluie et irrigation) et de

leur perte (prélèvement racinaire via la transpiration et le drainage profond, perte à la limite inférieure du sol)

Le profil d'humidité ainsi fourni en milieu de nuit par le modèle permet chaque jour de localiser les zones de prélèvements racinaires en fonction des disponibilités en eau du sol. Il permet aussi de quantifier le flux d'eau susceptible de quitter la dernière couche (drainage profond vers des exutoires, nappe ou écoulement profond).

I.3. Conclusion

La dynamique des différents paramètres du couplage du bilan énergétique et hydrique, comme on vient de le voir dans ce premier chapitre, est sous la contrainte des données de forçages climatiques (rayonnement, température de l'air, humidité de l'air, vent et pluies) et de la valeur de quelques paramètres du modèle concernant les trois domaines du continuum, le sol, la plante et l'atmosphère (voir liste des paramètres du modèle dans le tableau n°1 en annexe 1).

Parce que le modèle « Bilhyna » traite des surfaces sol-végétation et de leurs échanges avec l'atmosphère, il est clair que les bilans réalisés dans ce chapitre, de façon purement physique avec des modulations dues à des paramètres biophysiques, soulignent de façon permanente la dépendance aux aspects biologiques (état de l'éco ou agrosystème). Ces aspects qui sont toujours très dynamiques et rétroactifs, induisent des modifications de la culture à travers son développement et ses réactions biologiques d'adaptation aux conditions changeantes (de la journée, à l'année et aux décennies). Pour cela, le domaine potentiel d'utilisation du modèle présenté dépend d'une capacité à bien traduire les réponses rétroactives environnementales de la plante qui jouent sur son développement et sa croissance, à travers les contraintes de milieu (climats et ressources).

C'est pourquoi une prise en compte des rétroactions de la plante, en particulier sur son développement et sa croissance qui conditionnent son interface aérienne (feuillage repéré par son indice de surface foliaire, LAI, et la hauteur du couvert, Z_h , dans laquelle il se développe), mais aussi son interface souterraine définie par sa densité racinaire et sa profondeur, Z_r), est indispensable. La mise en place d'une loi biophysique de la vitesse de développement qui intègre toute la plage des températures viables d'un écotype climatique de plante est analysée au chapitre suivant avec ses conséquences sur la croissance des différentes phases de développement. De plus les diverses rétroactions des contraintes physiques sur ces croissances seront aussi modélisées dans ce chapitre suivant, point fort de notre travail.

Une analyse prospective selon les cultures en fonction des climats locaux ou régionaux, avec ou sans évolution climatique donnée, devient alors plus réaliste puisque les potentialités de développement et de croissance sont véritablement en interaction avec le climat et l'évolution du milieu qui en résulte. D'où, une véritable analyse des bilans réels annuels devient possible et permet de mieux juger de la durabilité des ressources disponibles selon les schémas d'utilisation de l'espace rural (rotations, assolements) et l'aménagement des aspects forestiers (arbres, haies, bosquets, forêts) (Perrier, Tuzet ; 2005) :

$$R_p = \sum_{an} P - \sum_{an} ET$$

Les ressources potentielles, R_p , à collecter au mieux (ruissellement, drainage), doivent en absence de transferts régionaux, satisfaire la durabilité des utilisations humaines. Il nécessite qu'au moins R_p soit supérieur aux utilisations régionales humaines (Perrier et Tuzet, 2003):

$$R_p > \sum_{an} Ir + \sum_{an} Ind + \sum_{an} Humaine$$

CHAPITRE II.

MODÈLE BIOPHYSIQUE DE DÉVELOPPEMENT-CROISSANCE

II. Modèle biophysique de développement-croissance

II.1. Généralités

Dans les modèles de cultures, les modules traitant de l'évolution des couverts ont un rôle pilote. Leur principal défi réside dans leurs capacités à reproduire le plus fidèlement possible la dynamique de mise en place de la structure de ces couverts. L'une des méthodes les plus utilisées pour décrire cette évolution demeure sans doute l'analyse des différentes phases de développement du couvert. La croissance au sein de chacune de ces phases de développement est le changement le plus caractéristique de cette évolution. Les deux processus mis en jeu, développement et croissance, se déroulent de façon univoque et peuvent être exprimés en termes biophysiques assez simples (Wit et Goudriaan, 1974).

II.1.1. Évolution de la culture et phases de développement

Le développement phénologique des cultures est souvent décrit par une succession de repères (définissant les phases de développement, *Figure 5* pour le cas du blé) correspondant à des états physiologiques différents (Kofler., 1963 ; Durant., 1967 ; Chapman et al ., 1969 ; Heller., 1978 ; Connor et Hall., 1997), mais variables selon les espèces.

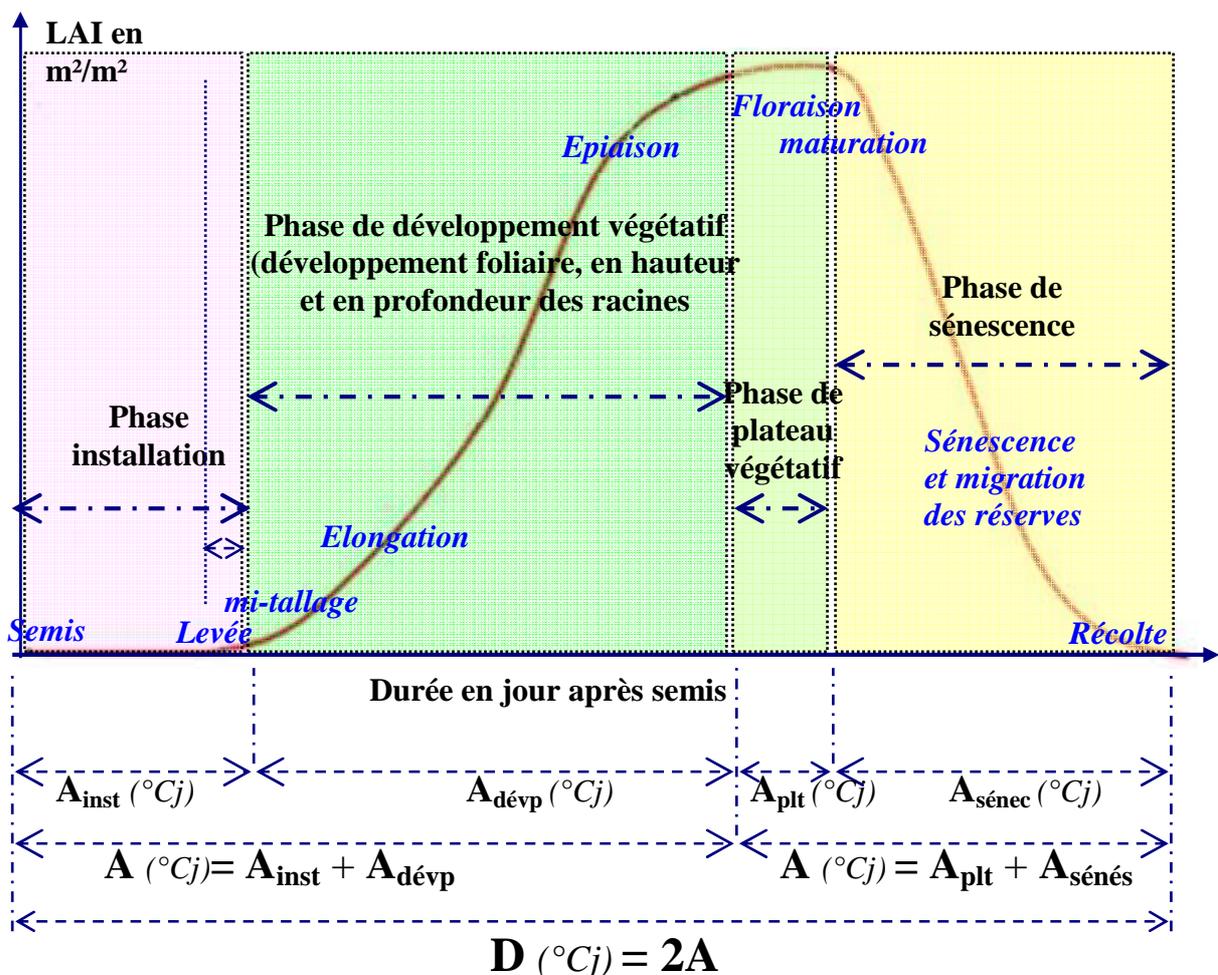


Figure 5. Quatre principales phases de développement du couvert chez le blé (plantes monocarpiques), tel que pris en compte dans le module biophysique de développement-croissance (en bleu les principaux stades ayant lieu durant les quatre phases)

Ces stades de développement ont été créés dans le but de mieux comprendre le fonctionnement des plantes (pour ce qui est des physiologistes) ou pour améliorer les interventions agricoles aux champs (pour les agronomes), telles que l'irrigation ou la prédiction de la production, pour ne citer que ces exemples-là, sur des cultures comme le blé (Weir et al., 1984 ; Rittchie et Otter., 1985 ; Van Keulen et Seligman., 1987 ; Porter., 1993), le maïs (Jones et Kiniry., 1986), le tournesol (Chapman et al., 1993b), la tomate (Gary et al., 1995), le soja (Sinclair., 1986),. Dans le cas des études sur le fonctionnement hydrique des couverts végétaux, l'utilisation de modèle générique de l'évolution du cycle des couverts nécessite de se limiter aux principales phases de développement communes à tous les couverts.

De nombreuses tentatives visant l'homogénéisation des échelles de développement adaptées à une gamme non négligeable de cultures ont donc vu le jour, à l'instar de celle proposée par la Biologische Bundesanstalt, BUNDessortenamt et Chemische Industrie (BBCH), adaptée à l'ensemble des plantes mono et dicotylédones cultivées (annexe II.I.a). Celle-ci reste, cependant, encore bien trop détaillée pour le rôle que jouent ces différentes phases dans le suivi des bilans énergétiques et hydriques. Partons de là et pour rester fidèle à nos objectifs de modélisation du bilan d'eau et d'énergie, tout en prenant en compte non seulement le développement phénologique spécifique des plantes cultivées mais aussi celui des autres couverts tels que les prairies, les forêts et même les oasis, une description assez générale du développement et des ses différents repères s'impose.

On s'est donc limité aux principaux repères caractérisant les discontinuités majeures du programme d'évolution d'un couvert, à partir desquels les bilans d'énergie et d'eau sont les plus modifiés. Quatre principales phases de développement, qui s'inscrivent dans un même cycle d'évolution d'un couvert végétal, découlent de cette approche (annexe II.I.b). L'objectif de cette simplification est de recouper autant que possible les aspects d'ordre génétique liés à l'évolution programmée des couverts avec ceux liés aux aspects de la culture et ayant une signification plutôt agronomique (*Figure 5*). Le cycle commence généralement au semis (mise en terre des graines, repiquage, ...etc.) et finit en théorie à la fin de la maturation (dessèchement de toute la biomasse aérienne ou chute des feuilles pour les arbres à feuilles caduques). La fin du cycle peut avoir lieu avant la maturation si une intervention technique a lieu (récolte verte ou taille sévère sur arbre par exemple); ce qui remet le cycle à ses débuts. Les quatre principales phases de développement sont les suivantes (*Figure 5*) :

- *La phase d'installation*, dans laquelle on regroupe les stades semis - germination-levée (correspondant au stade noté 0 dans la classification BBCH) de même que le début du stade tallage (sortie des premières pousses ou talles) pour les cultures qui présentent ce stade très particulier de développement (cas du blé par exemple). Dans ces conditions, la phase en question dure plus longtemps.

- *La phase de développement végétatif*, qui a lieu juste après la phase d'installation du couvert et se termine lorsque le couvert atteint sa dimension maximale (surface foliaire, hauteur, profondeur des racines) correspondant approximativement au début de la floraison. Elle regroupe plusieurs stades mentionnés dans la classification de la BBCH, tels que l'élongation, la montaison et l'épiaison pour ne citer que ces exemples pour les grandes cultures.

- *La phase de plateau végétatif*, qui comprend la différenciation embryonnaire et la formation du grain. Cette phase du plateau végétatif prend fin avec le début de la sénescence des feuilles qui coïncide, dans le cas des céréales, avec la migration des éléments élaborés

favorisant la maturation des graines, mais souvent après la production de fruits chez beaucoup d'autres espèces.

- *La phase de sénescence* est celle durant laquelle le feuillage devient de moins en moins fonctionnel (jaunissement des feuilles ou dessèchement progressif chez les graminées) et de moins en moins vert avant d'atteindre une sénescence complète (exception faite aux récoltes vertes des cultures et aux plantes non monocarpiques).

II.1.2. Vitesse de développement au cours d'une phase

II.1.2.1. Définition de la vitesse de développement

La vitesse de développement au cours d'une phase (V_d) est définie à chaque instant comme une proportion du développement maximum par unité de temps (généralement la journée). Cette vitesse de développement au cours d'une phase ne varie qu'en fonction de la température moyenne journalière de l'air. Son évolution en fonction de la température a été mesurée expérimentalement pour différentes plantes et différentes phases de développement. La figure 6 illustre cette évolution pour différentes plantes (tomate, lupin, maïs et concombre). Nous voyons sur cette figure que la vitesse de développement au cours d'une phase présente un optimum pour une température donnée relative à chaque plante. La vitesse de développement est nulle pour deux températures, l'une définissant le seuil de développement vrai de la culture et l'autre le seuil léthal.

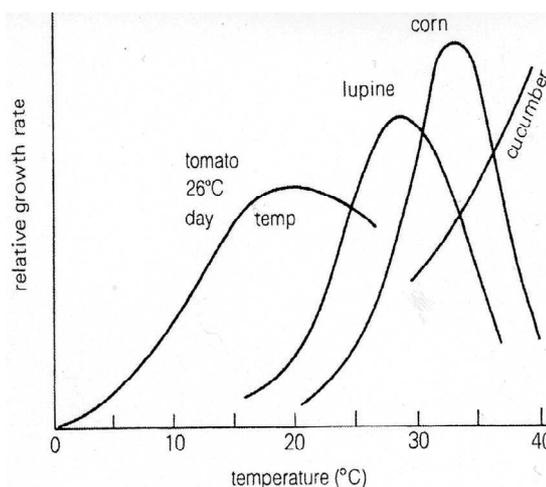


Figure 6. Vitesse de développement de quatre types de plantes agronomiques en fonction de la température journalière (Salisbury et Ross., 1991)

II.1.2.2. Définition du temps physiologique

Comme nous venons de le voir la vitesse de développement ne dépend que de la température et comme chaque journée est définie par sa température moyenne, nous pouvons donc affecter à chaque journée une vitesse de développement (proportion du développement maximum). Si on cumule pour chaque journée et depuis l'instant initial cette vitesse de développement, on obtient l'évolution au cours du temps de la phase de développement; cette somme varie entre zéro et un (un, correspond à la fin du stade considéré qui est défini comme le développement maximum) et elle correspond à un temps physiologique normé par sa valeur maximum notée A_{max} (Durant., 1967 et 1969; Geslin., 1944) Le temps physiologique s'écrit donc :

$$A(t) = A_{max} \sum_0^t V_d(t) \quad \text{[Relation 1]}$$

Par tradition ce temps physiologique est exprimé en degré jour ($^{\circ}\text{Cj}$). Le temps physiologique a fait l'objet de nombreux travaux expérimentaux qui ont montré qu'il est bien défini et constant pour le plein accomplissement d'une phase de développement, contrairement au temps journalier. Il peut être alors considéré comme une mesure de l'âge phénologique de la plante (Garnier et al., 2002), permettant de définir une succession de stade d'évolution d'une plante par rapport à un critère de croissance donné, comme ce sera le cas dans ce travail pour l'indice foliaire et par extension pour la hauteur du couvert et pour le développement du système racinaire. Ce temps physiologique, correspondant au plein

accomplissement d'une phase de développement, atteint la valeur maximum, A_{\max} ($^{\circ}\text{Cj}$). Celle-ci est bien sûr dépendante des différents stades et des différentes espèces, voire parfois des différentes variétés.

On s'aperçoit à ce niveau de développement que le temps vrai (jour) face au développement réalisé n'est qu'une variable élastique qui dépend du climat à travers l'action de la température sur la vitesse de développement. C'est ce qui a été observé sur de nombreuses cultures agronomiques telles que le tournesol (Garnier et Tardieu, 1998) ; le pois (Truong and Duthion., 1993 ; Turc et Lecoecr., 1997), le maïs (Ben Haj et Tardieu, 1995 et 1996), le blé (Geslin., 1944) ; le sorgho (Lafarge et al., 1998) ; le colza (Garnier et al, 2002 ; Aiken, 2005) ; le lin (Durant et al., 1967). La plupart des physiologistes préfèrent donc prendre comme repère du développement qui semble plutôt une variable biologique, de type génotypique (lié au phénotype), le terme dominant du développement $A(t)$ (temps physiologique compté en degrés jours), considéré aujourd'hui dans de nombreux modèles et études comme étant la bonne variable permettant d'analyser et de simuler les événements caractéristiques du développement (Bonhomme., 2000 ; Keating et al., 2003., Lizaso et al 2003; Sadok et al., 2007 ; Garnier et al., 2002., Chenu et al., 2008 ; Fournier et al., 2000 et 2005 ; Gustavo, 1995).

Signalons au passage que la vitesse de développement n'a été introduite que pour définir le temps physiologique et l'évolution de la succession des stades lors d'un cycle de développement d'une culture. Au sein de chaque stade de développement nous allons donc définir une vitesse de croissance et une loi de croissance (croissance cumulée).

II.1.3. Loi de croissance au sein d'un stade

Au sein d'un stade de développement, la croissance en dimension (surface foliaire, hauteur, profondeur racinaire,...) qui dépend de la multiplication cellulaire et de la production de matière sèche est fonction, elle aussi, du temps physiologique (Kiniry et al., 1992 ; Chapman et al., 1993). Elle est exprimée classiquement par une fonction logistique que nous faisons donc dépendre du temps physiologique et non plus du temps réel (jour). La logistique est définie en fonction d'une vitesse de croissance notée V_c [= $dy/dA(t)$] et exprimée selon la grandeur (y) utilisée, en variation journalière de la grandeur considérée par degré jour (par exemple pour la surface foliaire, V_{LAI} , $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$).

II.2. Modèle biophysique développement-croissance

II.2.1. Modélisation de la vitesse de développement

II.2.1.1. Généralités

Dans le paragraphe précédent, on a rappelé que la loi de développement-croissance et son déroulement dépendaient de la vitesse de développement propre à l'ensemble des processus biologiques, fonction principalement de la température (moyenne journalière) ; ceci a permis de montrer comment le temps vrai (en jour) pouvait paradoxalement être remplacé par le temps physiologique ($^{\circ}\text{C.j}$). Cependant définir cette loi d'action de la température sur la vitesse de ces processus ($V_d(T)$) sous forme d'une expression est le premier objectif de ce chapitre afin de pouvoir travailler dans toute la gamme des températures et ne pas se limiter à une gamme réduite de ces températures où une approximation linéaire dite méthode des sommes de températures solutionne en partie le problème. Bien que simple d'utilisation et encore d'actualité, la validité de cette approche demeure toutefois limitée à un lieu donné et à sa gamme de températures autour d'une valeur moyenne.

En effet, l'effet dépressif des températures au voisinage de l'optimum d'action de la température, ou à fortiori de celles supérieures à l'optimum (*Figure 7*), ne peut être pris en compte par une approche linéaire ; de même l'effet des basses températures en début du cycle végétatif (cultures d'hiver et de début de printemps) est expérimentalement assez bien connu et montre une réponse plutôt à une action exponentielle en fonction de la température plutôt qu'à l'action de type linéaire (Garcia-Huidobro et al., 1982a ; Durant., 1969). Ainsi pour les zones climatiques froides, l'ajustement à une exponentielle est nettement préférable à celui d'une droite. Aussi une fonction de température très générale, $f(T)$, permettra de prendre en compte, pour une culture donnée, la variabilité des climats (selon le lieu) et le poids des températures climatiques journalières très fluctuantes.

Par ailleurs, l'alternance des périodes de températures contrastées peut aussi modifier la loi d'action sur une période déterminée ; ceci a été montré dans le cas de processus de rupture de la dormance (Benecch et al., 1988). Mais, bien que le poids de l'amplitude thermique journalière n'ait pas fait l'objet de beaucoup d'études, des expériences montrent l'existence d'un effet significatif sur certaines phases de développement des cultures comme la germination (Garcia Huidobro et al, 1982a, 1982b), alors que la plupart des auteurs soulignent le non effet significatif sur les autres stades (Ellis et al., 1990; Summerfield et al., 1992, Wagenvoort et Bierhuizen, 1977). Il est certain que pour la germination, le contraste très fort des températures entre le jour et la nuit, fait que la moyenne journalière n'a pas forcément de signification et qu'une analyse en degré heure serait plus pertinente. Comme le dit Gustavo (1995), l'utilisation de la température moyenne journalière issue de l'amplitude des minima et maxima aboutit au même résultat que dans le cas d'une utilisation de ces deux températures séparément ; c'est pourquoi nous avons retenu pour notre modélisation la température moyenne journalière.

Rappelons aussi que, contrairement au développement où la vitesse est induite principalement par la température, la vitesse de la croissance doit être modulée par des fonctions de rétroactions positives ou négatives de types biologiques et abiotiques, indépendamment des contraintes spécifiques prises en compte dans ce travail, comme le rayonnement et l'eau (voir paragraphe II.2.2.).

II.2.1.2. Élaboration de la solution proposée pour la vitesse de développement

En chimie, pour rendre compte de l'évolution expérimentale d'une vitesse de réaction en fonction de la température, on fait appel le plus souvent à la loi d'Arrhenius proposée en 1889. Elle s'écrit :

$$V = A \cdot \exp \left[-Ea / (RT) \right]$$

Où : V est la vitesse de réaction (s^{-1}), A est une constante dont la valeur dépend de la réaction considérée (s^{-1}), R est la constante des gaz parfaits $Jmol^{-1}.K^{-1}$, Ea est l'énergie d'activation ($Jmol^{-1}$) et T est la température (en Kelvin).

Cette relation est souvent utilisée en physiologie des plantes pour décrire l'évolution de nombreux phénomènes biochimiques en fonction de la température ; elle est aussi bien utilisée pour les phénomènes d'activation que d'inhibition de l'activité biologique.

Pour modéliser la vitesse de développement, d'une façon la plus générique possible, nous avons choisi de l'exprimer comme la somme algébrique d'une fonction d'activation (Y_{activ}) et d'une fonction d'inhibition (Y_{inhib}) :

$$V_d = Y_{activ} - Y_{inhib}$$

Les expressions de ces fonctions, dérivées de la loi d'Arrhenius, sont données en fonction d'une température adimensionnée X afin de s'ajuster aux caractéristiques de toutes les plantes. En effet, nous savons que les processus biochimiques des plantes évoluent toujours entre une température minimale T_{\min} correspondant à un développement nul et une température maximale de développement T_{\max} également nulle et généralement létale. La température adimensionnée X est donc donnée par la relation :

$$X = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}$$

Les fonctions d'activation (Y_{activ}) et d'inhibition (Y_{inhib}) utilisées sont :

$$Y_{activ} = B \cdot \exp\left[\eta \cdot X + \frac{\tau}{4}\right] \quad \text{Loi d'activation}$$

$$Y_{inhib} = B \cdot \exp\left[\eta \cdot X + \frac{\tau}{4} \cdot (2X - 1)^2\right] \quad \text{Loi d'inhibition}$$

où B est un paramètre normatif de même unité que Y ; η est un coefficient d'ajustement de la pente de la courbe de croissance (plus ou moins forte) ; τ , un coefficient qui augmente la valeur initiale de Y (pour $X=0$) et accroît la pente de la courbe.

L'expression de la vitesse de développement dépend de ces trois paramètres (B , η et τ) :

$$V_d = Y_{activ} - Y_{inhib} = B \cdot \exp\left(\eta X + \frac{\tau}{4}\right) - B \cdot \exp\left(\eta X + \frac{\tau}{4}(2X - 1)^2\right)$$

$$V_d = B \cdot \exp\left(\eta X + \frac{\tau}{4}\right) (1 - \exp(\tau X(X - 1)))$$

et l'expression de la pente est donnée par :

$$\frac{dV_d}{dX} = B \cdot \left[\exp\left(\eta X + \frac{\tau}{4}\right) (\exp(\tau X(X - 1))) (-\eta - \tau(2X - 1)) + \eta \exp\left(\eta X + \frac{\tau}{4}\right) \right]$$

Les paramètres de la vitesse de développement seront définis par les conditions expérimentales :

- La première de ces conditions est imposée par la température moyenne du lieu, T_{moy} , pendant la période de développement (donnée climatique) ; de plus cette valeur est aussi définie par sa vitesse de développement moyenne correspondante ($V_d(X_{\text{moy}})$).

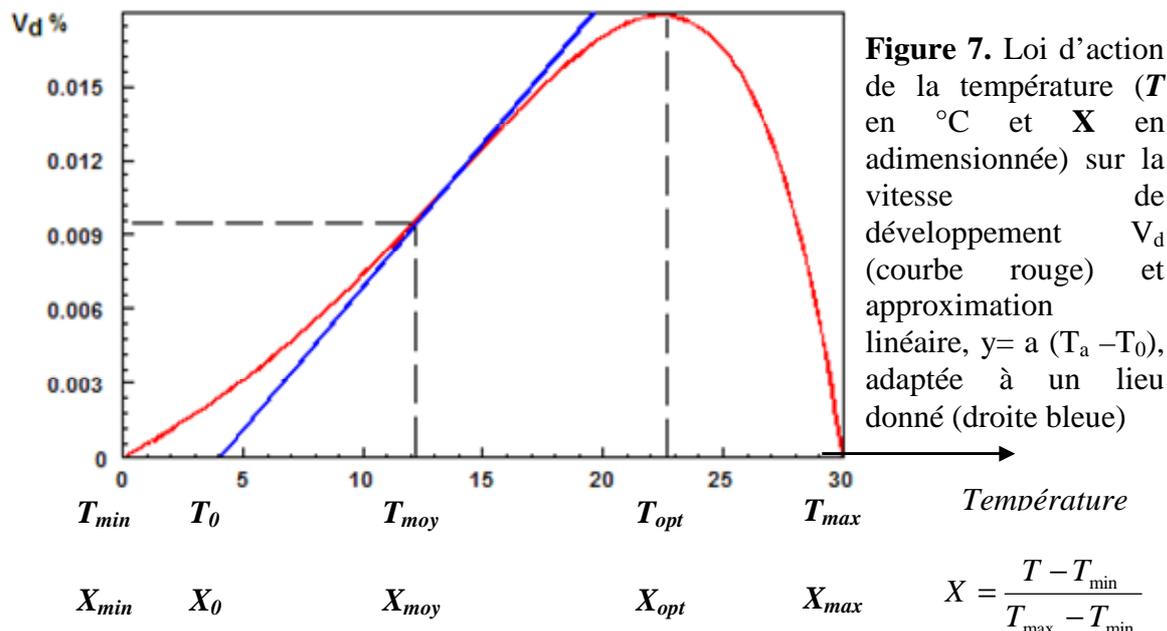
- La deuxième est donnée par la pente de la vitesse de développement en ce point $\left(\frac{dV_d}{dX}\right)_{\text{moy}}$.

- La troisième condition, correspond à la température, T_{opt} , induisant l'optimum de la vitesse de développement qui est une caractéristique des espèces, dépendant assez largement de leur adaptation au climat (*Figure 7*).

Pour définir la vitesse de développement $V_d(X_{\text{moy}})$ correspondant à la température T_{moy} , nous avons supposé que la phase de développement s'effectuait tout au long de son cycle (comprenant n jours) à une température constante T_{moy} (conditions expérimentales contrôlées). Si A_{max} est la somme des températures nécessaires à ce cycle, on a :

$$A_{\text{max}} = n(T_{\text{moy}} - T_0)$$

Où T_0 est la température seuil, définie expérimentalement, si l'on considère une variation linéaire de la vitesse de développement en fonction de la température (Figure 7). Les trois paramètres A_{max} , T_0 et T_{moy} sont les paramètres qui caractérisent toute variété pour des conditions climatiques données (T_{moy}), valeurs produites pour toute variété commercialisée.



Au temps physiologique maximum A_{max} , on a atteint le plein développement de la phase et donc la somme des vitesses de développement (proportion du développement maximum) de chaque jour est égale à 1:

$$n \cdot V_d(X_{moy}) = 1$$

D'où en combinant avec l'équation précédente:

$$V_d(X_{moy}) = \frac{1}{n} = \frac{T_{moy} - T_0}{A_{max}}$$

Ainsi on peut aussi définir la pente de la vitesse de développement à T_{moy} :

$$\frac{dV_d}{dX} = \frac{V_d(X_{moy})}{X_{moy} - X_0} = \frac{T_{moy} - T_0}{A_{max} \frac{T_{moy} - T_0}{T_{max} - T_{min}}} = \frac{T_{max} - T_{min}}{A_{max}}$$

Les trois conditions qui nous permettent de définir les trois paramètres dans cette expression de la vitesse de développement sont donc résumées ainsi (voir détails sur ces relations en annexe II.2) :

1. à T_{moy} donc X_{moy} on a $V_d(X_{moy}) = \frac{T_{moy} - T_0}{A_{max}}$
2. à T_{moy} donc X_{moy} on a $\frac{dV_d}{dX} = \frac{T_{max} - T_{min}}{A_{max}}$
3. à T_{opt} donc X_{opt} on a $\frac{dV_d}{dX} = 0$

En fait le poids du paramètre (τ) est très faible pour toute une gamme de ce paramètre comprise entre (0^+) et (5); or ces valeurs sont les seules utiles pour les conditions expérimentales qui intéressent les plantes de l'équateur aux zones nordiques (on fixera donc $\tau = 1$). Ainsi la robustesse des solutions obtenues se trouve renforcée si la température minimale létale n'est pas considérée comme une grandeur connue; en effet, il existe des températures bien plus basses que la température du démarrage sensible du développement (résistance acquise aux températures très basses en particulier pour les plantes de région nordique). C'est pourquoi la température minimale reste difficile à apprécier et à déterminer expérimentalement et remplacera comme inconnue (τ).

Pour obtenir finalement les trois inconnues retenues (T_{\min} , η et B) à partir du système des trois conditions précédentes, la connaissance des données expérimentales suivantes est nécessaire :

- T_{moy} , paramètre climatique
- T_{max} et T_{opt} , caractéristiques physiologiques de la plante
- A_{max} et T_0 , caractéristiques de développement de la plante.

Les trois conditions notées ci-dessus (1, 2 et 3), conduisent à un système d'équations non linéaires. La combinaison de ces trois équations permet de réduire le système à une seule équation non linéaire dépendante de T_{\min} et qui doit être résolue numériquement (voir annexe II.2). Connaissant le paramètre T_{\min} , les deux autres paramètres B et η se déduisent facilement des équations décrivant les conditions définies ci-dessus.

II.2.1.3. Analyse des variations de la vitesse de développement en fonction de la température optimale des grands types de végétation

Bien que l'allure générale de la courbe $V=f(T)$ reste valable pour tous les végétaux, des variations suivant les espèces et les variétés peuvent donc être signalées (*Figure 6*). En effet pour la plupart des végétaux de pays tempérés les valeurs de X_{opt} restent autour de 0.8, alors que pour des pays froids, la courbe croît très faiblement pour les températures très basses et atteint son optimum pour des valeurs de X_{opt} plus grande (0.9), En zones intertropicales par contre on tend vers des croissances et décroissances assez symétriques par rapport aux valeurs plus petites de X_{opt} (voisines de 0.5 à 0.65). L'optimum est un reflet des adaptations des variétés aux climats régionaux et locaux.

Pour éviter des divergences par rapport à ces courbes typiques résultant de paramètres introduits parfois avec un manque de connaissances, on a choisi (paragraphe précédent) une solution calée autour des températures les plus climatiques et les plus fréquentes (T_{moy}) du lieu pour laquelle une droite de somme de températures est connue expérimentalement pour toute variété commerciale. Le schéma adopté ci-dessus montre que selon la température moyenne du lieu (T_{moy}), l'ajustement linéaire peut être une droite assez différente (*Figure 7*).

Une représentation de la vitesse de développement, normée par la vitesse de développement maximum, est représentée en fonction de la température adimensionnée ($X = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}$) pour différentes valeurs de T_{opt} sur la figure 8. Les valeurs de X_{opt} ont été choisies pour couvrir une gamme de végétation importante. La valeur de X_{opt} de 0.55 correspond à des végétations de type équatorial (papyrus par exemple) et au contraire une valeur de 0.95 correspond à des végétations de type nordique (toundra, conifères). Nous voyons sur la figure 8 que pour les plantes de type équatorial, la végétation se développe rapidement et de façon parabolique alors que pour les végétations nordiques, on a un développement faible aux basses températures et un accroissement exponentiel du

développement pour les températures proches des températures moyennes de la période de développement.

La connaissance, pour chaque type de végétation et chaque phase de développement de cette végétation, de sa vitesse de développement (proportion du développement maximum de ce stade) est un élément majeur. Compte tenu de l'homogénéité du fonctionnement biologique d'une plante, il sera admis que les évolutions de la vitesse de développement en fonction de la température, pour toutes les phases de développement, ne se différencient que par leur temps physiologique maximum A_{max} (cumul des degrés jour nécessaires au plein développement de la phase).

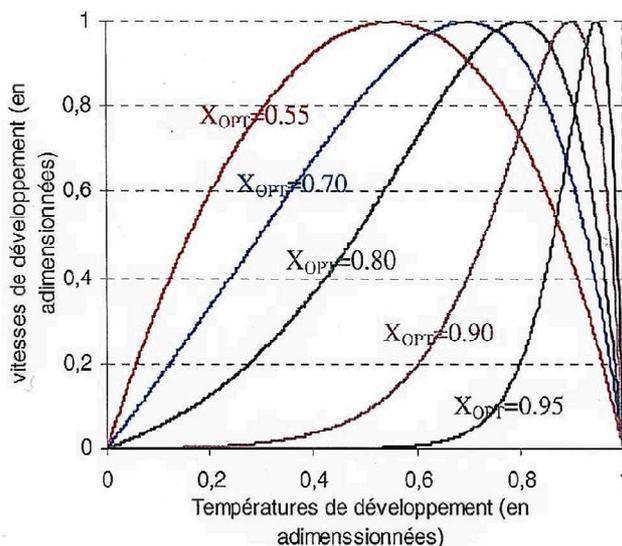


Figure 8. Loi théorique de l'action de la température sur la vitesse de développement selon différentes valeurs de températures optimales (X_{opt}) représentatives des grands types climatiques des cultures

Si on cumule pour chaque journée et depuis l'instant initial cette vitesse de développement, on obtient l'évolution au cours du temps de la phase de développement; celle-ci varie entre zéro et un développement maximum. Cette évolution de la phase de développement au cours du temps peut également être exprimée en fonction de la somme des températures moyennes journalières, comme il a été montré sur de nombreuses cultures agronomiques telles que le blé (Geslin., 1944) ; le lin (Durant et al., 1967) ; le pois (Truong and Duthion., 1993 ; Turc et Lecoeur., 1997) ; le maïs (Ben Haj et Tardieu, 1995 et 1996), le tournesol (Garnier et Tardieu, 1998) , le sorgho (Lafarge et al., 1998) ; le colza (Garnier et al, 2002 ; Aiken, 2005) ;. Cette somme des températures moyennes journalières, appelée comme on l'a vu temps physiologique $A(t)$, est traditionnellement exprimée en degré jour ($^{\circ}C.j$).

II.2.1.4. Illustration :

A titre d'exemple, sur la figure 9a, nous avons représenté à partir du 01 janvier l'évolution au cours du temps vrai (compté en jours) de la vitesse de développement du feuillage (phase de développement foliaire) d'une culture d'hiver comme le blé (avec un seuil de végétation $T_0=2^{\circ}C$, une température moyenne journalière de la région $T_{moy}=13^{\circ}C$ et une température létale maximale $T_f=30^{\circ}C$, pour une durée de la phase en somme de température, A_{max} , de $1000^{\circ}C$), en fonction des températures physiologiques estimées selon deux méthodes de calculs (i) par la solution classique de l'approximation linéaire selon la relation $(T_a - T_0)$ et (ii) par la nouvelle solution proposée ci-dessus (paragraphe II.2.1.2). Une sous estimation non négligeable de la vitesse de développement journalière est alors notée avec l'approximation linéaire durant la première moitié de la phase de développement, due à une sous estimation des températures physiologiques (période hivernale avec une gamme de température comprise entre 0 et la température moyenne du lieu, induisant par là de faibles vitesses de développement par linéarisation ; voir figure 7, paragraphe II.2.1.2). La figure 9b, représente ces deux temps physiologiques de développement ($A(t) = A_{max} \sum_0^t V_d(t)$) qui soulignent une avance d'environ 10 jours pour la nouvelle solution (thermophysiological) par rapport à la méthode classique de l'approximation linéaire dans ce cas de figure.

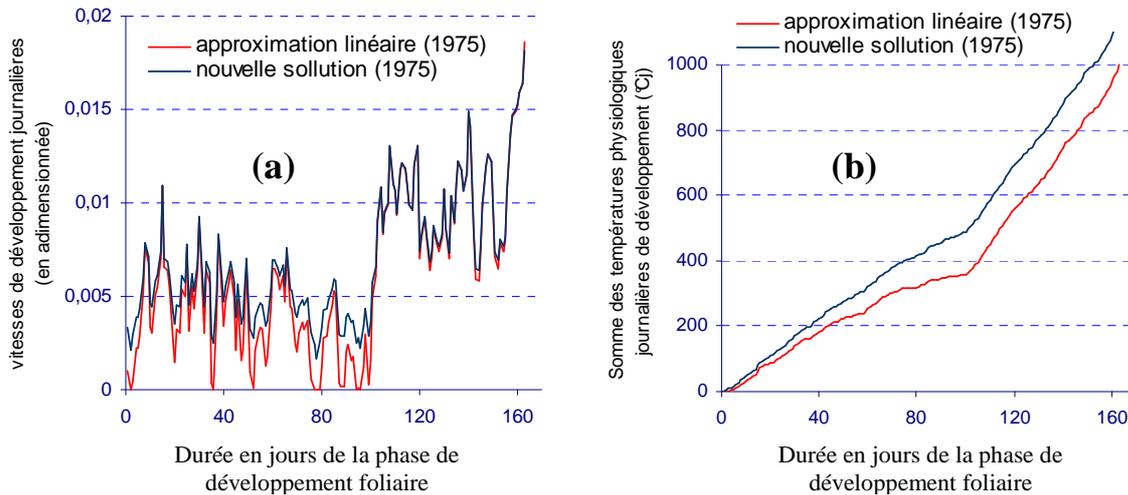


Figure 9. (a) Evolution de la vitesse de développement journalière V_d selon deux modes de calculs des températures physiologiques donnés : (i) par une approximation par linéarisation et (ii) par la nouvelle solution thermophysiological (notre modèle donné au paragraphe II.2.1.2) et (b) cumul des températures physiologiques issues de ces deux modes de calcul (i) et (ii).

Les figures suivantes représentent pour deux années consécutives l'évolution au cours du temps (compté en jours) de la vitesse de développement (*Figure 10a*) et du cumul du temps physiologique (*Figure 10b*) pour l'ensemble du stade de développement foliaire (Janvier – Mai) d'une culture de blé versaillais. Pour ces deux années, la vitesse de développement fluctue selon les variations de températures moyennes journalières. Elle croît régulièrement au cours de l'année 1975 avant de subir un saut qualitatif au début du printemps ; ceci se traduit par une nette cassure sur la courbe d'évolution du temps physiologique (*Figure 10b*).

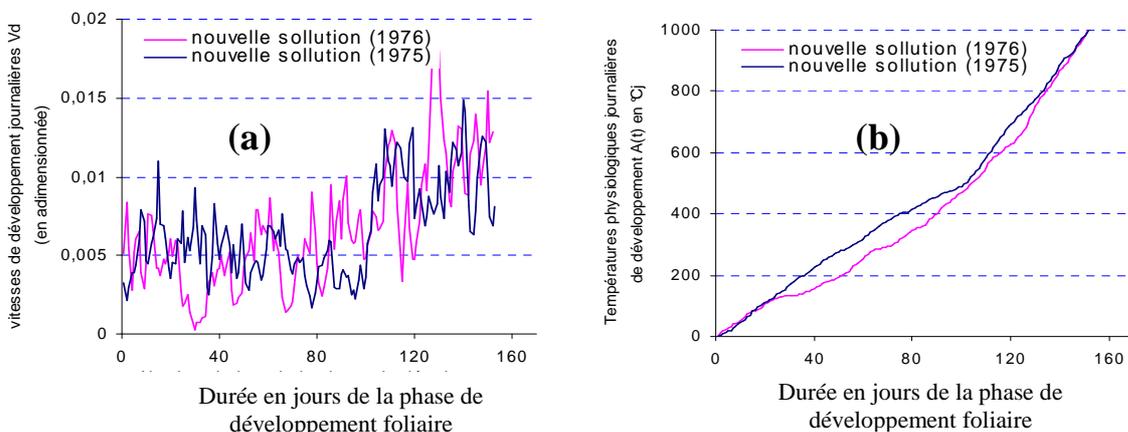


Figure 10. (a) Evolution de la vitesse de développement journalière (V_d) en fonction des températures physiologiques obtenues avec la nouvelle solution thermophysiological (notre modèle tel que donné dans le paragraphe II.2.1.2) pour deux années consécutives et (b) cumul de ces températures physiologiques sur l'ensemble de la phase de développement foliaire considérée.

Pour l'année 1976, l'évolution plus lente de la courbe est due aux températures plus basses liées à un temps sec et beau qui se prolonge au printemps (année exceptionnellement sèche de 1976) mais dont les températures croissent très vite au printemps. Finalement, malgré cette évolution sensiblement différente, le temps physiologique maximum A_{max} (fixé

pour cette illustration à une valeur de 1000 °Cj) est atteint, de façon tout à fait fortuite, au même moment pour les deux années considérées (à un ou deux jours près).

II.2.1.5 Sensibilité du modèle de vitesse de développement

Afin de montrer le caractère générique du modèle de loi de développement en fonction des températures, nous avons choisi de paramétrer celui-ci par rapport aux résultats expérimentaux de plusieurs équipes de recherches, tirés de la bibliographie. Nous allons déterminer dans un premier temps les principaux paramètres et variables d'entrée du modèle en se basant sur ces données expérimentales tirées de la bibliographie, avant d'aborder l'analyse de sensibilité du modèle.

1- Paramétrisation du modèle

Les principaux paramètres de cette loi peuvent être déduits directement des courbes expérimentales, réalisées le plus souvent sur la germination, mais peuvent être tirées aussi de la bibliographie comme c'est le cas dans cette analyse. Dans notre cas, ce sont trois courbes expérimentales tirées de la bibliographie (*Figure 11*) qui serviront à paramétrer notre modèle de loi et concernent les cultures de lin (Durant et al, 1967), de maïs (Tollenaar et al, 1979) et de blé (Geslin, 1944), présentées dans la figure 11.

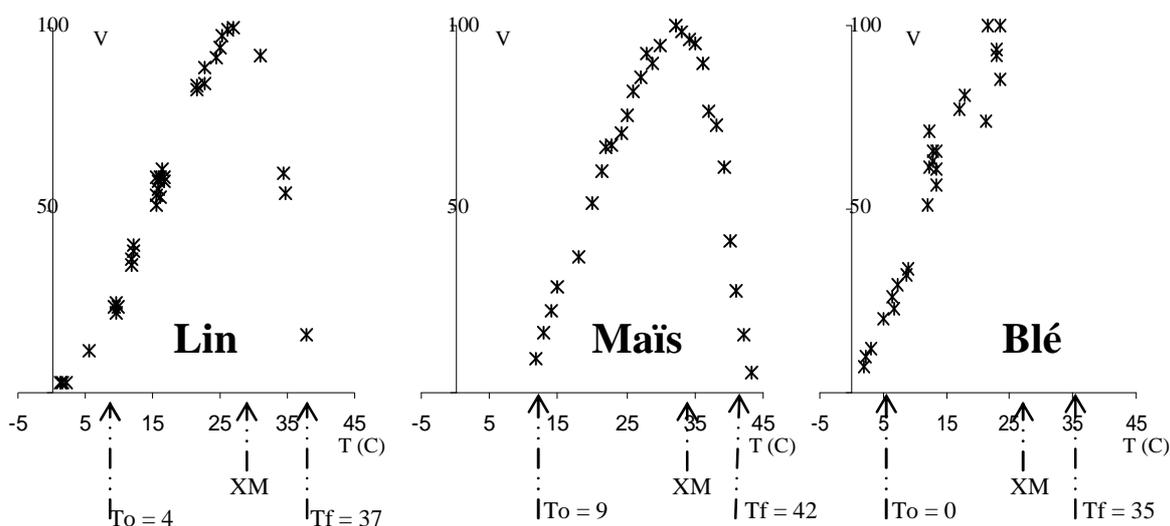


Figure 11. Loi d'action de la température sur la vitesse de développement des cultures : Le lin (Durant et al 1967), Le maïs (Tollenaar et al 1979) et le blé (Geslin 1944)

Quatre paramètres, T_0 , T_{moy} , T_{opt} et T_f , sont nécessaires au fonctionnement de la loi d'action de la température sur les vitesses de croissances des processus biologiques de la plante, vitesse de développement dans notre cas d'étude. La température physiologique minimale (T_{min}) qui se situe à quelques degrés en dessous de T_0 (globalement à 5 °C), est quant à elle déterminée directement par le modèle pour éviter toute utilisation de ce paramètre dans des conditions non compatibles avec la température T_0 .

* *Température seuil (ou de végétation) expérimentale (T_0) :*

T_0 correspond à un seuil de température déterminé sur la courbe expérimentale, en dessous duquel le déroulement des processus biologiques est supposé comme nul, bien qu'en réalité ces processus restent encore actifs pour des températures beaucoup plus basses. La figure 11 montre que le seuil T_0 , fixé par la droite passant par un maximum de points expérimentaux et coupant l'axe des abscisses à cette valeur, est de l'ordre de 4 °C pour le lin,

de 8 °C pour le maïs et de 1°C pour le blé. Nous considérons ces valeurs comme la référence pour le reste des analyses suivantes.

*** Température moyenne (Tmoy) :**

Tmoy traduit les potentialités moyennes des températures pour un climat de production donné. Elle se déduit statistiquement. L'analyse des données climatiques des quelques sites de production méditerranéen (c'est le cas de notre site expérimental de la Mitidja, en Algérie) montre que cette température peut valoir 13 à 15 °C pour les cultures d'hiver comme le blé et le lin respectivement mais peut atteindre jusqu' à 18 °C environ et plus pour les cultures dites à jour long (cultures d'été le plus souvent), telle que le maïs.

*** Température finale (Tf) :**

C'est la température pour laquelle les principaux processus biologiques de la plante se trouvent inhibés le plus souvent (température d'échaudage par exemple). Elle est déduite directement des courbes d'action de la température donnée par la figure 11. La valeur de cette température vaut alors 37 °C pour le lin et 42 °C pour le maïs. En raison de manque d'information sur la courbe de germination du blé, nous avons fixé Tf à environ 33 °C, telle que reportée dans la bibliographie.

*** Température optimale (Topt):**

Cette température est définie par le paramètre Xopt qui traduit la position de la température optimale par rapport à Tf, comptée à partir de la température minimale réelle Tmin (valeur inférieure de quelques degrés par rapport à To). Pour la plupart des cultures agronomiques, Xopt vaut environ 80% de la valeur de Tf-Tmin et sera prise comme valeur de référence pour le reste de ce travail.

Le poids de chacun de ces paramètres sur le modèle sera discuté dans la partie sensibilisation. Le tableau 1 suivant résume pour chaque culture les quatre valeurs des températures prises en compte dans cette étude de sensibilité du modèle de vitesses de développement

Tableau 1 : Valeurs des quatre paramètres de températures utilisées comme paramètres d'entrée de références pour l'étude de sensibilité du modèle en fonction des températures

	To (en °C)	Tmoy (en °C)	Tf (en °C)	Xopt (en % de Tf)
Lin	4	15	37	0,8
Maïs	8	18	42	0,8
Blé	1	13	33	0,8

2- Sensibilité du modèle

La sensibilité du modèle est testée autour de quatre valeurs réelles. Trois sont déduites directement des courbes expérimentales de vitesses de développement en fonction des températures (T_f , T_o et T_{opt} à travers son X_{opt}) alors que la quatrième représente la moyenne des températures du lieu de production de ces courbes, soit T_{moy} . Ces quatre valeurs (tableau 1) représentent donc les références autour desquelles la sensibilité du modèle sera évaluée. Deux intervalles, maximum et minimum, sont alors utilisés pour faire varier ces quatre paramètres autour de leurs valeurs références ($T_f \pm 3, T_o \pm 2, T_{moy} \pm 3$ et $X_{opt} \pm 0,02$). Ces intervalles correspondent à des valeurs maximales d'erreurs éventuelles possibles sur chacun de ces paramètres.

En remplaçant à chaque fois une des quatre valeurs références par son minima puis par son maxima, telle que définie par les intervalles donnés dans le tableau 2 (le reste des autres valeurs références étant fixes), on obtient huit courbes de vitesses de développement en fonction de la température par culture analysée, en plus de celle établie avec les valeurs références. Ces courbes de simulations ainsi obtenues sont alors confrontées aux points expérimentaux (plus de détails par culture et par paramètre sont donnés en annexe II.3, figure 11 pour le lin, le maïs et le blé) et les principaux résultats obtenus sont résumés dans le tableau 2.

L'analyse de ces résultats montre que le modèle reste peu, voir pas du tout, sensible aux variations de T_0 , T_{moy} . Ces dernières, liées uniquement à la phase croissante de la courbe des vitesses de développement n'influencent que cette partie de la courbe, soit la partie exponentielle pour ce qui est de T_0 et la partie linéaire pour ce qui est de T_{moy} . Ce qui montre que notre loi est bonne et assez générale. Ce n'est pas le cas de Tf qui demeure le paramètre auquel le modèle de loi de vitesse de développement est le plus sensible du fait de sa relation directe avec X_{opt} qui varie donc en même temps avec Tf. L'allure des courbes résultantes montre qu'une surestimation de Tf, conduit à une surestimation de la température optimale X_{opt} et par là à des vitesses de développement moindres ; ce qui peut allonger substantiellement la durée du cycle de développement lorsque ces vitesses journalières sont cumulées, durant la phase sénescence particulièrement, comme c'est le cas dans notre climat où l'on note des valeurs souvent supérieures à T_{moy} climatique durant cette phase (pour les céréales du moins). Une sous-estimation de Tf conduit en revanche à l'inverse de ce processus.

Tableau 2 : Sensibilité de la loi d'action de la température à la variation des principaux paramètres du modèle de développement.

		Température référence	Tf		To		Tmoy		XM	
			Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Lin	Valeurs	To=4 Tf=37 Tmoy=15 XM=0,8	34	40	2	6	12	18	0,78	0,82
	régression (Coef R ²)	0,98	0,78	0,88	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
	Pente	1	0,99	0,91	0,94	1,04	1,02	0,98	1,02	0,97
Maïs	Valeurs	To=8 Tf=42 Tmoy=18 XM=0,8	39	45	6	10	15	21	0,78	0,82
	régression (Coef R ²)	0,97	0,73	0,60	0,96	0,97	0,97	0,97	0,98	0,93
	Pente	1,01	1	0,69	0,97	1,06	1,03	1	1,02	1
Blé	Valeurs	To=1 Tf=33 Tmoy=13 XM=0,8	30	36	-1	3	10	16	0,78	0,82
	régression (Coef R ²)	0,93	0,94	0,91	0,93	0,92	0,92	0,93	0,94	0,90
	Pente	0,97	0,98	0,89	0,89	1,04	0,99	0,94	0,99	0,93

La confrontation des résultats simulés et mesurés (voir Coefficient de corrélation R2 dans tableau 2) confirme cette perte de précision, du moins pour une variation de Tf de ± 3 °C. Pour augmenter la précision autour des valeurs voisines de T_{opt} et au-delà (partie décroissante de la courbe de vitesse de développement), il convient d'inverser la relation liant

Topt à Tf et de fixer plutôt Tf en fonction de Topt ; l'essentiel de la perte de précision se retrouve donc limité au voisinage de Tf qui est une valeur exceptionnelle et très rarement atteinte). Option récemment prise en compte dans notre modèle.

II.2.2. Modélisation de la vitesse de croissance

II.2.2.1. Généralités

Au sein d'un stade de développement, la croissance en dimension (surface foliaire, hauteur, profondeur racinaire,...) est, comme nous l'avons vu, dépendante du développement et donc du temps physiologique, A(t). La croissance s'exprime classiquement en écrivant que l'expression de la vitesse de croissance (Vc) en fonction du temps physiologique est le produit de deux facteurs antagonistes, l'un accroissant la vitesse et l'autre freinant cette même vitesse, soit :

$$[dy / dA(t)] = [k_1 \cdot y] \cdot [k_2 (y_M - y)]$$

où le premier facteur qui est la fonction active est proportionnel (coefficient k_1) à l'état de la croissance, y (il représente le potentiel de croissance), et le deuxième facteur qui représente la fonction antagoniste est proportionnel (coefficient k_2) au potentiel de croissance restant à atteindre, $y_M - y$ (différence entre, y_M , la valeur potentielle maximale de la croissance, et y l'état de croissance). Cette expression de la vitesse de croissance peut aussi bien exprimer des fonctions antagonistes de type biotique, soit inhérentes à la plante (essentiellement génétiques) soit relatives au milieu et à ses contraintes biotiques et abiotiques (Deschamps., 1902 ; Buis et Lück, 2006).

1- La croissance cumulée

Cette expression de la vitesse de croissance conduit par intégration à la croissance cumulée au cours du temps physiologique, y qui correspond à une fonction logistique fondée sur cette même valeur limite y (Buis., 1993), comme c'est le cas de nombreuses autres fonctions de croissance utilisées (Gomperz, Weebull, Tessier Monod, etc...) :

$$y_j = y_M \frac{\frac{y_0}{(y_M - y_0)} e^{k_s \cdot y_M \cdot A_{Max} \sum_0^j V_D(t)}}{1 + \frac{y_0}{(y_M - y_0)} e^{k_s \cdot y_M \cdot A_{Max} \sum_0^j V_D(t)}}$$

[Relation 2]

$$y_j = y_M \frac{\frac{y_{j-1}}{(y_M - y_{j-1})} e^{k_s \cdot y_M \cdot A_{Max} V_D(j)}}{1 + \frac{y_{j-1}}{(y_M - y_{j-1})} e^{k_s \cdot y_M \cdot A_{Max} V_D(j)}}$$

[Relation 2bis]

Dans ces expressions, $A(t) = A_{max} \cdot \sum_0^t V_D$ est la variable temps (temps physiologique compté en °Cj), y_0 est l'état initial de croissance, y_M est le potentiel maximum de croissance et k_s est un paramètre (compté en $m^{-1} \cdot °Cj^{-1}$) défini par :

$$k_s = k_1 \cdot k_2 = k_0 \cdot \lambda_s \quad \text{[Relation 3]}$$

Où k_0 exprime les fonctions antagonistes de type biotique interne (dépendant principalement de la génétique) et λ_s les fonctions antagonistes liées principalement au milieu mais sous la dépendance de la sensibilité aux contraintes (type de plante et sa génétique). Si les fonctions antagonistes ou agonistes liées au milieu sont nulles, la croissance est potentielle donc :

$$k_s = k_0 \quad \text{avec} \quad \lambda_s = 1$$

Si les fonctions antagonistes liées au milieu sont présentes, λ_S traduit leurs effets et dans ce cas on observe des valeurs inférieures à 1 ($\lambda_S < 1$). Au contraire, s'il y a des fonctions agonistes dominantes liées au milieu, les valeurs de λ_S sont supérieures à 1 ($\lambda_S > 1$).

La première expression permet de représenter l'évolution au cours du temps physiologique de la croissance cumulée jusqu'au jour j , à partir de la valeur initiale, y_0 au temps ($t = 0$) ; la seconde expression représente aussi l'état de la croissance au jour j , selon la même logistique (en prenant pour valeur initiale la valeur du jour ($j-1$)). Cette dernière est la relation utilisée par le modèle « Bilhyna » pour analyser jour après jour la croissance ou la sénescence des phases du cycle cultural d'une végétation.

De plus, il est important de remarquer que dans la logistique la valeur potentielle finale y_M n'est atteinte que pour un temps infini, alors que le plein développement est fini au bout de A_{max} . Aussi la logistique étant symétrique par rapport au point milieu $y_M/2$, on supposera par hypothèse que tout plein développement se produira pour une vraie valeur ($y_M - y_0$) pour respecter la symétrie. Ces deux valeurs ($y_0, y_M - y_0$) définissent alors la valeur de k_0 , donnée par l'expression suivante :

$$k_0 = 2 \cdot \lambda_S \cdot LN[(y_M - y_0) / y_0] / (y_M \cdot A_{max}) \quad \text{[Relation 4]}$$

(Avec $\lambda_S = 1$ en l'absence de contraintes biotiques ou abiotiques du milieu.

Les données d'entrée définissent donc par elles-mêmes la valeur potentielle de k_0 . La courbe de croissance comme toute logistique présente un point d'inflexion au point milieu ($y_M/2$) et la pente (vitesse de croissance) en ce point a pour valeur k_S .

2- Application de la logistique aux grandeurs (LAI, Z_h , Z_R)

Il a été rappelé que les trois grandeurs les plus utiles pour gérer les bilans énergétique et hydrique à chaque instant étaient l'indice de surface foliaire (LAI en $m^2 m^{-2}$), l'évolution de la hauteur de la culture (Z_h en m) et la profondeur d'enracinement (Z_R).

- **Pour la surface foliaire (LAI)**, les quatre phases de développement sont prises en compte. Notons que la première phase est essentiellement utile pour déterminer sa durée qui est le plus souvent inconnue ; l'évolution du LAI durant cette première phase est faible passant de la valeur zéro à celle connue au début de la seconde phase (LAI_0). Mais cette évolution n'a pratiquement pas d'incidence sur les bilans (valeur nulle au début et ensuite très petite).

- **Pour la hauteur de la culture (Z_h)**, seules les trois premières phases interviennent. En effet, pour la première phase comme pour le LAI on a peu d'évolution (valeur allant de zéro à Z_{h0}). C'est pendant la deuxième phase que la hauteur évolue rapidement pour se plafonner à sa valeur maximale en fin de la troisième phase.. La quatrième phase, celle de la sénescence ne joue pas sur la hauteur qui garde une valeur constante, sauf accident, jusqu'à la récolte.

- **Enfin pour la profondeur d'enracinement (Z_r)**, on constate une croissance tout au long de la première phase ; la profondeur croît de la profondeur de semis à une valeur (Z_{R0}) connue également assez faible, mais non négligeable. C'est pendant la seconde phase principalement que croît aussi la profondeur d'enracinement ; cette croissance se poursuit faiblement pendant la troisième phase, puis s'arrête pendant la dernière phase.

Chacune de ces grandeurs ayant ses propres valeurs initiales et finales induit le calcul d'une valeur spécifique de k_S et par conséquent de sa valeur potentielle, k_0 et de λ_S .

3- Illustration : cas de l'évolution du LAI et Zh

Si l'on reprend l'exemple théorique des deux années 75 et 76 (*Figure 10*), la croissance potentielle dans le temps (compté en jour) déduite de la logistique de croissance en fonction des vitesses de développement journalières imposées par les températures physiologiques est donnée par la figure suivante (*Figure 12a*). La croissance du LAI est retardée durant l'année 75 sous l'effet des basses températures ayant caractérisé le début de la phase de développement foliaire. Retard rapidement compensé par les températures printanières conduisant en fin de course à un LAI maximum presque identique au même moment, pour les deux années (à un ou deux jours près).

La seconde illustration (*Figure 12b*) montre une toute autre évolution de la croissance du LAI du blé (phase de développement foliaire de la mi-décembre au début mars) en conditions potentielles de croissance, pour une région du nord de l'Algérie (plaine de la Mitidja) où les fluctuations interannuelles des températures peuvent être plus prononcées qu'à Versailles et très différentes d'une année à l'autre. Le plein accomplissement de la phase de développement foliaire, fixé pour une durée en températures physiologiques à 850°Cj pour l'ensemble de la phase, est atteint plus tôt pour l'année 1994 (températures plus chaudes), avec une avance de 10 jours au moins sur l'année 1992 (températures plus basses). Tous suivis techniques reposant sur un calendrier journalier fixant ces interventions conduit forcément à un décalage de ces derniers par rapport au calendrier physiologique du couvert (40 jours après le semis, le LAI atteint en 1992 la valeur de 4.2, contre 2.7 seulement pour l'année 1992 pour le même nombre de jours après semis). Les besoins de la culture, en eau, en fertilisation et en interventions phytosanitaires, pour ne citer que ces trois exemples seraient dans ces conditions (40 jours après le semis) totalement différents. D'où l'intérêt de prendre comme repère de développement cette durée de températures physiologiques (ou temps physiologique) pour simuler les événements caractéristiques du développement-croissance. Evolution des événements qui a toute son importance lors des études d'analyse des bilans d'eau à long terme, particulièrement dans notre contexte régional méditerranéen où les effets des changements climatiques sont les plus visibles et les plus marqués sur l'évolution des couverts végétaux (élévation des températures entre autres).

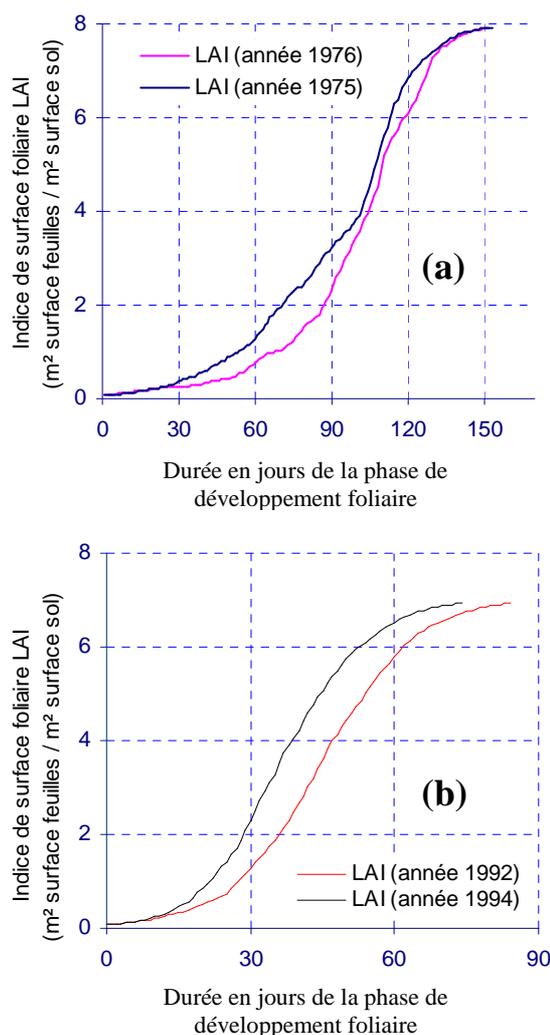


Figure 12. Evolution dans le temps (compté en jour) de la croissance de LAI (phase de développement foliaire) selon la logistique de croissance (relation 2bis) en fonction des vitesses de développement imposées par les températures physiologiques journalières : **(a)** établie sur Versailles pour les années 1975 et 1976 et **(b)** établie sur Alger pour les années 1992 et 1994 (en conditions potentielles pour les deux sites)

II.2.2.2. Élaboration de la solution proposée pour le cycle de végétation : croissance (trois phases) et sénescence (une phase)

Ce cycle de végétation est généralement connu par sa durée en temps physiologique, soit une valeur D en °C.j, qui couvre le temps vrai du semis à la fin de la sénescence. Pour la plupart des cultures on admet que le temps physiologique des deux premières phases (phase installation et phase développement végétatif ou foliaire) est voisin de celui des deux dernières phases (phase reproduction (plateau) et sénescence), soit environ $D/2$ compté en °C.j (Figure 5, paragraphe II.1.1). Aussi c'est cette demi-valeur, nommée A (en degré jour), qui est le plus souvent connue. C'est la valeur la plus importante du cycle total de développement d'une culture et la plus facile à obtenir (elle va du semis à la fin du développement végétatif ou foliaire d'une culture).

1- Phase d'installation

Pour cette phase très dépendante de facteurs physiologiques qualitatifs plus que quantitatifs, il est important de connaître la durée A_{inst} de cette phase. Pour calculer cette valeur, on va déterminer virtuellement à partir d'une courbe de croissance la durée nécessaire pour que la croissance de la plantule (de taille initiale correspondant à la taille de la graine, environ σy_0) atteigne une valeur :

$$Z_{inst.} = Z_{semis} + Zh_0$$

Où Z_{semis} est la profondeur du lit de semence et Zh_0 la hauteur de la plantule à la fin de cette phase d'installation (logistique interrompue quand Z_{inst} est atteint). Le paramètre σ est un coefficient inférieur à 1 qui permet de tenir compte d'une phase de tallage qui allonge la durée de croissance car elle est le siège de modifications physiologiques nécessaires à l'émission de bourgeons latéraux et à leurs développements.

La logistique utilisée pour ce calcul est définie par une valeur initiale y_0 , par une valeur finale Zh_M (hauteur maximum du couvert végétal), par une durée du temps physiologique égale à A et par le coefficient k_S , pour une situation potentielle ($\lambda_S = 1$). Le temps physiologique de la phase installation (A_{inst}) est donc défini par:

$$A_{inst.} = \frac{1}{[Zh_M \cdot k_0(z)]} LN \left[\frac{Z_{inst.} \cdot (Zh_M - (y_0 \cdot \sigma))}{(y_0 \cdot \sigma) \cdot (Zh_M - (Z_{inst.}))} \right]$$

Au cours de ce stade de développement, on peut calculer le temps physiologique correspondant à la levée (apparition de la plante à la surface du sol). Ce temps $A_{levée}$ est déterminé par la même expression en mettant $Zh_0=0$.

Ainsi, durant cette phase, les grandeurs LAI et Zh restent nulles jusqu'à $A_{levée}$, puis croissent linéairement jusqu'à la valeur de début de la phase suivante (LAI_0 et Zh_0) atteinte au bout du temps physiologique, A_{inst} . Dans le même temps, la profondeur racinaire, Zr , du système plante croît de la profondeur de semis à ($Zr_0 = Z_{inst.} + Z_{semis}$) ce qui généralement n'est pas très différent de la première couche de sol.

Par ailleurs, la durée de cette phase de développement reste souvent modulable en fonction des travaux culturaux, en particulier la profondeur du semis. Dans les régions du sud de la méditerranée, zones semis-arides particulièrement, la profondeur de semis du blé préconisée pour assurer le maintien de la croissance de la jeune plantule jusqu'aux prochaines pluies qui peuvent faire défaut durant plusieurs semaines dans ces régions est de 8 cm pour une humidité du sol voisine de 50% de la capacité au champ (Boubaker et al., 1999); ce qui prolonge, dans ces conditions, la durée de la levée du blé comparée à la profondeur de

semis standard (2 à 3 cm). La relation donnant A_{inst} prend donc en compte cet allongement de la phase semis-installation à travers la valeur de la profondeur imposée au modèle, comme le montre la figure 13

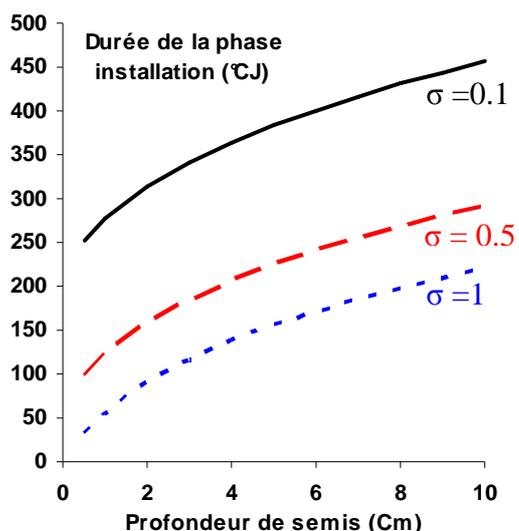


Figure 13. Durée physiologique de la phase installation modélisée par Bilhyna en fonction de la profondeur de semis (Z_{semis}) et du coefficient de tallage ($\sigma = 1$ pour la levée ; $\sigma = 0.5$ pour début à mi-tallage et $\sigma = 0.01$ pour plein tallage).

Dans tous les cas, les valeurs obtenues durant cette première phase n'ont pas beaucoup d'impact sur les échanges et seul, le temps physiologique, $A_{inst.}$, joue directement pour modifier la durée du stade suivant, le limitant à une durée de $A_{Dévp} = (A - A_{inst.})$.

2- Phase de développement végétatif (ou foliaire)

La figure 14 illustre l'évolution mesurée des trois paramètres de croissance du couvert (Indice de surface foliaire LAI, Hauteur du couvert Z_h et Profondeur des racines Z_r) durant la phase de développement végétatif, tiré de la bibliographie (donnée en jour et parfois en somme de degrés jour).

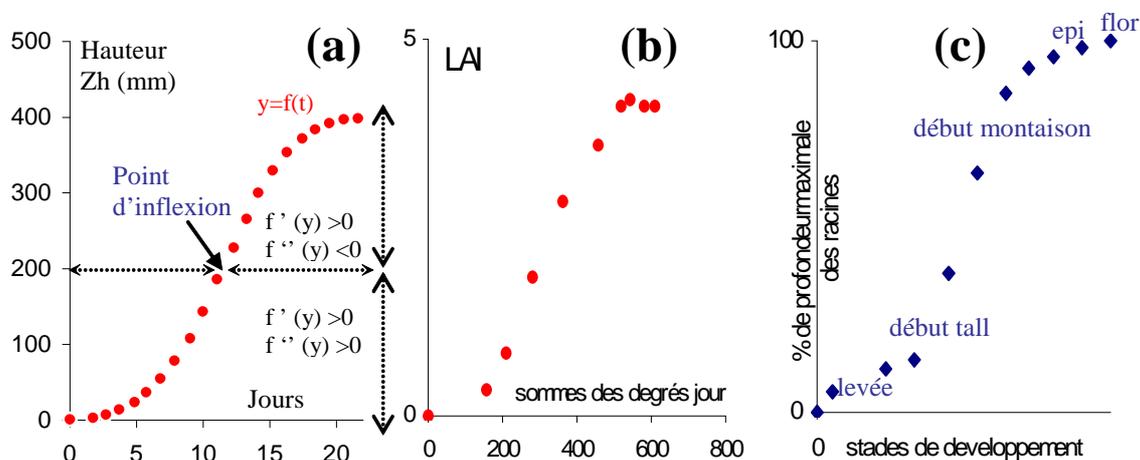


Figure 14 : Evolution au cours d'une phase de croissance de : **(a)** la hauteur cumulée d'un article d'*Hevea brasiliensis*, d'après Halle et Martin 1968 (cité par Lioret, 1974), **(b)** du LAI du Maïs d'après Racquel (1995) et **(c)** % du total de la profondeur racinaire du blé d'après ITCF (2002)

Pour cette phase primordiale qui induit de grands changements des grandeurs de croissance, la logistique utilisée sera définie pour chacune des grandeurs suivies, par :

- Les valeurs initiales sont les valeurs finales de la phase d'installation, LAI_0 , Z_{h0} et Z_{r0} .

- Les valeurs maximum données sont LAI_M pour l'indice foliaire, Zh_M pour la hauteur du couvert et Zr_M pour la profondeur racinaire qui, éventuellement, peut être limitée à la profondeur du sol utile.
- La durée de cette phase est donc A_{Dévp} = (A - A_{inst}).
- Les valeurs de k_s, sont déterminées pour chaque grandeur à partir des relations (3) et (4) établies plus haut (paragraphe II.2.2.1.i).

3- Phase de palier ou de reproduction (début reproduction à début maturation)

C'est une phase de développement physiologique interne, importante pour la formation des graines et des fruits, correspondant à une faible croissance. Sa durée est bien fixée pour chaque espèce et assez bien déterminée. Cette durée se caractérise par une fraction, a, de la demi-période restante de temps physiologique, A (=D/2) (voir paragraphe II.1.1, *Figure 5*) ; cette durée (a.A) sera la même pour les trois grandeurs de croissance (LAI, Zh, Zr). En fait, il a été choisi de poursuivre chacune des logistiques de croissance de la phase précédente à partir des valeurs atteintes ([LAI_M] ou [Zh_M] ou encore [Zr_M]) pendant le temps physiologique de la phase, soit de A à (A+ a.A). Ce qui donne les valeurs finales de croissance en fin de la phase (fin du plateau) nommées LAI_f, Zh_f, Zr_f.

4- Phase de sénescence

Cette phase très importante n'intervient que pour la surface foliaire. Cette sénescence suit le même type de logistique que la phase de développement foliaire mais avec un signe opposé dans l'expression exponentielle et les rapports de l'expression (y_{initial}/y_{final}) étant à changer selon les nouvelles données. Cette logistique est donnée par l'expression:

$$y_j = y_M \frac{\frac{y_f}{(y_M - y_f)} e^{-k_s \cdot y_M \cdot A_{Max} \sum_0^j V_D(t)}}{1 + \frac{y_f}{(y_M - y_f)} e^{-k_s \cdot y_M \cdot A_{Max} \sum_0^j V_D(t)}}$$

[Relation 5]

$$y_j = y_M \frac{\frac{y_{j-1}}{(y_M - y_{j-1})} e^{-k_s \cdot y_M \cdot A_{Max} V_D(j)}}{1 + \frac{y_{j-1}}{(y_M - y_{j-1})} e^{-k_s \cdot y_M \cdot A_{Max} V_D(j)}}$$

[Relation 5bis]

Elle est définie comme précédemment, par :

- une valeur initiale qui est la valeur finale LAI_f ou y_f obtenue à la phase précédente (palier) pour la relation (5) ou celle du jour d'avant, soit celle de (j-1), pour la relation (5bis) ;
- une valeur finale très faible, égale à (y_M - y_f) ;
- une durée de phase égale au temps physiologique restant A_{sénes} = (1-a).A

Le coefficient k_s de la logistique, donné comme précédemment par la relation (3) et (4) au paragraphe II.2.2.1.(i), reste valable pour les deux relations (5 et 5bis).

II.2.2.3. Illustration de l'évolution du LAI sur le blé d'hiver (les quatre phases) en l'absence de contrainte due au milieu (exemple de l'année 1993 dans la Mitidja)

L'exemple ci-dessous (*Figure 15*) illustre l'évolution dans le temps du LAI du blé (compté en jours de décembre 1992 à mai 1993) en fonction des températures physiologiques de la culture établie pour la région de la plaine de la Mitidja (Nord de l'Algérie) et en conditions potentielles de croissance (absence de toute contrainte due au milieu). Chaque phase de croissance du LAI est caractérisée par ses propres données d'entrées, liées notamment à sa durée physiologique (A_{Dévp}) et aux valeurs initiales et maxima du LAI. Bien que le

traitement de ces phases se fasse de manière découplée, elles restent tout de même reliées entre elles par la synchronisation de leurs évolutions qui se déroule à l'intérieur d'un même cycle de développement total du couvert. Il en est de même pour la croissance en hauteur du couvert Zh et en profondeur des racines dans le sol qui suivent la même logique d'évolution entre leurs valeurs propres initiales et maximales pour ce qui est des trois premières phases de développement (la quatrième phase, sénescence, ne concerne que le LAI).

On s'aperçoit pour cette année que l'accomplissement de la première moitié du cycle total du développement du blé (phase installation et développement foliaire) a nécessité près de 95 jours (températures hivernales fraîches) contre 82 jours seulement pour la seconde moitié du cycle total (phases plateau et sénescence). La prise en compte journalière du temps physiologique dans la logistique de croissance (durée physiologique définie dans notre solution, paragraphe II.2.1) au lieu du temps vrai journalier a permis une meilleure interprétation des processus de croissance du LAI tout au long du processus (du cycle) de développement du couvert. Nous verrons plus loin comment le stress est pris en compte au cours de cette évolution.

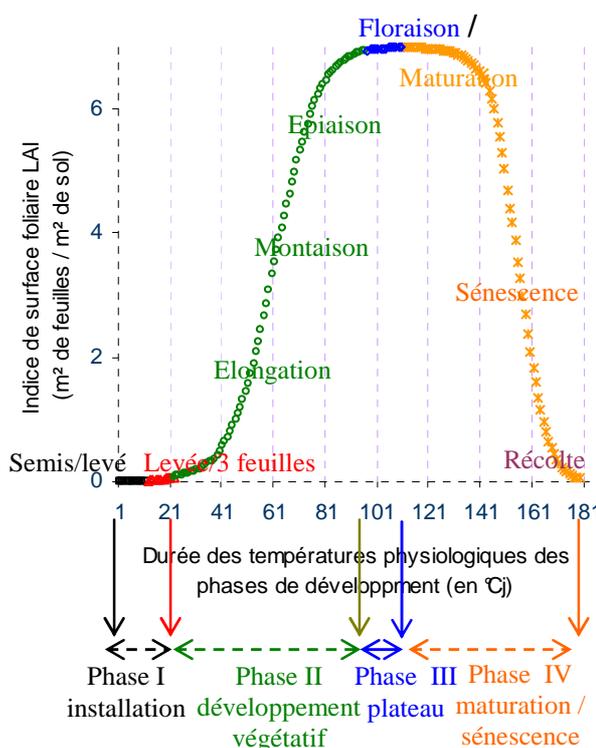


Figure 15. Evolution dans le temps (compté en jour durant l'hiver 93 à Alger) de la croissance du LAI du blé simulée par le modèle biophysique Bilhyna (logistique de croissance en fonction des vitesses de développement imposées par les températures physiologiques journalières), en l'absence de toute contrainte du milieu.

II.3. Stress (contrainte) environnemental et réponse des cultures

II.3.1. Notion de stress ou de contrainte

De concept purement mécanique, la contrainte est définie par les physiciens comme étant une force exercée par unité de surface sur un objet (perpendiculairement ou tangentielle sur cette surface) pour laquelle toute réaction de déformation de ce dernier représente alors la réponse à cette contrainte. En biologie, chez les végétaux en particulier, bien qu'il ne soit pas facile de définir précisément la contrainte ou le stress, de nombreux auteurs lui trouvent une bonne analogie avec cette terminologie employée en physique (J. Levitt, 1972, 1980 ; Turner et Kramer, 1980 ; J. C. Leclerc 1999 et W. Larcher, 2003). Cependant, si le système contrainte-réponse est assez facilement quantifiable en physique, il n'en est pas de même en biologie où différents types de contraintes et de réactions biologiques dépendent des particularités de chaque espèce, chez les végétaux notamment. Aussi, ces différentes réactions aux modifications des conditions optimales de l'environnement, présentent des sensibilités très particulières et assez spécifiques, mais relativement bien définies pour un type donné de contrainte (hydrique, radiative, nutritionnelle, etc...).

Alors que certains auteurs considèrent le stress comme étant une fonction antagoniste ou une influence hostile qui tend à empêcher un système normal de fonctionner, d'autres le définissent plutôt comme une déviation significative des conditions optimales de développement, provoquant ainsi des changements et des réponses au niveau fonctionnel de l'organisme (Larcher, W 2003). Grime (1979) propose donc de considérer une productivité potentielle, génétiquement contrôlable et admise pour une plante à partir de laquelle toute modification induite par une contrainte extérieure serait considérée comme un stress. Même si cette terminologie reste en pratique assez difficile à réaliser en raison de la grande diversité des végétaux et de leurs réactions, elle trouve néanmoins toute sa place dans le domaine agricole où le potentiel génétique de production pour la plupart des espèces cultivées est bien connu (Doorenbos et Kassem, 1979).

Un stress biologique est dit biotique lorsque les facteurs responsables de ces effets se rapportent aux maladies, aux attaques d'insecte, etc... et abiotique lorsqu'ils se rapportent communément aux facteurs physiques comme l'eau, la température, la salinité, la radiation et autres. La réponse de la plante à un stress abiotique dépend à la fois de sa durée (annuelle, saisonnière ou journalière), de son intensité (sévère, modérée ou faible) qui peut varier dans le temps selon l'état de l'installation de la culture. Quelle que soit la stratégie adoptée par les plantes pour y faire face, telles que l'échappement, l'évitement et la tolérance ainsi que l'adaptation et l'acclimatation, elles ne peuvent faire l'économie de certaines variations et modifications à la fois physiologiques et structurelles, conduisant inévitablement à une baisse de leurs productivités. Le stress coûte donc cher pour les végétaux, les espèces cultivées particulièrement, dans la mesure où celles-ci sont sélectionnées pour leurs productivités maximales en conditions normales et non limitantes.

II.3.2. Facteurs de stress et fonctions de contraintes à la croissance dues au milieu

L'intérêt porté à la production de la biomasse végétale récoltable en agriculture, généralement évaluée en terme pondéral ou rendement spécifique est primordial. Quel que soit ce rendement spécifique, sa valeur est toujours fortement liée au développement et à la croissance (surface foliaire en particulier, siège de la production d'éléments carbonés). Cette croissance, dont on vient de voir une certaine modélisation bio-physique, est contrôlée d'abord par des facteurs génétiques d'où la notion de potentiel de croissance modélisé à travers le paramètre k_S (introduit dans la loi de croissance et qui sans contraintes du milieu ($\lambda_S=1$) prend la valeur k_0), Par contre, les facteurs environnementaux contraignants vont moduler la valeur de k_S à travers la fonction de modulation, λ_S , qui comme on l'a vu au paragraphe II.2.2.1), sera définie par une fonction comprise entre 0 et n ($n>1$). Pour des contraintes conduisant à des actions antagonistes à la croissance potentielle on obtient des valeurs réduites de λ_S ($\lambda_S < 1$), mais parfois ces contraintes peuvent conduire à des actions finalement synergiques entre l'effet des contraintes et la croissance de certaines parties de la plante (soit $\lambda_S > 1$). Les contraintes abiotiques rencontrées en agriculture sont celles liées principalement au rayonnement, à l'eau et à l'alimentation minérale, dont en premier lieu l'azote.

Ces facteurs de stress sont alors considérés comme étant des fonctions de réduction des potentialités de croissance, dont l'effet combiné traduit bien la perte globale de la production en question. C'est du moins ce que nous avons retenu de l'ensemble des travaux ayant abordé la production en conditions de stress abiotique, où chaque facteur est considéré comme une fonction de réduction indépendante (f_X), variant entre 0 et 1 (sans unité), mais dont le produit de ces fonctions, F, représente la fonction globale de réduction des potentialités de croissance (soit de la production finale), suite à ces différents effets (Delécolle et Guérif., 1986).

Nous nous proposons dans ce qui suit d'étudier la forme de deux fonctions de contraintes à la croissance (ou à la production) dues aux deux principaux facteurs de stress du milieu les plus importants pour les cultures et les plus répandus dans le monde agricole : la lumière et l'eau. Ces deux facteurs sont sous la dépendance du climat, le facteur hydrique est en particulier très important, car grâce à lui, il est possible de gérer au mieux les besoins en eau dans le cadre de variabilités interannuelles, soit normales ou soit évolutives, en fonction du changement climatique. L'alimentation minérale plus facilement maîtrisable, en tout cas pour les agrosystèmes, ne fait donc pas encore l'objet d'une fonction spécifique dans le modèle Bilhyna, surtout que l'objectif actuel du modèle reste la modélisation des bilans d'énergies et de masses et non le calcul de rendements finaux.

Selon les analyses faites ci-dessus et par hypothèse devenue classique, on admettra que la fonction contrainte globale, F , est en fait le produit des fonctions particulières (f_X) prises en compte (F toujours plus petit que 1) :

$$F = f_{PAR} \cdot f_{EAU} \cdot f_X \dots$$

Compte tenu des valeurs de λ_S ($0 < \lambda_S < 1$ ou $1 < \lambda_S < n$), cette fonction s'écrit comme une fonction linéaire de F :

$$\lambda_S = [n - (n - 1) * F] \quad \text{[Relation 6]}$$

$$\text{avec } n = 0 \Rightarrow (\lambda_S < 1) = F \quad \text{et } (F < 1) \quad \text{et } k_S \leq k_0$$

$$\text{avec } n = 1 \Rightarrow (\lambda_S = 1) = F \quad \text{et } (F = 1) \quad \text{et } k_S = k_0$$

$$\text{avec } n > 1 \Rightarrow (\lambda_S > 1) > F \quad \text{et } (F < 1) \quad \text{et } k_S > k_0$$

Le paramètre (n) est un facteur essentiellement biologique, de type génétique, qui traduit la sensibilité de la culture aux contraintes du milieu, qui accroît la synergie entre la contrainte du milieu et le processus biologique ou physiologique en question (croissance ou production dans notre cas) en fonction de sa valeur (pour $n > 1$ bien sûr).

II.3.2.1. Fonction de contrainte due au manque de lumière (f_{PAR})

1- Généralités

L'importance de l'énergie lumineuse dans la vie des plantes n'est plus à souligner, comme le relèvent de nombreux travaux consacrés à son rôle dans la régulation du fonctionnement des plantes vertes (Chartier et Bethenod, 1977 ; Jones, 1983 ; Daudet et Tchamitchian, 1993 ; Gosse et al, 1986) mais aussi et surtout à son rôle significatif dans la croissance et le développement des couverts végétaux (Dang et al, 1997a ; Dang et al, 1997b ; Nilson et Orcutt, 1996 ; Awada et al 2003). Par son intensité et sa qualité, le rayonnement constitue alors la principale source d'énergie pour la photosynthèse, phénomène qui occupe une place essentielle dans le métabolisme des cultures agronomiques et souvent considéré comme le principal moteur de la production de la biomasse et de la productivité des cultures.

Analyser la croissance ou la production d'une culture en fonction du rayonnement revient donc à étudier le plus souvent la relation liant la photosynthèse, soit au rayonnement global R_g , soit au rayonnement visible reçu par le couvert végétal (fraction comprise entre 400 et 700 selon Mc Cree, 1973), dit aussi rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) dont la valeur serait proche de la moitié de R_g pour la plupart des auteurs ($\approx 0.48 \cdot R_g$ pour Varlet-Grancher et al., 1989). Ce dernier terme (PAR) semble présenter une meilleure proportionnalité avec l'intensité photosynthétique (Varlet-Granchier et al, 1982; Gosse et al., 1986.) dont la courbe résultante, déduite d'un couvert pris dans son ensemble, demeure

beaucoup plus linéaire que celle déduite sur une feuille prise isolément. De plus et compte tenu des effets directs de la respiration sur les processus de photosynthèse d'un couvert pris dans son ensemble, qui demeurent toutefois faibles dans la mesure où les feuilles situées en bas du couvert restent en-dessous du point de compensation et finissent toujours par se dessécher et mourir (par manque de rayonnement), le couvert n'atteint jamais la saturation. Ce qui suggère une valeur de rayonnement maximale du PAR, au-delà de laquelle la production (ou la croissance) n'est pas limitée (Acock et al., 1978 ; Jones 1983).

2- Fonction de contrainte proposée (f_{PAR})

Compte tenu de l'ensemble de ces éléments, il convient de considérer que le rôle du rayonnement dans la croissance des couverts se trouve ainsi réduit au seul rayonnement photosynthétiquement actif intercepté au niveau du couvert, PAR_{Int} , et que sa production croît selon une fonction linéaire de ce rayonnement (Figure 16), suivie d'un plateau à partir du $PAR_{max_{Int}}$, valeur au-delà de laquelle la production journalière devient indépendante du rayonnement. Ce dernier terme ($PAR_{max_{Int}}$), nécessaire à notre fonction et facile à obtenir, dépend des différentes réponses des types de plantes, telles que les $C3$ et $C4$ mais varie aussi entre certaines variétés de plantes. Aussi, on aura très simplement une fonction de réduction (f_{PAR}), sans dimension, comprise entre 0 et 1, soit au jour j :

$$f_{PAR} = \frac{PAR_{j_{Int}}}{PAR_{max_{Int}}} \quad [\text{Relation 7}]$$

avec $PAR_{Int} = 0.5 * R_g$ et $0 < f_{PAR} < 1$ pour $PAR_{Int} < PAR_{max_{Int}}$
 $f_{PAR} = 1$ pour $PAR_{Int} \geq PAR_{max_{Int}}$

II.3.2.2.. Fonction de contrainte due au manque d'eau dans le sol (f_{EAU})

1- Généralités

Il est bien évident que dans la plupart des situations, les fonctionnalités de croissance et de production d'une plante soumise à un stress hydrique sont aussitôt revues à la baisse en réaction à cette contrainte. Les réponses restent, toutefois, sensiblement différentes selon l'intensité du stress, sa durée et le moment de son application. La plupart des études montrent que ces réponses sont à mettre en relation, le plus souvent, avec la variation de l'état hydrique de la plante (Meyer et Green, 1980 ; Katerji et Hallaire, 1984 ; Tradieu et al., 1990). Ces variations peuvent être (i) soit rapides si une éventuelle contrainte s'impose sur une période très courte (à l'échelle de quelques heures), comme c'est le cas des travaux conduits dans des laboratoires (l'information obtenue est souvent de type physiologique), (ii) soit progressives si cette contrainte intervient graduellement et dure quelques jours ou quelques semaines (C'est le cas typique des contraintes rencontrées aux champs où la résultante de ces variations les plus visibles imposées par un dessèchement progressif de la réserve en eau du

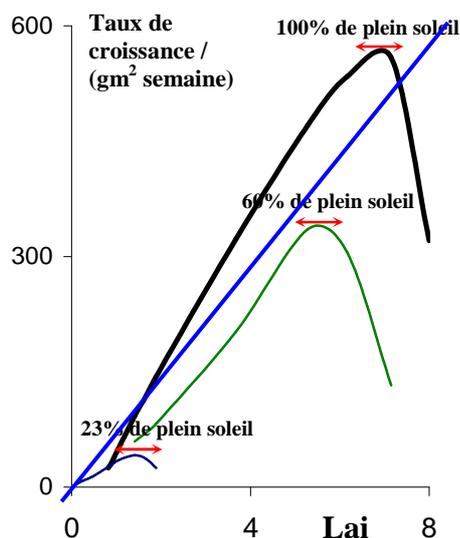


Figure 16. Assimilation foliaire de trois types de plante en fonction du rayonnement d'après Leopold & Kriedemann, 1975 (cite in Salisbury et Ross, 1991)

sol, reste la réduction de la croissance du couvert, considérée alors comme une information purement agronomique, voir hydrologique); C'est bien ce second type de réponse que nous nous proposons d'étudier dans ce travail.

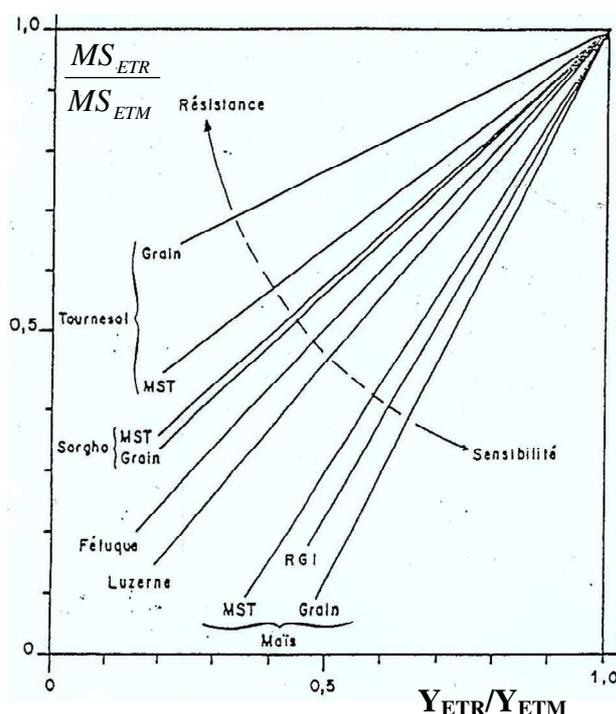


Figure 17. Rapport classique montrant la baisse de production, MS_{ETR}/MS_{ETM} , en fonction de la baisse de la consommation en eau, Y_{ETR}/Y_{ETM} , (Rollier, 1975)

La relation liant la production végétale (surface foliaire, biomasse entre autres) à son état hydrique est représentée par une relation entre son flux évaporatoire (évapotranspiration), régulé certes par les stomates (Jarvis et McNaughton, 1986 ; Comstock, 2002) et en général la disponibilité en eau du sol pour la plante (Tradieu et al., 1990). Cette relation fut établie pour la première fois en 1975 par Robelin et valorisée par la FAO pour la plupart des espèces cultivées (Doorenbos et Kassem, 1979). La figure 17 illustre ce type de représentation caractérisée par une relation classique liant le rapport de la production végétale Y_{ETR}/Y_{ETM} (Y est la production réalisée en conditions d'évapotranspirations journalières, limitantes avec ETR et non limitantes avec ETM) à celui de leurs évapotranspirations correspondantes (ETR/ETM).

Cette représentation reste, cependant, assez grossière dans la mesure où elle lie l'ensemble des réponses physiologiques de la plante, dont la croissance, à son flux évapotranspiratoire. Considération qui reste valable pour une gamme importante de plantes pour lesquelles la régulation de la transpiration intervient à un niveau de contrainte hydrique très voisine de celui pour lequel interviendrait la régulation de la croissance de la plante (Figure 18). Ce qui n'est pas la règle pour un nombre non négligeable d'espèces végétales pour lesquelles la régulation de la croissance intervient avant celle de l'évapotranspiration.

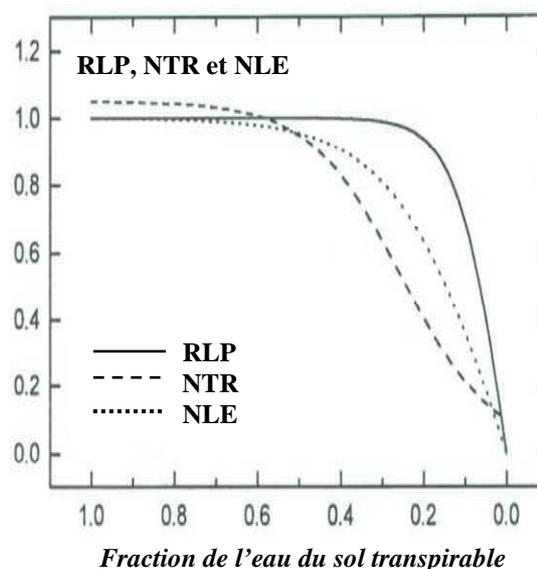


Figure 18. Relation entre l'évolution du couvert (dans cet exemple, le taux d'expansion, NLE, et de production des feuilles, RLP) en fonction de la fraction de l'eau du sol disponible pour la transpiration, d'après Lecoœur & Sinclair, 1996 (l'auteur donne aussi la relation transpiration, NTR, fonction de l'eau du sol disponible).

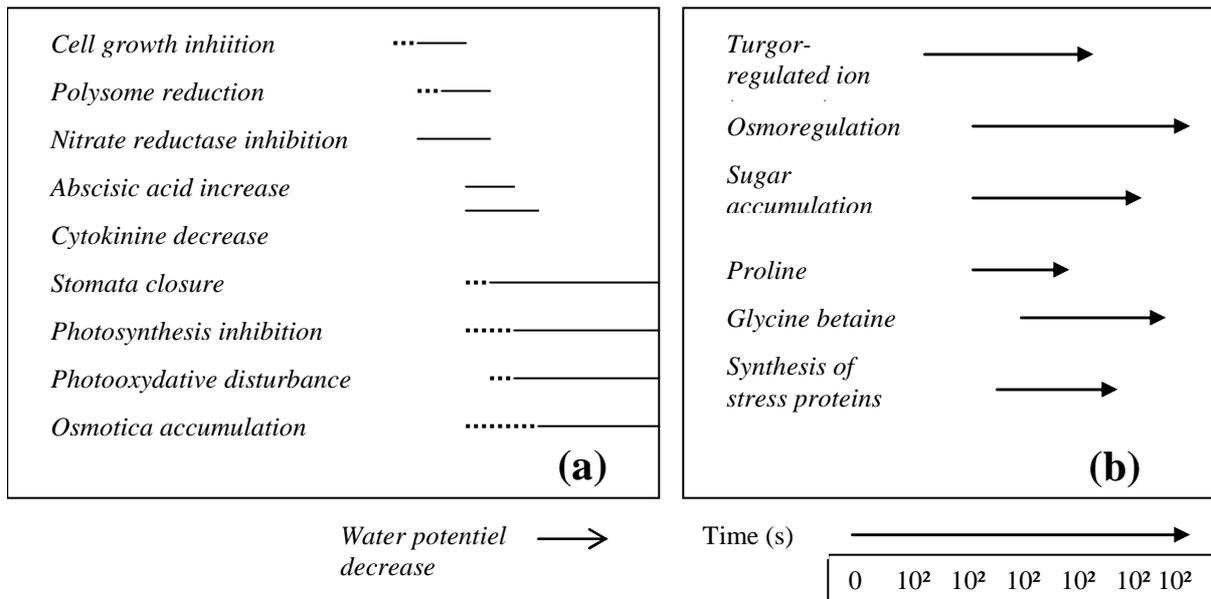


Figure 19 : Réponse des plantes à une limitation en eau progressive : **(a)** sensibilité et réaction des différents processus et fonctionnalités cellulaires à une limitation en eau. **(b)** temps de réaction cellulaire à un déficit hydrique (réponse à la turgescence et réactions moléculaires) (in Larcher 2003)

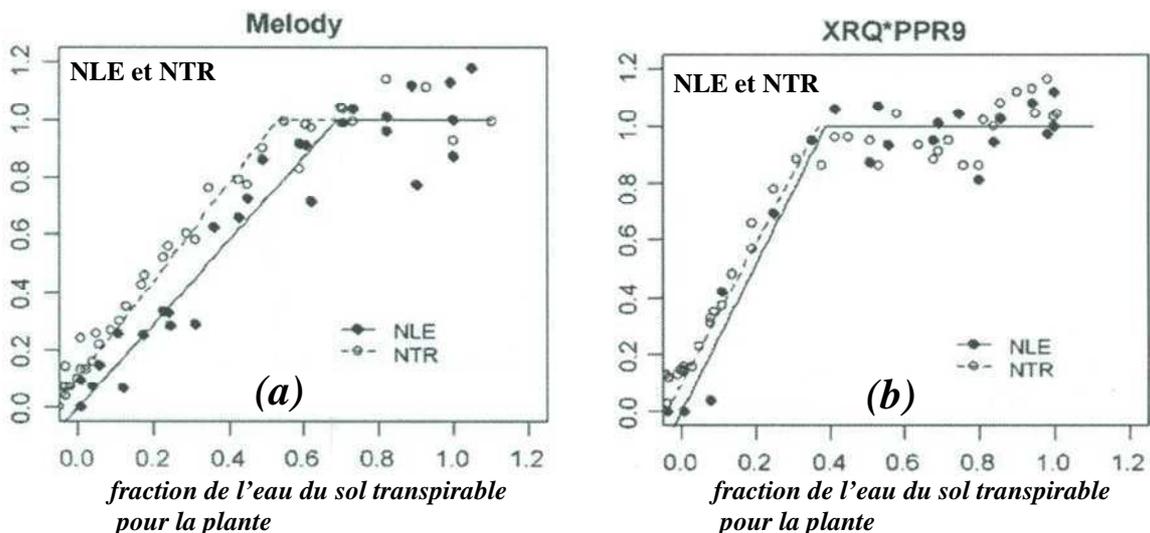


Figure 20. Réponse de l'expansion normalisée des feuilles (NLE) et de la transpiration normalisée de la plante (NTR) pour deux génotypes de tournesol **(a)** Molody et **(b)** XRQ*PPR9), en fonction du dessèchement progressif du sol (Casadebaig et al., 2008)

C'est du moins ce que nous avons retenu de la bibliographie qui décrit, en réponse à un manque d'eau, un certain nombre de modifications physiologiques responsables de la réduction de la croissance, entre autres une perte de la turgescence des cellules de la plante (déshydratation) accompagnée le plus souvent par une réduction de leur taille (Hsiao, 1973 ; Mullet et Whitsitt, 1996 ; Campbell et Reece, 2004 ; Nilsen et Orcutt 1996 ; Lockhart 1965) de même qu'une diminution dans leur multiplication (Lecoeur et al, 1995 ; Tardieu et al, 1999, 2000 ; Alfredo et al, 2004 ; Larcher, 2003), et ce avant même qu'une régulation stomatique ne soit mise en place (figure 19). Situations assez courantes chez de nombreuses espèces, variétés et même chez certains génotypes comme le montrent les figures 20a et 20b.

Il en résulte alors une réduction de la croissance, surface foliaire en premier lieu, qui demeure ainsi l'une des premières manifestations d'un couvert végétal en réponse à un état hydrique non favorable à son fonctionnement (Boyer, 1970 ; Saab et Sharp, 1989 ; Connor et Jones, 1985).

Compte tenu de l'ensemble de ces éléments on aura intérêt à caractériser la réponse des couverts en fonction de la disponibilité en eau au voisinage des racines, comme le proposa Ritchie en 1981, plutôt qu'en fonction de son flux d'évapotranspiration, quels que soient les processus physiologiques mis en jeu (dont la croissance et la production). Notion affinée par Sinclair et Ludlow (1986), qui suggèrent l'utilisation même d'une fraction de réserve en eau du sol disponible pour la transpiration, facilement modélisable à partir d'un modèle de bilan hydrique (Sinclair., 1986). Nombreux sont les travaux qui utilisent aujourd'hui cette représentation pour caractériser, en fonction de l'eau du sol disponible pour la transpiration (*Figure 18 et 20*), la réponse des processus physiques de la plante tels que l'expansion foliaire (Lecoeur et Sinclair., 1996, Sandra et al., 1993; Casadebaig et al., 2008 ; Sinclair., 2005), le nombre d'apparitions de feuilles (Ong et al., 1985 ; Lecoeur et Guilioni., 1998), la transpiration foliaire (Casadebaig et al., 2008 ; Sinclair, 2005), la conductance foliaire (Sandra et al., 1993), la fixation symbiotique de l'azote (Sinclair., 1986), l'indice de récolte (Lecoeur et Sinclair., 2001) et bien d'autres. D'où l'intérêt porté par Bilhyna pour représenter la cinétique de la croissance (ou la production) d'un couvert végétal en fonction de la disponibilité en eau au niveau de ses racines, plutôt qu'en fonction de la transpiration (ou de la régulation stomatique).

2- fonction de contrainte proposée (f_{EAU})

Quels que soient les processus analysés, la réponse à un dessèchement progressif du sol conduit toujours à une diminution de type exponentiel du rapport de croissance réelle sur celui de la croissance maximale, soit Y/Y_M (Lecoeur et Sinclair., 1996, Lecoeur et Guilioni, 1998 ; Li et al., 1990), très caractéristique pour chaque espèce, voir même pour chaque variété (tournesol : Casadebaig et al., 2008 ; l'arachide : Sarr et al., 2004). La concavité de ces courbes est d'autant plus tournée vers le bas que les cultures sont plus sensibles au stress hydrique, alors que pour les moins sensibles, cette concavité est tournée plutôt vers le haut. C'est pourquoi on a cherché à traduire sous forme d'une relation exponentielle, évoluant entre 0 et 1 telle que donnée par la relation 8, comment ce rapport de croissance (Y/Y_M) dépendant d'une contrainte hydrique édaphique évolue en fonction de l'eau disponible dans le sol pour la plante, représenté le plus souvent par le rapport de réserves disponibles sur réserves maximales. Relation pouvant a priori décrire les caractéristiques de tous types de plantes (figure 21), du peu ou pas sensible au stress hydrique (α voisin de 0) au plus ou ultra sensible (α très grand), en fonction des réserves hydriques disponibles pour la plante R_d [$R_d(j) = R_{cr_{max}}$ lors de l'absence de stress et $R_t = R_{min}$ pour un stress infini], soit une fonction de réserves $f_{EAU}(R_d)$ et deux coefficients, l'un principalement fonction de la plante (α) et l'autre du sol (β). On a alors :

$$f_{EAU} = \text{Exp}[-\alpha \cdot \beta \cdot g(R_d(j))] \quad \text{[Relation 8]}$$

$$\beta = \left[\frac{(R_{cc} - R_{min})}{(R_{cr_{max}} - R_{min})} \right] :$$

définit le domaine de la réserve en eau du sol pour lequel la régulation de la croissance végétale n'est pas mise en jeu. C'est une fraction de la réserve totale en eau du sol utile pour la croissance de la plante, soit une réserve comprise entre $R_{cr_{max}}$ et R_{cc}

$$f(R) = \left[\frac{(R_{cr_{max}} - R_i)}{(R_i - R_{min})} \right] :$$

est un terme variable dans le temps. Il renseigne sur l'évolution de la fraction de réserve en eau comprise entre $R_{cr_{max}}$ (réserve en dessous de laquelle la régulation de la croissance est mise en jeu) et R_{min} (réserve en dessous de laquelle la croissance est nulle du fait de la non disponibilité de l'eau du sol pour la plante), compte tenu des prélèvements de la plante imposés par le climat du lieu de l'expérience.

α : est le coefficient de sensibilité (ou de réponse) de la plante à une contrainte hydrique édaphique, déduit expérimentalement de la courbe « contrainte hydrique-production végétale » établie sous conditions pédoclimatiques données. Il traduit la vitesse avec laquelle la plante répond par une réduction de sa croissance en fonction du niveau de la contrainte hydrique évoluant sous des conditions particulières de sol (aptitudes du sol à livrer facilement l'eau à la plante) et de climat (demande climatique imposée). Alpha

vaut alors :

$$\alpha = - \left[\frac{(R_{cr_{max}} - R_{min})}{(R_{cc} - R_{min})} \right] * \left[\frac{(R_i - R_{min})}{(R_{cr_{max}} - R_i)} \right] \cdot LN(f_{EAU})$$

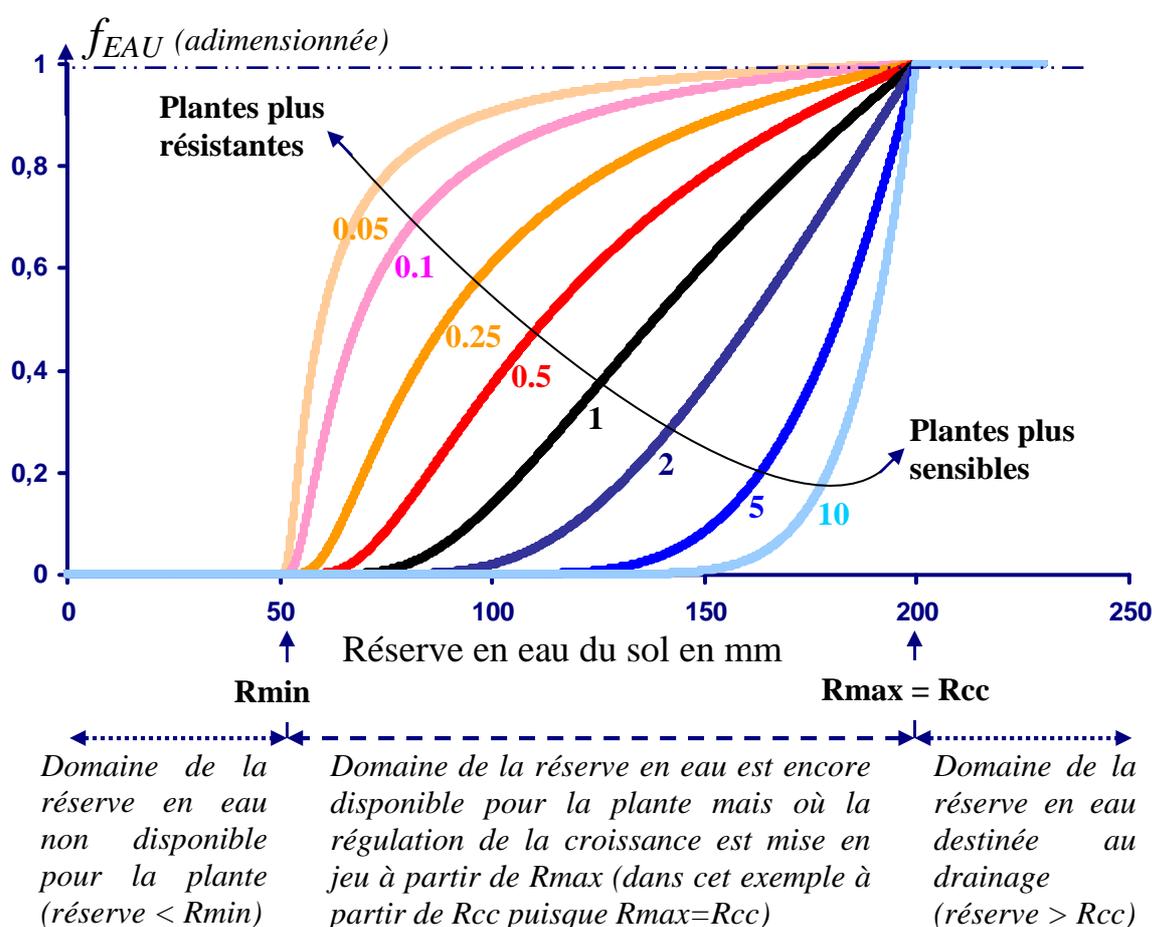


Figure 21. Modélisation de la courbe de réduction de la croissance du couvert en réponse à une contrainte hydrique édaphique (fonction de contrainte hydrique f_{EAU}) et pour une gamme variée de sensibilités possibles des cultures et espèces (α).

Finalement, si R_{cc} , $R_{cr_{max}}$ et R_{min} sont connus pour un sol et pour une culture donnée, il suffit de disposer de quelques points de la courbe f_{EAU} , établie pour un lieu donné, soit quelques rapports de croissance ou de production Y/Y_M (Y_M étant la valeur de la croissance optimale de la culture sans restriction en eau et Y la valeur de la croissance ayant subi une réduction de croissance pour un niveau de stress connu, défini en terme de réserve en eau du sol disponible pour la plante), pour déterminer les valeurs des coefficients de contraintes hydriques (α) de la culture en question, et du

coup de l'ensemble de la courbe de réponse de la croissance aux différents niveaux de disponibilités en eau du sol pour la plante.

Pour plante (α) :

Pour une culture fortement résistante au stress hydrique et donc faiblement sensible au manque d'eau ($\alpha \rightarrow 0$), la croissance est plutôt maximale ($f_{EAU} \rightarrow 1$) même si le niveau de la réserve en eau R_t diminue assez drastiquement. Cependant, le développement-croissance finit toujours par être réduit par le manque d'eau et s'annule totalement ($f_{EAU} \rightarrow 0$) pour une situation de réserve réelle $R_t \geq R_{min}$.

Au contraire, pour une plante très faiblement résistante au stress hydrique et donc fortement sensible au manque d'eau, on a α fort et la fonction de stress hydrique (f_{EAU}) tend rapidement vers 0, la croissance est très vite réduite dès que le niveau de la disponibilité en eau du sol devient en dessous de R_{max} . On observe cependant une croissance maximale autour de $R_{cr_{max}}$.

Pour une même évolution de R_t comprise entre $R_{cr_{max}}$ et R_{min} la fonction f_{EAU} passe, selon α , de 1 à 0.

Pour sol (β) :

Le coefficient β , qui traduit la composante sol (par ses propriétés hydriques définies en termes d'évolution de la disponibilité de son eau) dans notre fonction de croissance (f_{EAU}), est défini par le rapport entre le domaine de la réserve en eau totale disponible pour la plante ($R_{cc} - R_{min}$) et le domaine de la réserve en eau disponible instantanée au jour j pour lequel il y a modulation de la croissance ($R_{cr_{max}} - R_{min}$).

La figure 21 illustre donc la fonction de réduction de la croissance (ou des potentialités de croissance) face à une contrainte hydrique édaphique (relation 8) et le domaine de ses variations selon le paramètre de sensibilité de la plante α , avec une droite pour $\alpha = 1$. On s'aperçoit donc, en comparaison avec la courbe de Robelin (Figure 17), que pour une plante comme le tournesol, pas trop sensible à une contrainte hydrique du sol, α pourrait être ajusté à environ 0,1 à 0,3 alors que pour une culture comme le maïs (assez sensible à la contrainte hydrique) l'estimation de α serait plutôt entre 2 et 5.

La figure 22, quant à elle, montre les domaines de la réserve utile pour la croissance des couverts qui peuvent être très différents d'une plante à une autre selon leurs aptitudes physiologiques à repousser la limite d'un début de contrainte hydrique définie à partir d'une valeur critique $R_{cr_{max}}$. En effet, les plantes ayant de grandes aptitudes à repousser le stress présentent un $R_{cr_{max}}$ assez faible devant R_{cc} (courbe bleue) et par conséquent bénéficient d'un domaine de la réserve en eau du sol où sa disponibilité serait plus importante (carré bleu), contrairement aux plantes qui présentent une $R_{cr_{max}}$ proche de R_{cc} (courbe rouge) et qui subissent une modulation de leur croissance une fois que la réserve en eau du sol passe en dessous de R_{cc} . Situation qui peut être plus ou moins accentuée par ce dernier type de plantes si leurs aptitudes à modérer la croissance en réponse à un stress hydrique sont grandes (coefficient de contrainte hydrique (α) faible, courbe rouge et bleue en trait gras) ou, au contraire, peut aggraver la situation si leurs aptitudes à modérer la croissance sont faibles en réponse à un stress hydrique (coefficient de contrainte hydrique (α) faible, courbe rouge et bleue en trait fin).

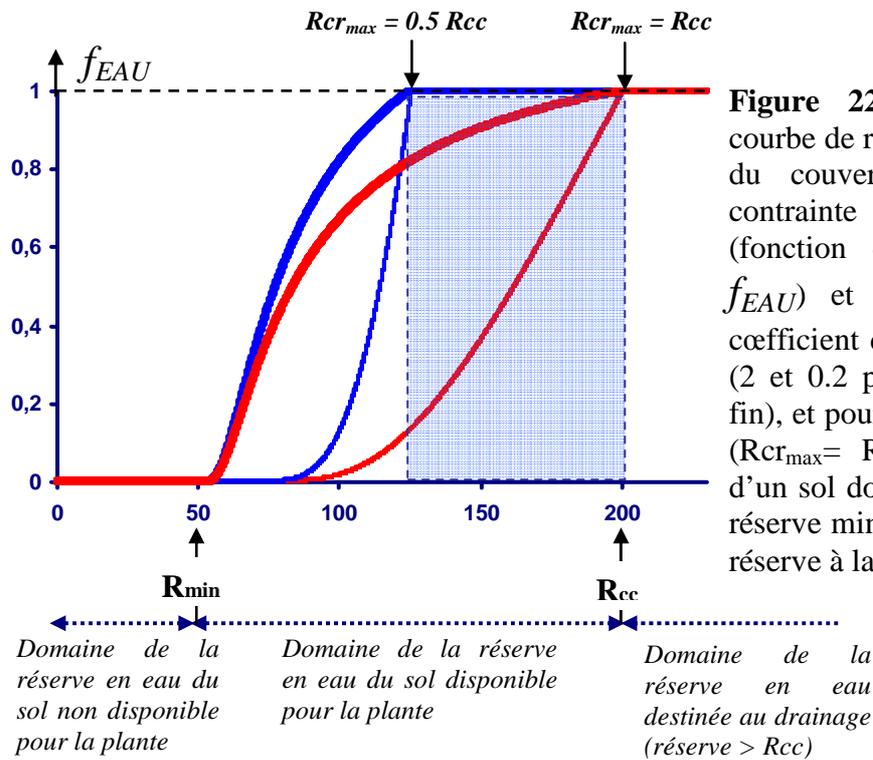


Figure 22. Modélisation de la courbe de réduction de la croissance du couvert en réponse à une contrainte hydrique édaphique (fonction de contrainte hydrique f_{EAU}) et pour deux valeurs de coefficient de contrainte hydrique α (2 et 0.2 pour les courbes en trait fin), et pour deux valeurs de Rcr_{max} , ($Rcr_{max} = R_{cc}$, et $Rcr_{max} = 0.5.R_{cc}$) d'un sol donné défini par une seule réserve minimale, R_{min} , et une seule réserve à la capacité au champ, R_{cc}

La réponse des cultures aux contraintes hydriques est donc prise en compte dans le modèle Bilhyna à travers ces deux principaux critères : (i) le coefficient de contrainte (de sécheresse) hydrique (α) qui définit l'aptitude (ou la sensibilité) d'un couvert à moduler sa croissance (ou sa production finale) en fonction de l'évolution du poids de la contrainte hydrique et (ii) la valeur limite de la réserve Rcr_{max} , à partir de laquelle cette modulation de la croissance intervient. Signalons au passage qu'en l'absence de données sur Rcr_{max} , la réserve maximale définissant le début de la régulation stomatique, R_{max} , est utilisée par défaut. La fonction de contrainte due à l'eau (f_{EAU}), qui demeure toujours valable dans ces conditions, interviendra plus ou moins tardivement en réponse à un stress hydrique, en fonction des caractéristiques physiologiques des plantes considérées (précocité ou retard dans le déclenchement de la régulation stomatique à partir de R_{max} par rapport à Rcr_{max}).

II.3.3 Prise en compte des fonctions de contraintes dans la modulation de la croissance durant le cycle de développement d'un couvert

II.3.3.1 La croissance potentielle (absence de contraintes) de LAI_{vert} , Z_h et Z_r

Nous avons vu au paragraphe II.3.2 que les processus de développement et de croissance du LAI_{vert} , Z_h et de Z_r évoluent de façon synchrone. Ainsi à chaque niveau de développement atteint au jour $(j-1)$, soit un temps physiologique donné ($A(t)$ avec $t = (j-1)$), correspond un niveau de croissance cumulée $y_{(j-1)}$. Si on définit des conditions potentielles constantes pour tout $A(t)$, ($\lambda_S = 1$ soit $k_S = k_0$) on définit une croissance univoque du couple développement-croissance [relation $y_{P(j-1)}$ et $A(t)$] et à chaque instant, bien sûr, un seul niveau de croissance potentielle restant à accomplir pour le reste de la durée de la phase développement [$A_{max} - A(t)$], soit la différence entre la valeur maximum et la valeur actuelle ($y_M - y_{(j-1)}$). La croissance potentielle cumulée au jour j , est alors donnée directement, comme on l'a vu (Relation 2bis, paragraphe II.2.2.1), par l'expression suivante :

$$y_{Pj} = \left[\frac{y_{Pj-1}}{y_M - y_{Pj-1}} e^{-k_0 \cdot y_M \cdot A_{Max} \cdot V_d(j)} \right] \quad [\text{Relation 9}]$$

$$1 + \frac{y_{Pj-1}}{(y_M - y_{Pj-1}) e^{-k_0 \cdot y_M \cdot A_{Max} \cdot V_d(j)}}$$

On a alors l'accroissement de la croissance Δy_P résultant du jour j qui s'écrit:

$$[\Delta y_P]_{j-1}^j = y_{Pj} - y_{P(j-1)} \quad [\text{Relation 10}]$$

En conditions de stress, par contre, la croissance se trouve modulée par la fonction de contrainte (F) à travers la fonction de modulation (λ_S) qui conduit (selon la relation 6) aux deux solutions complémentaires : (i) soit à une réduction de la croissance du LAI_{vert} et de Zh lorsqu'on obtient $k_S < k_0$ (ou $\lambda_S < 1$); (ii) soit à une synergie entre contrainte et croissance des racines en profondeur Zr avant la phase de sénescence ou une accélération de la perte du LAI_{vert} durant la phase de sénescence ($k_S > k_0$ ou $\lambda_S > 1$).

Nous allons voir comment sont prises en compte ces deux formes de modulations (réduction et augmentation ou accélération) lors de l'évolution continue du LAI_{vert}, Zh et Zr d'une part et de la sénescence continue du LAI_{vert} d'autre part, sous l'action variée des contraintes abiotiques.

II.3.3.2 Modulation de la croissance continue de LAI_{vert}, Zh et Zr, sous contraintes du milieu

1- Réduction de la croissance pour le LAI_{vert} et Zh

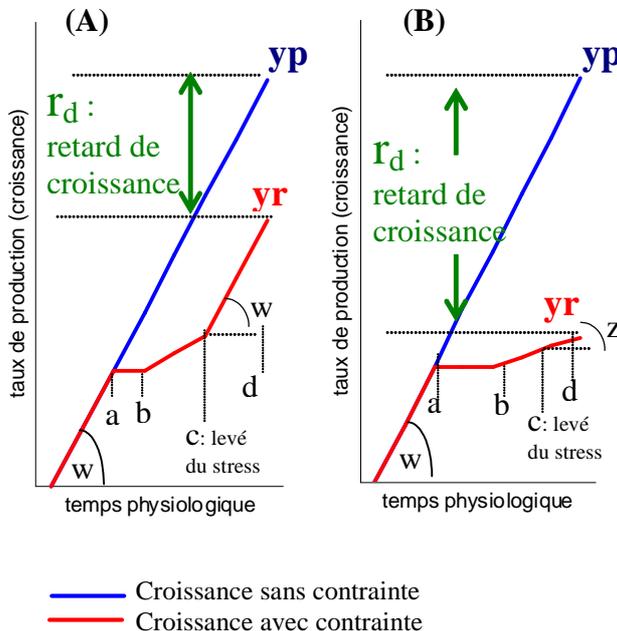


Figure 23 : Effets d'une contrainte hydrique sur la croissance : (A) épuisement modéré de la plante (segment ab) suivi de la perte partielle des fonctionnalités de croissance (segment bc) puis leur récupération sans rattrapage de la croissance non réalisée r_d (segment cd), (B) fort épuisement de la plante (segment ab) suivi d'une forte perte des fonctionnalités de la croissance (segment bc) sans grandes possibilités de récupération de ses fonctionnalités (segment cd) et conduit à terme à une mort à peu près certaine (d'après Hârtel, 1976 (cité in Larcher, 1981)).

Si maintenant la plante subit une série de contraintes liées au milieu qui modifie de façon significative la croissance de LAI_{vert}, de Zh ou de Zr, on observe toujours en fin de cette phase un état de croissance différent qui s'est progressivement, ou par période, éloigné de celui de la croissance potentielle. C'est ce qui a été traduit par les modifications de k_S et que de nombreuses études expérimentales, traitant surtout de la réduction de la croissance face au stress environnemental, vérifiaient. Les travaux de Hârtel (1976 in Larcher 1981) qui vont dans ce sens, montrent qu'en absence de tout stress hydrique la plante croît de façon régulière

et potentielle jusqu'à y (Figure 23A et 23B). Par contre, en présence d'un stress modéré (Figure 23A, tronçon *ab*), la plante voit sa croissance partiellement diminuée (y_s) par rapport à la valeur potentielle (y_p), et peut reprendre ses potentialités de croissance dès que la contrainte est levée (Figure 23A, tronçon *cd*). Mais il semble que dans ces exemples, les possibilités de rattrapage de la croissance non réalisée (retard de croissance r_d) n'existent pas. Si maintenant les fonctionnalités les plus importantes de la plante sont endommagées, suite à un stress sévère et contraignant, la réduction de la croissance se trouve alors accentuée et les potentialités de sa reprise compromises, même après la levée du stress (Figure 23B tronçon *cd*). C'est un effet seuil, non pris en compte, qui bloque la croissance et conduit le plus souvent à terme à une mort à peu près certaine de la plante.

C'est ce qui a été retenu dans cette approche ; autrement dit, l'état de croissance maximale possible (y_M) prévue en fin de la phase de développement ne peut être satisfait, compte tenu du retard journalier, $r_d(t)$, ou du cumul des retards, $\sum_{t=0}^{t=j-1} r_d(t)$. Aussi ce nouvel état de croissance maximale, $\left(y_M - \sum_{t=0}^{t=(j-1)} r_d(t) \right)$ au jour (j-1), ou au temps physiologique $A(t)$, définit le nouveau potentiel de croissance maximum. Les possibilités de croissance restantes à accomplir vaudront, dans ces conditions :

$$\left(y_M - \sum_{t=0}^{t=(j-1)} r_d(t) \right) - y_{S(j-1)} = y_M - \left(\sum_{t=0}^{t=(j-1)} r_d(t) + y_{S(j-1)} \right) \quad \text{soit} \quad (y_M - y_{P(j-1)})$$

Tout revient donc à considérer l'accroissement potentiel pour le jour (j) et pour $y_{S(j-1)}$, comme celui donné par la courbe potentielle à partir de la valeur $y_{P(j-1)}$, qui correspond aux potentialités restantes à accomplir ($y_M - y_{P(j-1)}$) pour le reste de la phase. Soit, selon la relation 10 (ci-dessus) :

$$[\Delta y_P]_{j-1}^j = y_{Pj} - y_{P(j-1)} \quad \text{[Relation 11]}$$

L'accroissement réel pour y_s sera cette valeur $[\Delta y_P]_{j-1}^j$ en absence de stress ($k_s = k_0$) ou cette même valeur modulée (réduite dans ce cas) par la contrainte ($k_s \neq k_0$). On s'aperçoit à ce niveau d'analyse qu'à tout moment du développement de la plante avec contrainte, la croissance restante à accomplir est toujours égale à la valeur potentielle restante à accomplir à partir du temps physiologique atteint sur la courbe sans contrainte (aucune contrainte tout au long de la croissance), soit $[y_M - y_P]$. Alors, on a toujours, selon la contrainte k_s , la solution suivante (d'après relation 11, ci-dessus):

$$y_{Sj} = y_{S(j-1)} + [\Delta y_S(k_0 \rightarrow k_s)]_{j-1}^j \quad \text{[Relation 12]}$$

avec $[\Delta y_S(k_0)]_{j-1}^j = [\Delta y_P]_{j-1}^j$ et $[\Delta y_S(k_s)]_{j-1}^j = [\Delta y_P(k_s)]_{j-1}^j$

2- Augmentation de la croissance pour Zr

Si toutefois une plante, en réaction à un stress environnemental, réduit la taille de certains de ses organes (partie aérienne surtout) afin de réduire ses dépenses, parfois elle en stimule d'autres, afin d'augmenter l'offre et la disponibilité des éléments de son milieu. C'est le cas en particulier de la croissance en longueur des racines qui, en période de stress hydrique, a généralement tendance à être stimulée et non à décroître comme c'est le cas pour le système aérien (LAI_{vert} et Z_h). En fait, le modèle de construction des plantes, généralement représenté par un agencement successif de modules, permet aux plantes de se développer au

cours de leur vie (Scanlon, 1998; Walter et Schurr, 1999) et de s'adapter aux différentes situations environnementales (Schullze, 1982), bien que la croissance générale des organes soit largement déterminée génétiquement (Poethig et Sussex, 1985). Toute synergie entre la croissance en profondeur des racines et une contrainte hydrique prise en compte se traduira, comme pour le LAI_{vert} et Zh , à travers une modification de k_s , et en l'occurrence une augmentation comme définie dans la relation 6 (paragraphe II.3.2).

Pour une synergie de croissance, qui atteint au temps t (ou $A(t)$) une valeur $\Delta y = \sum_{t=0}^{t=j-1} s_n(t) \neq 0$, la croissance maximale à atteindre est, à partir du jour $(j-1)$ et contrairement au

cas précédent, une valeur initiale y_M supérieure, soit une valeur $\left(y_M + \sum_{t=0}^{t=(j-1)} s_n(t) \right)$, même si le

stress vient à être levé. Aussi, les possibilités de croissance restantes à accomplir vaudront alors comme précédemment :

$$\left(y_M + \sum_{t=0}^{t=(j-1)} s_n(t) \right) - y_{S(j-1)} = y_M - (y_{S(j-1)} - \left(\sum_{t=0}^{t=(j-1)} s_n(t) \right)) \quad \text{soit} \quad (y_M - y_{P(j-1)})$$

De même que précédemment, tout revient donc à considérer l'accroissement potentiel pour le jour (j) et pour $y_{S(j-1)}$, comme celui donné par la courbe potentielle à partir de la valeur $y_{P(j-1)}$, qui correspond à la potentialité restante à accomplir $(y_M - y_{P(j-1)})$ pour le reste de la phase. Soit, selon les relations 11 et 12 (ci-dessus) :

$$[\Delta y_P]_{j-1}^j = y_{Pj} - y_{P(j-1)}$$

et finalement aussi :

$$y_{Sj} = y_{S(j-1)} + [\Delta y_S(k_0 \rightarrow k_s)]_{j-1}^j$$

avec $[\Delta y_S(k_0)]_{j-1}^j = [\Delta y_P]_{j-1}^j$ et $[\Delta y_S(k_s)]_{j-1}^j = [\Delta y_P(k_s)]_{j-1}^j$

3- Illustration des deux modulations de la croissance sous contraintes du milieu : réduction pour le LAI_{vert} (et donc de Zh) et augmentation de Zr

La figure 24 ci-dessous montre, à titre d'exemple, l'évolution de la croissance d'un couvert végétal soumis à des conditions variées du milieu (absence ou présence de contraintes). En l'absence de contraintes du milieu, l'évolution du LAI_{vert} , de même que celle de Zr (qui évolue de façon proportionnelle au LAI_{vert}) ainsi que Zr demeurent avec une croissance potentielle (courbe bleue). En présence de stress, par contre, la croissance du LAI_{vert} est réduite en réponse à ce stress au profit d'une stimulation de la croissance en profondeur des racines, en fonction du poids du stress bien sûr (courbes rouge, ou noire). Notons au passage que la vitesse de stimulation des racines diffère selon les espèces et que cette particularité est prise en compte dans Bilhyna à travers le facteur (n) dans la relation 6 au paragraphe II.3.2 ($n=2$ pour la plupart des cultures mais peut atteindre des valeurs supérieures pour des cultures particulières). C'est le cas de la courbe rouge ($n=2$ pour les cultures classiques) comparée à la courbe verte ($n=4$ pour les cultures plus spécifiques) où pour un même niveau de contrainte du milieu, la réponse est plus prononcée sur celle-ci.

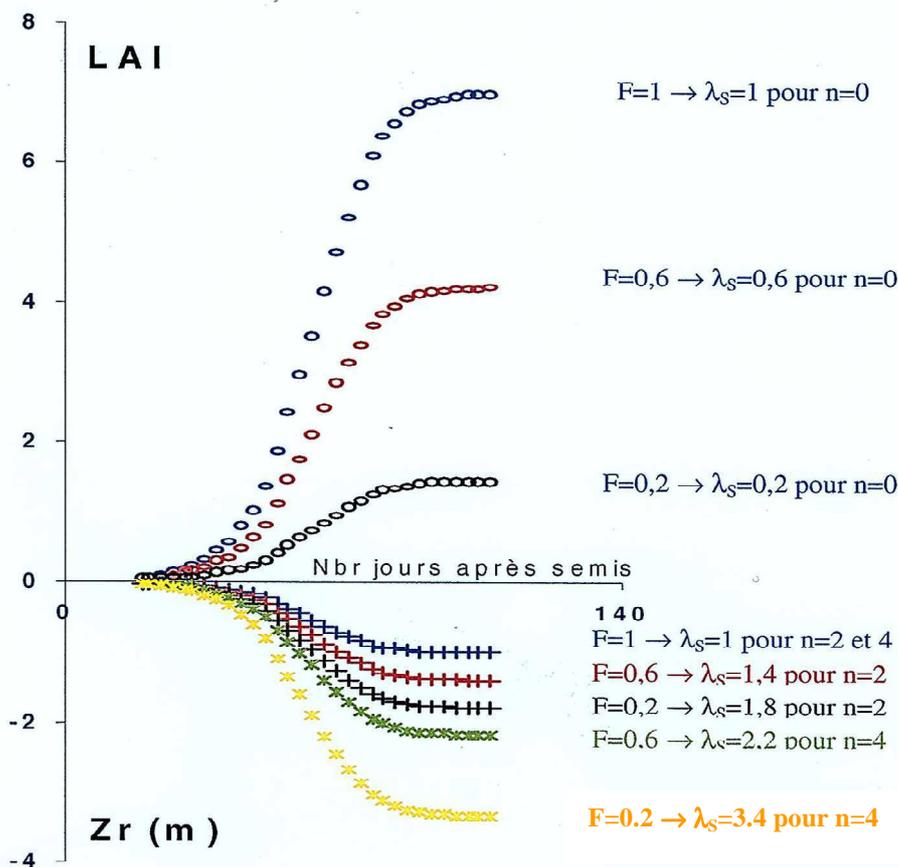


Figure 24. Réduction de la croissance aérienne du couvert (LAI et Zh) au profit d'une stimulation de la croissance en profondeur des racines : (i) en fonction de la contrainte (F) pour le LAI et Zh (n étant nul pour le LAI et Zh) et (ii) en fonction de la contrainte (F) et du coefficient de synergie ou d'accélération (n) pour les racines (n étant toujours supérieur à 1)

II.3.3.3 Modulation de la sénescence continue de LAI_{vert} sous contraintes

1- Accélération de la sénescence du LAI_{vert}

La sénescence du LAI_{vert} , ayant lieu le plus souvent après le stade floraison (Comb., 2005 ; Hartman et al., 1998), se produit par un ensemble de changements métaboliques génétiquement programmés qui conduit à la perte de l'intégrité des chloroplastes et donc à la réduction de la capacité photosynthétique de la plante (Gover., 1993 ; Hartman et al., 1998 ; Evans., 1983). Ce processus se trouve accéléré par la plupart des stress environnementaux. Parmi ces stress, citons la carence en azote (Pearson & Jacobs., 1987 ; Gabrielle et al., 1998 ; Smart et al., 1994) et celle en phosphore (Colomb et al., 2000) en ce qui concerne l'alimentation minérale mais aussi et surtout les stress climatiques tels que ceux pris en compte par Bilhyna, que sont l'eau (Sandras et al., 1991) et l'éclairement reçu (Eik & Hanway., 1965 ; Camb., 2005).

L'effet de la luminosité incidente sur la stimulation de la sénescence reste toutefois mal connu et dépend de plusieurs paramètres (structure du couvert, espacement entre rangs, densité du peuplement,...). Bien que certains auteurs montrent que la stimulation de la sénescence est peu ou pas accentuée en conditions de carence en rayonnement (Slafer et Millares 1992), d'autres par contre affirment qu'une telle carence accélère la sénescence des feuilles les moins exposées au rayonnement (Osaki., 1995 ; Sonohat-Poa., 1997). On constate clairement cet effet sur les feuilles ambrées du bas du couvert qui voient leurs assimilés

exportés plus rapidement et leur mort accélérée du fait de cette carence (Comb, 2005). Une telle situation suggère donc la prise en compte de cette carence en fonction des caractéristiques de chaque culture.

S'agissant du stress hydrique, celui-ci a une influence assez marquée sur le déroulement de la sénescence des feuilles vertes après floraison (Dwivedi et al., 1979 ; Chen and Kao., 1990 ; Munné-Bossh & Alegre., 2004). Des changements au niveau métabolique similaires à ceux normalement observés lors de la sénescence potentielle sont alors signalés sous des conditions de stress hydrique ; citons par exemple l'augmentation de l'acide abscissique ABA (Yang et al., 2002, 2003 ; Pell et Dam 1991 ; Lin et al., 1999) et de l'acide salicylique (Munné-Bosch & Penuelas, 2003; Abreu & Munné-Bosch., 2007), la diminution des niveaux de cytokinines (Yang et al., 2002, 2003 ; Yang & Zhand., 2006), de la concentration d'éthylène (Spollen et al., 2000 ; Sharp, 2002) et de l'acide jasmonique (Abreu & Munné-Bosch., 2007) de même que la réduction de la synthèse des protéines (Bradford & Hsiao, 1982). Il est bien connu que la perte du Laivert entre la floraison et la récolte conditionne fortement la production. Sa persistance durant cette phase se trouve alors réduite sous des conditions hydriques non favorables. Borrell et al (2000) montrent que la perte du Lai du sorgho après la floraison serait en moyenne de trois à quatre fois plus prononcée en conditions hydriques sévères. Wolfe et al., (1988) ont montré que la sénescence observée chez le maïs lors d'un dessèchement continu du sol durant la phase de sénescence est d'autant plus forte que le Lai atteint à la floraison est plus élevé, et que ce taux de sénescence sous un dessèchement progressif du sol durant cette phase peut valoir de 1,25 à 3 fois le taux moyen observé dans des conditions d'alimentation hydrique favorables. Ce qui suggère, là aussi, la prise en compte des caractéristiques des cultures dans ces conditions.

Comme pour les autres phases de développement et croissance, la phase de la sénescence se déroule elle aussi pendant un temps physiologique maximum de durée Asc_{max} . Cette évolution se fait depuis la valeur atteinte en fin de phase de plateau jusqu'à une valeur minimale (finale), environ y_0 , qui correspond à la fin de la durée physiologique maximale de la sénescence. Bien sûr, après cette durée physiologique Asc_{max} , le peu de LAI_{vert} restant poursuit sa sénescence pour tendre in fine vers une valeur nulle.

En effet, on a vu que pour LAI_{vert} , comme pour la hauteur, Z_h , une croissance se produit à partir de y_0 jusqu'à tendre vers une valeur Y_M en absence de contrainte ; cette évolution se trouve modifiée en réponse à une série de contraintes qui réduisent la croissance à une valeur dite avec contrainte, $Y_S = y_S(\text{fin plateau})$, valeur le plus souvent nettement inférieure à Y_M . Le même constat d'évolution se produit sur les racines, Z_r , sinon qu'on observe, non une réduction, mais une augmentation de la croissance en profondeur ($Y_S > Y_M$). C'est pourquoi, durant la phase de sénescence, le LAI_{vert} restant sur pieds diminue toujours depuis sa valeur atteinte en fin de plateau (soit Y_M sans contrainte durant les phases de croissance, ou Y_S avec contraintes) jusqu'à une valeur minimale (y_0) qui correspond à la valeur en fin de la durée physiologique de la phase de sénescence, quelles que soient les conditions du milieu (absence ou présence de contraintes). Comme pour les racines qui croissaient sous contraintes du milieu, on observe une accélération du processus de sénescence durant cette phase jusqu'à $y=0$ ($k_S > k_0$). Cette accélération, donnée par la valeur de k_S s'appliquera entre le jour (j-1) et le jour (j) et on aura :

$$y_{S_j} = y_{S_{(j-1)}} + [\Delta y_S]_{j-1}^j$$

Cette valeur de sénescence $[\Delta y_S]_{j-1}^j$ est déterminée par le potentiel de sénescence donné par la courbe de sénescence potentielle modulé par la valeur $k_S(j)$ du jour j et l'accroissement de temps physiologique du jour j, soit $dA(t) = Asc_{max} \cdot V_D(j)$. Cette valeur de la courbe de sénescence potentielle est celle qui correspond à la quantité réelle de sénescence

possible au jour (j-1) , soit $y_{s(j-1)}$, et cela pour un temps $A(t_x = (i-1))$ de la courbe potentielle de sénescence. On obtient donc

$$y_{P(i-1)} = y_{S(j-1)} \quad \text{soit} \quad [\Delta y_P]_{i-1}^i = y_{P(i)} - y_{S(j-1)}$$

Comme dans tous les autres cas précédents, c'est cette valeur de gradient de sénescence potentielle qui sera modifiée par la valeur de k_S (remplaçant celle de k_0) ; on déterminera ainsi l'accroissement réel de la sénescence selon la vitesse de développement du jour j, on écrit donc :

$$y_{Sj} = y_{S(j-1)} + [\Delta y_S(k_0 \rightarrow k_S)]_{j-1}^j \quad \text{[Relation 13]}$$

avec $[\Delta y_S(k_0)]_{j-1}^j = [\Delta y_P]_{i-1}^i$ et $[\Delta y_S(k_S)]_{j-1}^j = [\Delta y_P(k_S)]_{i-1}^i$

La valeur ainsi obtenue jour après jour correspond en fait à l'accélération de la sénescence à partir du potentiel initial, soit $y_{S(\text{fin plateau})} = y_{P(\text{fin plateau})}$ valeur qui induit la courbe de sénescence potentielle qui sert, comme on vient de le voir, à définir la sénescence réelle à partir de sa valeur initiale (sans contraintes pendant les phases de croissance).

De façon générale, dans la mesure où les contraintes se sont exercées pendant la croissance conduisant à une valeur avant sénescence $y_{S(\text{fin plateau})} < y_{P(\text{fin plateau})}$, la situation évolue à partir d'un rapport $\gamma = (y_{S(\text{fin plateau})} / y_{P(\text{fin plateau})})$. Ce rapport d'affinité verticale liera la courbe de sénescence réelle ($y_{SR}(\text{sénescence réelle})$), due aux contraintes tout au long du cycle de végétation, à la courbe de sénescence avec les mêmes contraintes exprimées seulement à partir de la fin de plateau sur la courbe potentielle ($y_{ST}(\text{sénescence théorique})$). Ainsi la sénescence réelle (y_{SR}) sera donnée par l'expression suivante :

$$y_{SR} = \gamma \cdot y_{ST} \quad \text{[Relation 13bis]}$$

et $y_{ST(j)} = \left[\begin{array}{c} \frac{y_{ST(j-1)}}{(y_M - y_{ST(j-1)})} e^{-k_0 \cdot y_M \cdot A_{Max} \cdot V_d(j)} \\ 1 + \frac{y_{ST(j-1)}}{(y_M - y_{ST(j-1)})} e^{-k_0 \cdot y_M \cdot A_{Max} \cdot V_d(j)} \end{array} \right]$

avec au premier jour de la sénescence $y_{ST(j-1)} = y_{P(\text{fin plateau})}$

2- Illustration de la modulation de la sénescence : accélération de la perte du LAI_{vert}

Selon ce schéma, la figure 25 montre que les accélérations de la sénescence du LAI_{vert} pour un coefficient $n=2$ (relation 6 au paragraphe II.3.2) et pour un coefficient $n=4$, sont bien sûr identiques, en absence de toute contrainte durant la phase sénescence ($k_S = k_0$ avec $\lambda_S = 1$) ; cette évolution représente la sénescence potentielle (respectivement la courbe (o) et la courbe (*)). La contrainte imposée selon des valeurs de λ_S égales à 1.4 -1.8 - 2.2- 3.4 souligne l'accélération plus forte de la sénescence et donc des récoltes plus précoces.

Si un retard de croissance durant les trois premières phases précédent la sénescence apparaît, un rapport d'affinité γ sera alors défini selon la valeur de ce retard et les courbes de sénescence produites seront des courbes affines, semblables à celles illustrées sur la figure 25.

Dans cet exemple les valeurs de la fonction modulation (λ_s) sont données à partir de trois valeurs de fonction de contrainte (F), 1, 0.6 et 0.2 (relation 7 et 8 pour le calcul des F et λ_s , paragraphe II.3.2) et du choix de coefficient de sensibilité n (égale à 2 et à 4).

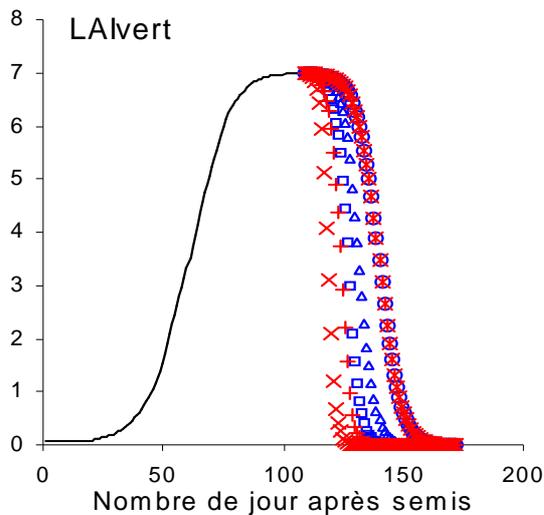


Figure 25. Evolution de la sénescence en fonction de la contrainte (F) et du coefficient de sensibilité de la sénescence (n) :

- (i) pour $n=2$ on a les courbes :
 - (o) pour $F=1 \rightarrow \lambda_s=1$;
 - (Δ) pour $F=0.6 \rightarrow \lambda_s=1.4$;
 - (\square) pour $F=0.2 \rightarrow \lambda_s=1.8$
- (ii) Pour $n=4$ on a les courbes :
 - (*) pour $F=1 \rightarrow \lambda_s=1$
 - (+) pour $F=0.6 \rightarrow \lambda_s=2.2$
 - (x) pour $F=0.2 \rightarrow \lambda_s=3.4$

Finalement, bien que chaque phase soit caractérisée par ses propres données d'entrée, liée notamment à sa durée et aux valeurs initiales et maximales des paramètres physiologiques, et qu'elles évoluent de manière indépendantes, elles restent tout de même reliées entre elles et synchronisées par le temps physiologique qui détermine chaque phase d'un cycle complet de développement-croissance d'un couvert.

II.3.4. Illustration de l'évolution globale du LAI_{vert} du blé : les quatre phases du cycle de développement-croissance

L'évolution de la croissance potentielle du LAI dans le temps (compté en jour) déduite de la logistique de croissance en fonction des vitesses de développement journalières imposées par les températures physiologiques en l'absence de contrainte hydrique pour l'année 93 (Figure 15, paragraphe II.2.2.3.) est reprise dans cet exemple à titre de courbe de croissance référence (courbe o, Figure 26) pour fin de comparaison avec deux autres courbes croissances évoluant cette fois ci en conditions de contrainte hydrique, tout autres conditions étant les mêmes (courbe + et Δ , Figure 26).

Soumis à une contrainte journalière constante tout au long du cycle de développement du couvert (cas théorique où la valeur de la fonction de contrainte journalière λ_s est maintenue constante à 0.6), le LAI subit chaque jour une réduction régulière de sa croissance (compte tenu du poids constant de la contrainte) dont la valeur varie en fonction du niveau de développement atteint (vitesses de croissance différentes entre les phases), sans possibilités de rattrapages bien sûr. L'effet de la contrainte sur la réduction de l'accroissement journalier et sa rétroaction sur l'évolution du LAI se traduisent par un raccourcissement de cycle du couvert, assez visible en fin de course du LAI (durée journalière de 161 jours pour la courbe en (x) au lieu de 181 jours pour la courbe potentielle en (o)).

En conditions variables de contraintes (courbe + et Δ , Figure 26), cas en milieu naturel où λ_s varie entre 0 et 1 (courbe en Δ), le retard accusé par le LAI n'est plus régulier et dépend, en plus des vitesses de développement caractérisant chaque phase, du poids des contraintes journalières (variables) subies. Dans cet exemple de contraintes variables (courbe Δ et +) le retard drastique et assez visible du LAI subi au début de la phase de développement (courbe Δ) est dû à des modulations importantes de la croissance journalière (λ_s inférieur à

0.6), de sorte que cette courbe passe en dessous de celle du LAI soumis à une contrainte constante de $\lambda_S = 0.6$ (courbe en +). Avec la levée du stress quelques jours plus tard (courbe Δ), le couvert reprend ses potentialités de croissance au moment où les vitesses de croissance sont maximales et sa courbe passe alors au-dessus de celle soumise à des modulations journalières constantes de la croissance (courbe en + pour $\lambda_S = 0.6$), mais sans possibilités de rattrapage de son retard accusé au début de la phase développement sur la courbe. Retard qui reste, d'ailleurs, assez visible en fin de la phase plateau (retard cumulé sur la courbe Δ). Il en est de même pour la courbe en (+) qui a subi un stress modéré mais constant ($\lambda_S = 0.6$) tout au long du cycle.

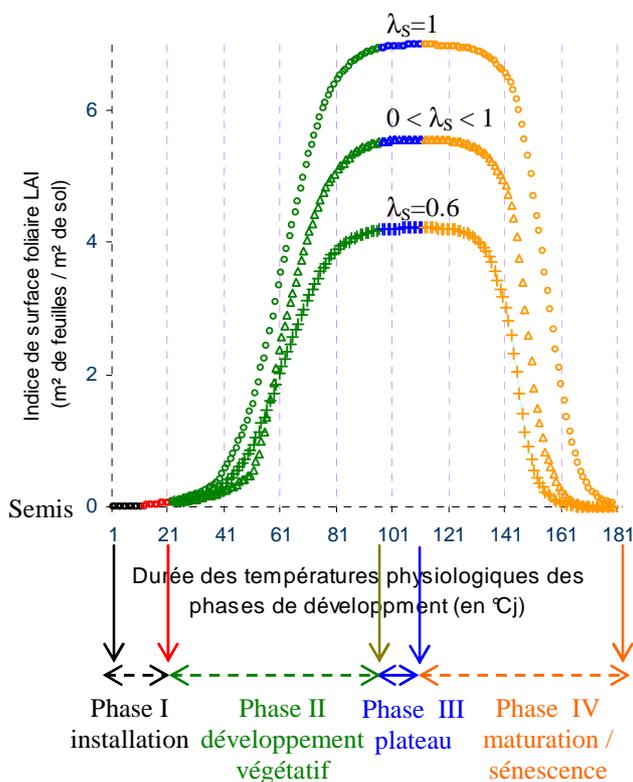


Figure 26. Evolution dans le temps (compté en jours durant l'hiver 93 à Alger) de la croissance du LAI du blé selon la logistique de croissance appliquée à chacune des quatre phases et en fonction des vitesses de développement imposées par les températures physiologiques journalières, soumise à différentes valeurs de contraintes du milieu λ_S (i) maintenues constantes à 1 et à 0.6 pour les courbes (o) et (+) tout au long du développement de la culture (ii) et variables entre 0 (stress infini) et 1 (stress nul) en fonction des apports en eau pour la courbe (Δ), toujours sur l'ensemble du cycle

Globalement, le poids des contraintes sur l'ensemble du cycle de développement du couvert étant moins fort pour la courbe (Δ) que pour la courbe (+), durant la phase de sénescence particulièrement, il est tout à fait logique que le raccourcissement du cycle du couvert soit moins important pour la courbe en (Δ), comparée à la courbe (+).

La croissance en hauteur Z_h , non représentée sur la figure 26, évolue de la même manière que pour le LAI (prise en compte des trois premières phases) et subit des réductions en hauteur suite aux contraintes du milieu, dans les mêmes proportions que le LAI en fonction, bien sûr, des valeurs initiales (Z_{h0}) et maximales ($Z_{h_{max}}$) fixées pour ce paramètre. Il en est de même pour la croissance des racines en profondeur Z_r (non représentée elle aussi sur la figure 26) avec cependant une synergie entre sa croissance en profondeur et le poids de la contrainte du milieu, conduisant à une augmentation de cette croissance plutôt qu'à sa réduction comme c'était le cas pour Z_h ou le LAI. Contrairement au LAI, les valeurs de ces deux variables de croissance (Z_h et Z_r) atteintes en fin de la phase plateau demeurent constantes durant toute la période de sénescence du LAI et ne subissent donc plus d'évolution.

II.4. Prise en compte du modèle biophysique (développement-croissance) dans Bilhyna

Le nouveau formalisme adopté dans ce module de développement-croissance pour mieux traduire l'évolution des différents paramètres morphologiques de la plante en réponse

aux différentes conditions de stress environnementaux, dues à l'eau et au rayonnement, permet alors une meilleure prise en compte de leurs poids dans les différents calculs liés aux besoins en eau des cultures, conduisant à une approche plus fine du bilan hydrique.

En effet, les échanges des parties aériennes du couvert avec l'atmosphère reposent pour l'essentiel sur le développement de sa surface foliaire (L_{ai}), de la hauteur (Z_h) et de la profondeur des racines (Z_r), chacune de ces parties croissant de façon continue depuis le semis jusqu'à la fin de la floraison pour se maintenir constante jusqu'à la maturation et récolte, exception faite du LAI_{vert} qui, lui, reprend une évolution inverse et décroît pour ensuite s'annuler. Ainsi, ces grandeurs morphologiques sont fortement modulées par le développement-croissance du couvert qui intervient à chaque instant, d'abord sur les échanges radiatifs, mais aussi sur les échanges convectifs et enfin sur les partitions couvertes (chaleur sensible, latente, évaporation de la surface du sol). Enfin, n'oublions pas le poids du système racinaire et sa profondeur dans l'évaluation de la réserve en eau du sol disponible pour la plante à chaque instant, depuis le semis jusqu'à la récolte. Ce sont ces grandeurs que l'on vient de modéliser assez finement qui serviront au suivi de la culture dans son milieu.

De fait, le LAI produit est ainsi considéré comme totalement vert, quel que soit le stress ayant caractérisé cette période de développement foliaire, et participe dans son ensemble aux différents processus d'échanges rappelés ci-dessus. A tout moment on a :

$$LAI_{\text{échange}} = LAI_{\text{vert}} - LAI_{\text{mort}}$$

Du semis à la fin de la phase de reproduction, le LAI_{mort} est souvent négligé du fait de la prédominance de la croissance verte durant cette phase ; sa valeur est alors considérée comme nulle ($LAI_{mort} \cong 0$). A la fin de la phase reproduction et début de la phase sénescence, la croissance du L_{ai} vert s'arrête et un début de sénescence commence pour ensuite s'accroître et même s'amplifier pour certaines espèces sous le poids du stress. Le LAI_{vert} se transforme donc graduellement en LAI_{mort} et finit par disparaître totalement ou presque à la fin de la phase de sénescence, sauf pour les plantes à feuilles persistantes. Les échanges avec l'atmosphère se trouvent donc réduits dans ces conditions du fait que le LAI_{mort} est souvent qualifié de non moteur mais qui, en réalité, le reste vraiment en raison de son rôle dans les processus d'échanges de la plante avec son environnement (sauf pour l'eau). La part de cette surface morte dans l'ensemble des échanges de la plante avec l'atmosphère correspond alors à celle engendrée par l'ancienne surface d'échange verte (devenue non évaporante), mais de moindre surface (diminution de la surface des tissus secs), valant alors :

$$LAI_{\text{mort}} = \delta LAI_{(\text{vert} \rightarrow \text{sénescence})}$$

(avec $0 < \delta < 1$ mais qui est pris entre 0.5 à 0.6 le plus souvent).

L'indice foliaire d'échange total du couvert serait dans ces conditions :

$$LAI_{\text{échange}} = LAI_{\text{vert}} + \delta LAI_{(\text{vert} \rightarrow \text{sénescence})}$$

(avec à la récolte $LAI_{\text{échange}} = LAI_{\text{récolte}}$)

A la récolte, la coupe (sur pieds) se fait à une certaine hauteur (Z_c , renseignée au programme) et donc la fraction correspondante (Z_c / Z_h) du $LAI_{récolte}$ reste en place et l'on peut y inclure la fraction du LAI emportée ($[1 - (Z_c / Z_h)] \cdot LAI_{récolte}$) qui est retournée par rejet au sol (pailles, tige broyée, etc.) pendant la récolte, soit une proportion π renseignée au programme. L'ensemble des éléments restants au sol est alors pris en compte dans le calcul du bilan hydrique par les différents effets (mulch radiatif, convectif et évaporatif):

$$LAI_{sol} = \left[\frac{Z_c}{Z_h} (1 - \pi) + \pi \right] \cdot LAI_{récolte}$$

Le rôle du LAI_{sol} dans les échanges cesse une fois qu'un travail de sol sera réalisé, soit pour l'enfuir, soit pour préparer le sol pour la mise en place d'une nouvelle culture. Le rôle de la hauteur dans les échanges est lui aussi pris en compte depuis le semis jusqu'à la récolte, comme un des paramètres d'échanges convectifs. Il est alors croissant jusqu'à atteindre la valeur maximale à la fin floraison, comme pour le Lai . Du fait que le grandissement en hauteur est irréversible, le poids de ce paramètre reste alors constant durant toute la phase de sénescence. La hauteur du chaume laissé après la récolte joue, elle aussi, un rôle très important dans la perte en eau du sol par évaporation en augmentant sa rugosité et en tenant compte de l'effet mulch de surface; d'où la nécessité de connaître cette hauteur dans le calcul de l'évaporation de surface du sol, depuis la récolte jusqu'au prochain labour. Après le labour, seule la rugosité du sol est prise en compte selon l'état de la surface du sol résultant du type du labour (grosse ou petite motte fonction du type de labour et de sa profondeur).

Par ailleurs, la densité racinaire qui se trouve à sa valeur optimale pour l'essentiel dans la tranche du sol correspondant à la couche travaillée est donc supposée à l'optimum de prélèvement en eau (valeur $\tau = 1$). La valeur du prélèvement de l'eau du sol (τ) diminue linéairement à partir de la profondeur du travail pour atteindre zéro ($\tau = 0$) à la profondeur maximale atteinte à la phase reproduction (Figure 27). D'où l'importance de la modélisation du développement-croissance des racines selon la contrainte hydrique et photosynthétique de la culture, objet de ce chapitre.

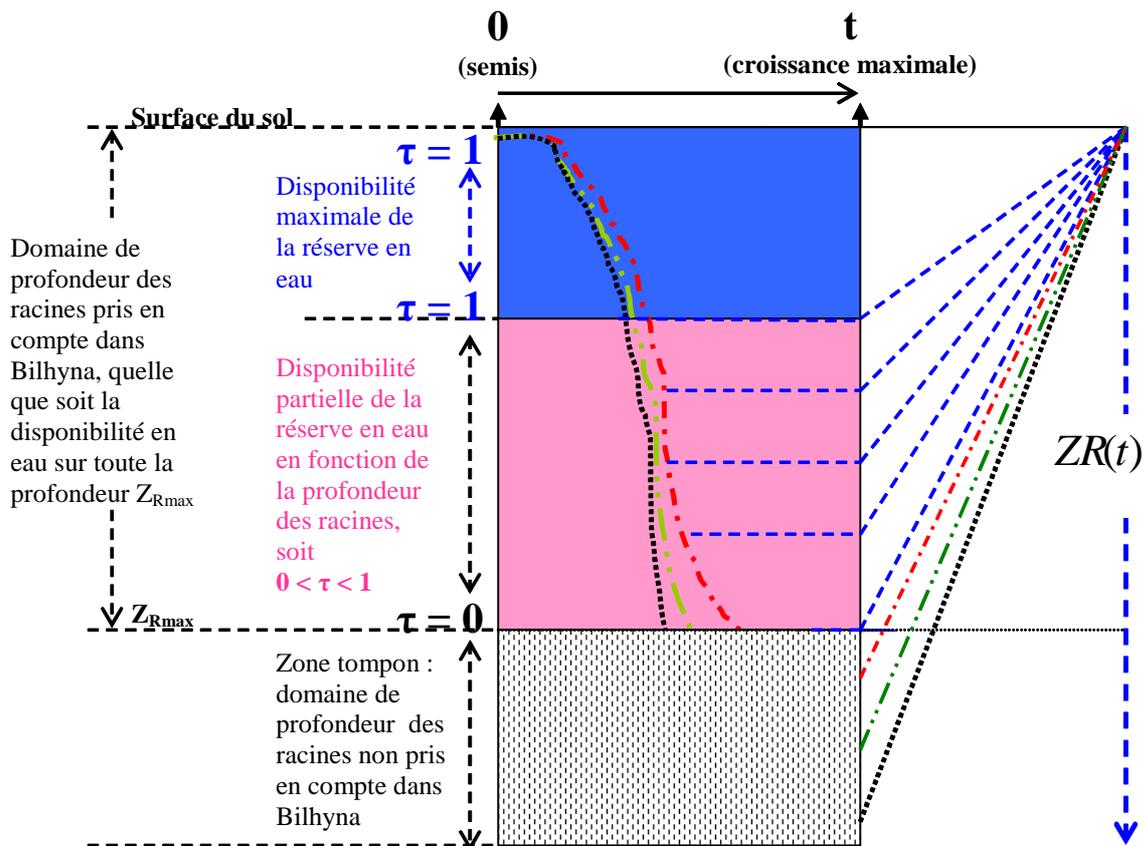


Figure 27. Evolution de la profondeur des racines dans les tranches du sol travaillé et non travaillé, tels que pris en compte dans le modèle Bilhyna

L'estimation d'une telle variable en fonction de la contrainte édaphique n'est pas parfaite car elle dépend aussi d'un certain nombre de paramètres tels que la nature du sol

(surtassement), sa profondeur ainsi que le type de système racinaire en question. Bien sûr, nous savons que la longueur spécifique des racines (longueur/masse) varie en fonction de la profondeur mais aussi du stress ; aussi nous avons choisi, pour des raisons de robustesse du modèle, de simplifier le problème en simulant uniquement l'allongement racinaire en profondeur tout en nous appuyant sur la réduction de sa densité en fonction de sa profondeur. Ce formalisme permet ainsi de prendre en compte un volume de sol plus important (selon la profondeur travaillée) et donc une disponibilité plus importante en eau due à la stimulation de la croissance des racines dans la zone travaillée et au-delà (fonction des espèces), selon une progression plus ou moins rapide (fonction du poids des contraintes hydriques et de rayonnement). Cette progression est illustrée par la figure 27 ; ce qui permet d'affiner encore plus le calcul du bilan de la culture et des besoins en eau au cours de son développement-croissance.

II.5. Sensibilité du modèle biophysique (développement-croissance) couplé au modèle Bilhyna

Le second modèle de loi de croissance cumulée, proposé dans ce travail, couplé au premier modèle de loi de vitesse de développement, est analysé dans un contexte de fonctionnement global du modèle biophysique Bilhyna. Nous allons dans un premier temps présenter les valeurs des principaux paramètres du modèle déduites pour la plupart des expérimentations que nous avons conduites à cet effet (pour rester proche de la réalité des processus ayant lieu en milieux naturels), avant de présenter l'analyse de la sensibilité du modèle dans un second temps.

1- Paramétrisation du modèle

Afin de simplifier l'ensemble des considérations liées à la rétention de l'eau dans le sol et s'affranchir ainsi des notions de potentiel pour décrire la disponibilité en eau du système sol d'une parcelle, Bilhyna s'est doté d'un schéma simple de représentation, ramenant le sol à un ensemble de compartiments contenant chacun une partie de l'eau totale, mais qui serait plus ou moins disponible pour la plante en fonction des liaisons eau-particules sol qui y prédominent. Les limites de chacun de ces compartiments, représentées par des grandeurs souvent utilisées dans les études des bilans hydriques et déjà définies et utilisées dans le premier et second chapitres, sont : H_{cc} , H_{max} et H_{min} .

Pour fixer ces variables et paramètres, nous avons décidé de conduire en parallèle à notre expérimentation de l'année 2000, une série de mesures au laboratoire et en plein champ pour approcher leurs valeurs. Nous nous focalisons donc sur les paramètres ayant un poids sur la gestion des bilans d'eau et des irrigations, particulièrement ceux responsables des liaisons de l'eau au sol (H_{cc}) mais aussi ceux permettant son prélèvement dans le sol par les racines du couvert (H_{max} et H_{min}).

*** Paramètres relatifs aux sols**

Les valeurs de l'humidité du sol à saturation (H_{sat}), à la capacité au champ (H_{cc}) et celle du sol en équilibre avec l'humidité de l'air (H_a) ont fait l'objet de mesures sur 18 échantillons prélevés dans la tranche du sol comprise entre 0 et 40 Cm (parcelle I). Le poids du sol de chaque échantillon est alors déterminé une première fois après saturation, p_{sat} , puis une seconde fois après drainage de l'eau gravitaire du sol (eau contenue dans les macro pores), p_{cc} , et en fin une troisième fois après séchage à l'air libre jusqu'à ce qu'un équilibre s'établisse entre l'humidité du sol et celle de l'air, p_a . Les échantillons du sol sont par la suite séchés à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures pour déterminer leurs poids sec, p_{sec} . Les valeurs des humidités pondérales, soit H_{sat} , H_{cc} et H_a , correspondant à chacun des poids mesurés, soit

p_{sat} , p_{cc} , p_a respectivement, sont donnée par l'écart entre ces valeurs de poids humides à celle du poids sec (p_{sat}), rapporté à cette même valeur de poids sec (p_{sat}). Pour passer à l'humidité volumique, il suffit de multiplier ces trois humidités pondérales par la densité apparente du sol en question. Les résultats de ces mesures sont résumés dans le tableau 3.

*** Paramètres de transpiration relatifs au système sol-couverts**

Ce sont, surtout, les paramètres d'humidités du sol qui définissent le domaine de la réserve en eau du sol pour lequel il y a régulation de la croissance. La limite maximale correspond au début de la régulation stomatique (humidité maximale du sol H_{max}) alors que la limite minimale traduit la fin des possibilités de prélèvements d'eau par les racines (humidité minimale du sol H_{min}). Bien que leurs appréhensions soient difficiles, nous avons tout de même tenté d'approcher expérimentalement ces deux valeurs sur nos sols, sous une culture de blé.

Démarche et approche expérimentale

Pour déterminer H_{max} et H_{min} , une expérimentation in situ a eu lieu l'année 2000 sur nos sols. Trois échantillons de sol de 25 cm de côté et 30 cm de profondeur, portant chacun des plants de blé en pleine croissance, ont donc été prélevés sur la parcelle bien irriguée 24 heures avant. D'un poids proche de 15 à 20 kg, le sol de ces échantillons est aussitôt enveloppé dans un plastique très résistant de sorte que sa partie supérieure ne soit plus en contact avec l'atmosphère, évitant ainsi les pertes d'eau par évaporation. Deux traitements sont donc différenciés dès le premier jour : un traitement noté ETM, recevant chaque jour (après pesée) une quantité d'eau égale à celle perdue par transpiration et un traitement noté ETR, pesé chaque jour lui aussi, ne recevant aucun apport d'eau jusqu'au flétrissement de la culture. Les échantillons sont laissés sur place à l'endroit de leur prélèvement mais protégés contre les pluies par une toiture en film plastique de 4 m² de surface, placée à 1.5 m du sol (les quatre côtés de l'abri n'étant pas fermés la journée, de façon à permettre à la plante une ventilation normale). Les échantillons sont retirés de cet abri uniquement pour être pesés et sont aussitôt remis à leur place. L'expérimentation s'est déroulée aux stades épiaison et floraison (stades les plus sensibles au stress).

L'ensemble des valeurs journalières ETR/ETM permet alors de tracer la courbe du rapport des consommations des deux traitements hydriques (ETR/ETM) en fonction de la réserve du sol. Ce rapport vaut environ 1 tant que la réserve en eau du sol est supérieure ou égale à H_{max} mais décroît aussitôt que cette réserve devient inférieure à H_{max} , soit $ETR < ETM$ (figure 28). Le début de cette décroissance traduit alors un début de régulation stomatique qui s'accroît au fur et à mesure du dessèchement du sol. L'estimation de H_{min} repose quant à elle sur l'état de la culture de l'échantillon conduit sans apport d'eau (à l'ETR) qui subit un dessèchement sévère du fait du non renouvellement de l'eau du sol transpirée. Ainsi, lorsque la culture commence à présenter des difficultés pour se maintenir en pleine turgescence au milieu de la journée, on procède alors à la fermeture totale de l'abri une fois la nuit arrivée, afin d'éviter la réhydratation de la partie aérienne par l'humidité de l'air nocturne (rosée entre autre). Au levé du jour, les quatre côtés de l'abri sont ouverts à nouveau et l'opération est répétée jusqu'au flétrissement complet de la culture. La valeur de H_{min} est alors atteinte lorsque la plante ne peut plus se reprendre sa turgescence au levé du jour, traduisant alors la limite minimale de la réserve en eau du sol utilisable pour la plante. Valeur d'humidité équivalente à celle dite du point de flétrissement permanent.

Eléments de résultats

Le suivi de la cinétique du dessèchement du sol des pots montre qu'après une période d'instabilité de rapport de consommation (ETR/ETM) due au remaniement du sol après son prélèvement avec les pieds du blé et sa mise en place dans les pots, celui-ci tend vers la valeur de 1 à partir d'une humidité pondérale de l'ordre de 0.25.

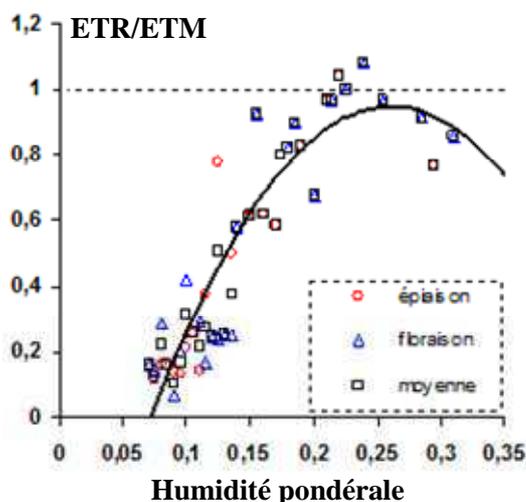


Figure 28. Evolution du rapport de transpiration de l'eau (ETR/ETM) durant les stades épisaison et floraison et leur moyenne établie sur une culture de blé, conduite sur les sol de la ferme expérimentale de l'ENSA d'Alger (expérimentation 2000)

La figure 28 montre que la chute du rapport (ETR/ETM) commence à partir d'une humidité pondérale de 0,22 et devient significative à partir d'une humidité voisine de 0,2, correspondant alors à la valeur H_{max} . Ce rythme continue à chuter en fonction du dessèchement du sol jusqu'à atteindre une valeur d'humidité pondérale minimale, notée H_{min} , voisine de 0,08 en moyenne (tableau 3). Elle correspond à un point de non retour en matière de fonctionnement des différents processus biologiques de la plante, développement-croissance entre autres.

Tableau 3 : paramètres physiques et de transpiration des couverts

Sources	Paramètres kg(eau)/kg (sol)	Parcelle I	Parcelle II
bibliographie	Rcc		0.2803
	Rmin		0.1085
nos mesures	Rcc	0.277	
	Rmax	0.2	
	Rmin	0.08	
Utilisés dans nos simulations pour la validation	Rsat	0.29 à 30	0.29 à 30
	Rcc	0.28	0.28
	Rmax	0.2	0.2
	Rmin	0.08	0.08

* Paramètres de croissance du couvert végétal

Les paramètres de croissance végétale utilisés dans le modèle proviennent des mesures issues des expérimentations conduites en plein champ et destinées à la validation du modèle. Les valeurs de l'indice de surface foliaire LAI, de la hauteur du couvert Z_h et de la profondeur des racines Z_r ont donc été déterminées pour la culture du blé de même que celle de la durée du cycle de développement (temps physiologique en °Cj). Pour rester proche de la moyenne des valeurs représentatives de la culture du blé dans la région de la Mitidja (les valeurs peuvent être supérieures ou inférieures à celles mesurées) nous avons fixé nos valeurs pour ces quatre paramètres tels que résumés dans le tableau 4.

Tableau 4. Paramètres de croissance du couvert

	LAI _{max} M ² /m ²	Zh _{max} m	Zr _{max} m	A (°Cj)	D=2A (°Cj)
Valeurs mesurées	7.5	0.7	0.8	900	1800
Valeurs utilisées	8	0.9	1	1000	2000

2- Sensibilité du modèle

Dans cette partie, nous avons cherché à évaluer l'impact de la variation des principaux paramètres du modèle sur le cumul de l'évapotranspiration de la culture du blé, établie sur une période de 37 années (1967 à 2004). Nous analyserons dans cette partie le cumul des ETR pour la durée totale du cycle de la culture du blé seulement.

Les paramètres analysés sont ceux liés aux sols, à la physiologie de la plante et aux paramètres biophysiques (on retrouve la définition plus détaillée de chacun de ces paramètres analysés dans la liste complète de paramètres du modèle biophysique donnée en annexe I, tableau 1 et 2 et en annexe II.4a).

Tableau 5 : Paramètres du modèle Bilhyna analysés et intervalles de variation pris en compte dans l'analyse de sensibilité

Paramètres	Valeur référence	Variation		
		Taux de variation	Variation min	Variation max
Densité apparente (da)	1,5	10%	1,35	1,65
Humidité à la capacité au champ (H _{cc})	0,28	10%	0,25	0,31
Humidité au point de flétrissement (H _{min})	0,08	20%	0,64	0,96
Humidité maximale (H _{max})	0,2	20%	0,16	0,24
Humidité à saturation (H _{sat})	0,3	10%	0,27	0,33
Indice de surface foliaire (LAI _{max})	8	20%	6.4	9.6
Hauteur maximale du couvert (Zh _{max})	0,9	20%	0.72	1.08
Profondeur maximale des racines (Zr _{max})	1	20%	0.8	1.2
Proportion de LAI _{mor,t} final (TF_Lai)	0,5	30%	0,35	0.65
Résistance stomatique minimale (rs _{min})	80	30%	56	104
Résistance de structure du couvert (r ₀)	10	50%	5	15
Proportion (y ₀ /y _{max}) notée (Ky ₀)	0,01	50%	0.005	0.02
Durée totale du cycle du couvert (D)	2000 C	10%	1800	2200
Coeff du plateau qui fixe sa durée en °Cj (a)	0,1	50%	0.05	0.15
Température létale maximale (Tf)	33	+3C	30	36
Température moyenne du lieu (Tmoy)	13	+3C	10	16
Coeff d'Installation ou de tallage (Coef T)	0,1	50%	0.05	0.15
Coeff de contrainte hydrique (Alpha : α)	0,2	50%	0.1	0.3
Rayonem. Photosynt. actif maximal (PAR)	30	50%	45	15

Le tableau 5 (ci-dessus) résume les valeurs références des paramètres testés et leurs intervalles de variations possibles autour de cette valeur pour la culture du blé. Ces intervalles correspondent aux domaines des erreurs éventuelles possibles sur chacun de ces paramètres. Le jeu de données météorologiques utilisé s'étale sur 37 années et provient de la station météorologique de Dar El-Beida, à Alger.

La sensibilité du modèle est analysée à travers l'écart moyen par rapport à la valeur référence du cumul de l'évapotranspiration réelle sur la durée du cycle de culture du blé, tel que représenté dans la figure.29. Chaque paramètre est représenté par deux valeurs,

l'augmentation du paramètre et sa diminution. Aussi, sont également reportés les extremums des écarts enregistrés (maximum et minimum), entourant chacune des deux valeurs du paramètre analysé.

L'analyse montre quatre niveaux de sensibilité du modèle, variables selon les paramètres considérés. Globalement, le modèle reste fortement sensible à quatre paramètres liés au sol et à la végétation (paramètres de transpiration du couvert surtout), moyennement sensible à six paramètres liés une fois encore au sol pour trois d'entre eux et à la végétation pour les trois autres (paramètres de sol et de végétation) alors qu'il demeure peu sensible à cinq paramètres de croissance végétale et pas du tout sensible (ou très faiblement sensible) pour le reste des autres paramètres liés tous aux couverts.

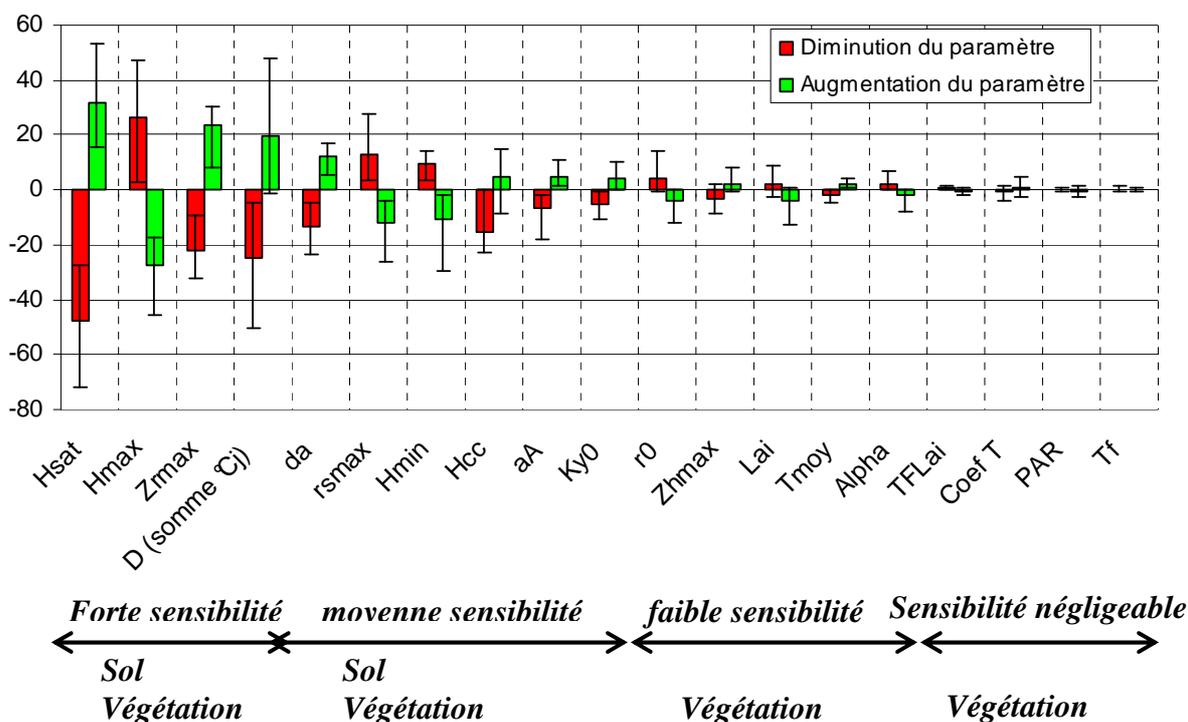


Figure 29. Sensibilité des différents paramètres d'entrée du modèle sur un cycle de culture depuis le semis jusqu'à la récolte établie sur 37 années.

L'analyse détaillée montre que les deux paramètres pour lesquels l'évapotranspiration semble la plus sensible sont le stock d'eau à saturation du sol, R_{sat} , et la réserve maximale du sol, R_{max} . Le premier étant défini par l'humidité à saturation du sol H_{sat} , qui fixe alors le contenu en eau maximum de celui-ci et son état de liaison à la matrice du sol à travers le potentiel thermodynamique de l'eau dans le sol. Plus l'humidité du sol à saturation est faible plus le contenu en eau du sol est faible lui aussi et plus les forces de rétention de l'eau dans le sol sont élevées ; ce qui entraîne des transferts d'eau dans le sol plus difficiles et donc un moins bon rééquilibrage des couches desséchées par suite de l'absorption des racines et donc une diminution de l'évapotranspiration. R_{max} , défini par H_{max} fixe, quant à lui, la disponibilité de l'eau du sol pour la plante ; plus H_{max} est faible (par rapport à sa valeur de référence), plus l'eau du sol est facilement disponible pour la plante et moins vite la restriction de la transpiration aura lieu. Une diminution de H_{max} conduit à une diminution de la réserve disponible R_{max} et donc à une augmentation du cumul annuel de l'évapotranspiration par rapport à la valeur de référence, soit un écart moyen positif des $\Delta\Sigma ET$; inversement une augmentation de H_{max} conduit à un écart moyen négatif des $\Delta\Sigma ET$.

En ce qui concerne la profondeur des racines Z_{rmax} et la somme des degrés jours du couvert (somme des températures physiologiques pour la période semis – récolte), ces

paramètres contribuent également, et de façon assez marquée, à la modification de la réserve en eau du sol disponible pour le couvert végétal pour ce qui est du premier paramètre, et à la durée dans le temps des prélèvements des racines et des échanges du couvert avec l'atmosphère pour ce qui est du second paramètre ; toute diminution de ces paramètres conduit à une valeur négative de $\Delta\Sigma ET$, et inversement.

Une sensibilité assez modérée du modèle est alors notée lorsque la densité apparente (d_a), la résistance stomatique maximale ($R_{s_{max}}$), l'humidité minimale (H_{min}) et l'humidité à la capacité au champ (H_{cc}) varient. Une diminution de d_a et H_{cc} réduit la réserve en eau disponible dans le sol pour la plante, ce qui influence directement l'évapotranspiration du couvert, aboutissant à une valeur négative des $\Delta\Sigma ET$ par rapport à la référence, et inversement. En revanche, toute diminution de $R_{s_{max}}$ et H_{min} améliore l'aptitude du couvert au transfert d'eau à travers les feuilles pour ce qui est du premier paramètre et augmente la réserve en eau et donc les disponibilités des prélèvements pour ce qui est du second paramètre, et inversement pour les deux.

Pour le reste des autres paramètres liés pour la plupart au couvert, l'impact reste faible, voir nul sur l'évapotranspiration.

3- Conclusion à la sensibilité du modèle et enseignements pratiques à retenir

On peut dire que sur le plan des échanges d'eau entre la plante et son environnement, le modèle reste très sensible aux paramètres H_{sat} qui gère l'état de liaison de l'eau dans le sol et H_{max} qui gère la disponibilité en eau du sol. Compte tenu de leurs poids sur le bilan de ces échanges, leur évaluation demeure donc importante pour pouvoir bien gérer les besoins en eau de la plante, particulièrement durant la phase de pleine croissance. Le modèle présente aussi une sensibilité vis-à-vis de certains paramètres physiologiques, tels que la profondeur maximale des racines $Z_{r_{max}}$ (qui détermine le volume du sol exploité et donc sa réserve en eau) et la somme des degrés jours de l'ensemble du cycle de développement du couvert D (qui augmente la durée des prélèvements dans le temps). A un degré de sensibilité moindre en retrouve d'une part, les paramètres de sol représentés par la densité apparente d_a , l'humidité à la capacité au champ H_{cc} et l'humidité minimale R_{min} qui limites les disponibilités en eau du sol au niveau des racines pour des valeurs faibles de d_a et H_{cc} mais élevées de R_{min} et d'autre part, le paramètre physiologique de résistance stomatique minimale ($r_{s_{min}}$) qui limite, quant à lui, les échanges au niveau des parties aériennes pour de fortes valeurs de ce paramètre.

En revanche, le modèle reste peu sensible aux paramètres de culture LAI_{max} et Zh_{max} : ceci souligne seulement qu'un ordre de grandeur de ces paramètres, en principe donné par les producteurs de semences, suffit. Cependant et suivant les types de couverts, ces grandeurs varient de zéro pour un sol nu à leurs valeurs maximales en pleine croissance (Zh_{max} varie de 0 à 3m selon les cultures, voir même jusqu'à 40 m pour les forêts et LAI_{max} varie de 0 à 8, voir jusqu'à 10 à 15 pour les forêts). Leurs valeurs maximales doivent donc être appréciées car leur poids devient très important dans l'établissement des bilans.

II. 6. Conclusion au chapitre modèle biophysique

L'approche biophysique présentée dans ce travail permet d'élargir le domaine d'application du modèle Bilhyna à un grand nombre de couverts végétaux, évoluant sous différentes conditions environnementales d'eau et de rayonnement mais aussi de sol et de climat. Ainsi, l'approche développée pour le suivi de la cinétique de croissance et de développement des couverts reste très proche de la réalité physiologique de leurs fonctionnements mais aussi de celle liée aux interventions humaines qui se trouve alors compatible avec l'échelle de notre modélisation, conformément à nos objectifs. Aussi il a été possible, compte tenu du formalisme adopté, de décrire adéquatement les principaux processus de fonctionnement de la plante en tenant compte de leurs réponses aux conditions limites du milieu, selon des fonctions biophysiques qui ne sont pas forcément linéaire.

Un certain nombre de variables nécessaires au fonctionnement du modèle ont été choisies car souvent assez maîtrisées pour les conditions du climat du sol, de la culture et des interventions techniques. L'objectif étant principalement de définir à priori tous les paramètres pour pouvoir, en fonction des grandeurs de forçages (mesurées ou produites par des simulateurs de climats), faire fonctionner Bilhyna pour n'importe quelle culture et succession de cultures, en incluant les interventions techniques souhaitées si possible de façon automatique. Bien sûr, la partie irrigation est conduite entièrement en automatique.

L'expérience n'est intéressante que pour tester en milieu donné et pour des cultures particulières, le bon fonctionnement global (test sur le bilan du sol et sur le LAI généralement). Il s'agit principalement de tester si un élément majeur d'une particularité de la culture (cas par exemple d'une oasis irriguée sur sol avec nappe de surface) est bien pris en compte par les paramètres introduits, entre autres ceux de la plante et ceux du sol.

CHAPITRE III.

EXPERIMENTATION ET VALIDATION DU MODÈLE BIOPHYSIQUE BILHÝNA

III. Expérimentation-validation

III.1. Expérimentation

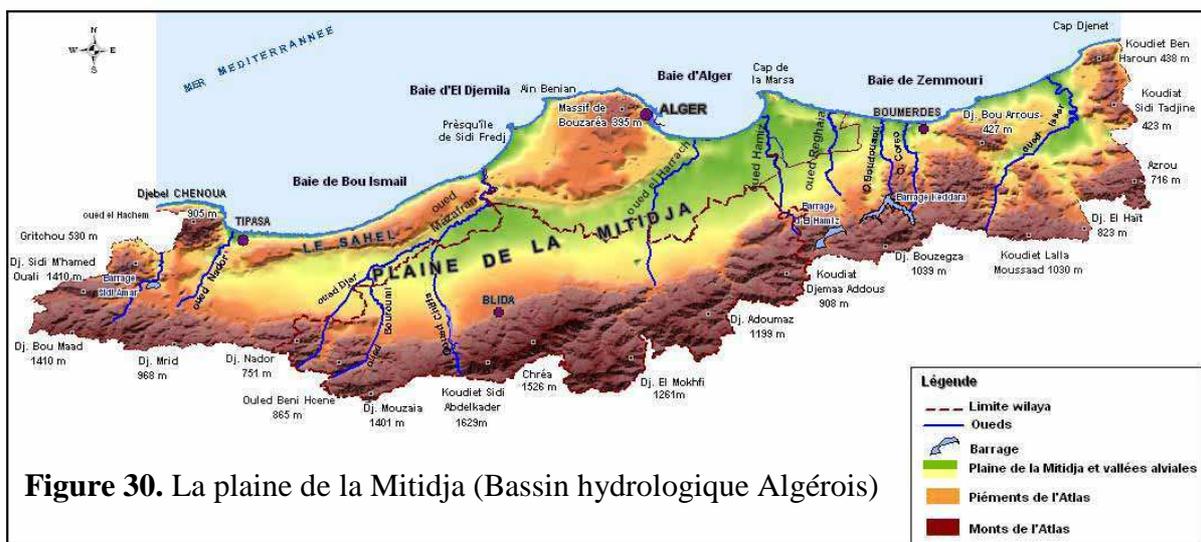
Nous décrivons dans ce chapitre les protocoles utilisés pour la mesure des différents paramètres de croissance des couverts et les résultats obtenus, après avoir présenté le site expérimental bien sûr. Ce suivi expérimental a pour seul objectif de constituer une base de données sur le LAIvert, Zh, Zr et le stock d'eau nécessaire à la validation des sorties du modèle Bilhyna et non pas d'apporter des éléments de compréhension sur les processus modélisés. Le modèle biophysique étant développé pour décrire la dynamique des couverts sous diverses conditions du milieu (alimentation hydrique et lumière), il devient nécessaire de tester ces trois paramètres de sortie du modèle (LAIvert, Zh et Zr) et de les comparer aux valeurs réelles obtenues durant ces expérimentations. Le suivi du stock d'eau dans le sol, quant à lui, permet de comparer les sorties du modèle Bilhyna, couplé au modèle développement-croissance, et d'évaluer la pertinence de son fonctionnement global sous des conditions variées du milieu (conditions variées, imposées expérimentalement).

III.1.1. Site expérimental

III.1.1.1 Localisation du site

Les cinq expérimentations ont eu lieu à la station expérimentale de l'ENSA d'Alger en étroite collaboration avec AgroParisTech et l'INRA de Thiverval-Grignon (France). L'importance agronomique de la plaine de la Mitidja (*Figure 30*), la disponibilité des données météorologiques ainsi que le potentiel de recherche de l'ENSA d'Alger (proche du site d'étude) ont fortement dicté notre choix pour ce site, situé à près de 5 km de la station météorologique principale du bassin algérois. Ses coordonnées géographiques sont les suivantes :

- Latitude 36° 43' Nord
- Longitude 3° 08' Est
- Altitude 48 m



III.1.1.2. Nature et caractéristiques des sols

Deux parcelles, notées I et II, ont donc servi à la conduite de ces expérimentations. Les sols de ces parcelles sont généralement profonds et de nature limono-argileuse pour la première et limoneuse à limono-sableuse pour la seconde, avec une pente de 5% et un drainage relativement bon (tableau 6). Leurs sols sont traversés par des horizons de nature argileuse, d'environ 30 à 60 cm d'épaisseur (parfois plus), à différents endroits et profondeurs, particulièrement sur la parcelle I. Notons au passage qu'une semelle de labour au voisinage de 30 cm de profondeur semble caractériser ces deux parcelles.

Tableau 6: Granulométrie dominante des deux parcelles expérimentales I et II

	Profondeur (cm)	% argile	% limon fin	% limon grossier	% sable fin	% sable grossier
Parcelle I	00 à 15	33.7	13.9	7.6	15.0	24.6
	15 à 55	62.1	8.77	4.13	11.0	17.35
	> 55	26.0	5.7	15.2	18.5	28.5
Parcelle II	00 à 45	11.25	17.15	5.90	17.15	44.89
	45 à 75	21.95	18.80	7.00	15.83	29.12
	> 75	38.85	22.15	4.30	12.61	19.60

(Source : Abid et Haddad, 1994)

III.1.2. Le matériel végétal

En Algérie, les rendements en blé atteignent les 12 qt en moyenne à l'hectare, ce qui place l'Algérie au premier rang des pays importateurs de blé dur. Le stress hydrique dû à l'irrégularité des pluies dans cette région en est la principale cause. L'ENSA d'Alger, à travers son département de génie rural, déploie de grands efforts afin d'introduire l'irrigation de complément sur cette culture pour régulariser les rendements annuels, compte tenu de ces conditions. Il était donc important pour l'ENSA d'Alger que le blé soit considéré comme principale culture d'étude dans ce travail (quatre expérimentations : deux sur la variété *vitron* et deux autres sur la variété *semito*), bien que la toute première expérimentation réalisée durant l'été 1999 (la première des cinquième expérimentation au total) ait porté sur la culture du sorgho (variété '*sorghum bicolor (L) Moench*'). Culture du sorgho choisie pour la facilité de son suivi sur pieds (pour ce qui est de sa partie aérienne) et sans destruction des plants (tableau 7).

Tableau 7. Caractéristiques du matériel végétal utilisé et dates de semis

Cultures	Variétés		Parcelle N°	Campagne année	Date de semis
	Nom	Origines et caractéristiques			
Sorgho	Sorghum bicolor (L) Moench		II	Été 1999	4-juil-1999
Blé	Vitron (HOGGAR)	Originaire d'Espagne, céréale d'hiver à cycle précoce, paille demi-pleine et courte, période de semis entre le 15 novembre et fin décembre	I	1999-2000	28-déc-1999
			II	2001-2002	12-jan-2002
	Semitto	Originaire d'Italie, cycle précoce, paille moyenne, période de semis entre le 15 novembre et fin décembre	II	2000-2001	19-déc-00
			II	2003-2004	06-déc-2003

Le sorgho a donc permis de tester le modèle sous des conditions de couvert différentes de celle du blé (le sorgho étant moins sensible au stress hydrique que le blé et présentant par rapport à celui-ci des caractéristiques physiologiques et morphologiques bien distinctes) et ainsi de valider son caractère générique (du modèle), quel que soit le type de culture.

III.1.3. Dispositifs, méthodes et conditions expérimentales :

III.1.3.1. Dispositifs et protocoles expérimentaux

Chaque année, une seule expérimentation a lieu. Deux régimes hydriques témoins (références) sont alors considérés : le premier est soumis aux seules conditions pluviales, noté traitement Pluv, alors que le second reçoit, en plus des pluies, des apports en eau supplémentaires par irrigation de façon à assurer durant tout le cycle de croissance du blé un confort hydrique élevé (évapotranspiration proche de l'ETM) et noté traitement ETM. Ces apports par irrigation sont calculés sur la base d'un bilan d'eau décadaire entre les pluies et les pertes par évapotranspiration de la culture. Ces dernières sont déduites des ETPpenman, pondérées par un coefficient cultural K_c , soit ($K_c * ETPpenman$), en fonction des stades de développement atteints par la culture. Le jeu de données météorologiques journalières nécessaire au calcul des ETPpenman provient de la station météorologique d'Alger et comprend l'humidité de l'air, le vent, l'insolation et la température de l'air, de même que la pluie pour l'établissement de ce bilan.

Deux autres traitements aux confort hydriques intermédiaires avec, en plus des pluies, des irrigations ponctuelles à certains stades critiques pour le blé, notés ETR1 et ETR2, sont aussi mis en place. Le cumul des irrigations par traitement et par année expérimentale est résumé dans le tableau 8 (plus de détails sur le fractionnement des ces irrigations sur l'ensemble du cycle de développement sont donnés dans l'annexe III.1, tableau 1 pour le sorgho et tableaux 2, 3 et 4 pour le blé)

Tableau n°8. Totaux des apports d'eau par irrigation (par traitement et par année expérimentale en mm)

Traitements	Sorgho 1999	Blé 2000	Blé 2001	Blé 2002	Blé 2004
ETM	400	238	112	128	0
ETR2	350	114	55	115	0
ETR1	276	67	85	65	0
Pluv	96	27	0	0	0

La parcelle expérimentale est subdivisée en plusieurs blocs, renfermant chacun les quatre traitements définis ci-dessus. Le nombre de blocs arrêté par année expérimentale (*Figure 31*) diffère selon les moyens matériels mis à notre disposition (matériels de mesures, superficies des parcelles expérimentales allouées au projet) :

- (i) un bloc répété une seule fois pour le sorgho été_1999, soit deux blocs en tout, de quatre traitements chacun
- (ii) un bloc répété deux fois pour le blé 2000, 2002 et 2004, soit trois blocs en tout, de quatre traitements chacun
- (iii) et en fin un bloc répété trois fois pour le blé 2001, soit quatre blocs en tout, de quatre traitements chacun.

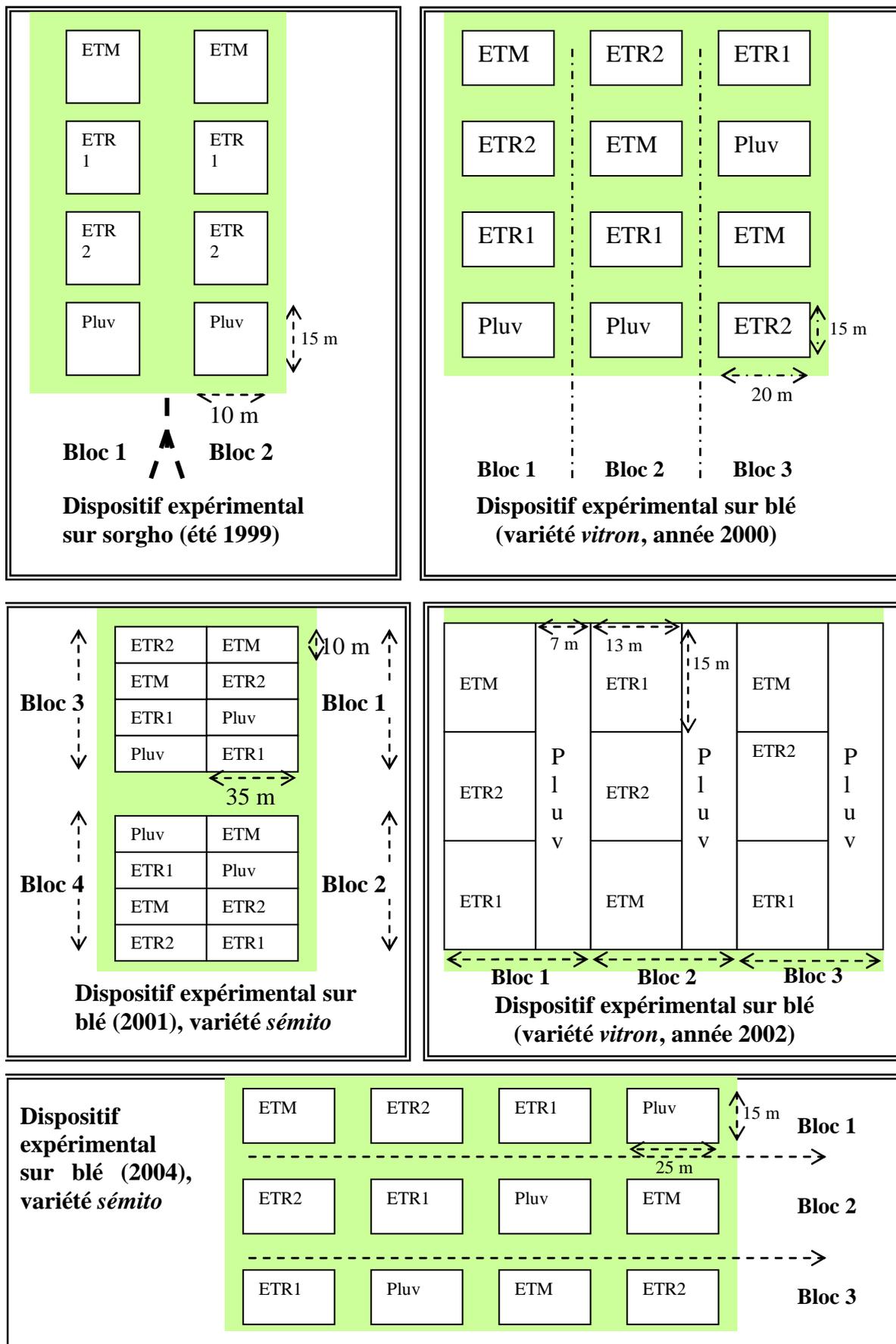


Figure 31. Dispositifs expérimentaux établis durant les cinq années d'essais à l'ENSA d'Alger

III.1.3.2. Méthodes et paramètres de mesures

* L'humidité du sol a été suivie par gravimétrie le long de la profondeur du sol et un seul profil est alors réalisé par traitement (sans répétition). Ces mesures ont été complétées lorsque cela était nécessaire par des mesures neutroniques réalisées avec un humidimètre à neutrons, modèle TROXLER 4300 (photo 1 sur le côté). Ces dernières sont déduites de la courbe d'étalonnage de l'humidimètre utilisé, établi après un suivi des mesures à la fois gravimétriques et neutroniques des humidités d'un sol soumis à une cinétique de dessèchement continue depuis l'humidité à la capacité au champ jusqu'au maximum de son dessèchement (au-delà de la réserve minimale).



Photo n°1 . Humidimètre à neutrons (modèle TROXLER 4300) ayant servi pour le suivi des humidités du sol en profondeur

* Les paramètres de croissance du couvert ayant fait l'objet de mesures durant les cinq expérimentations, sont l'indice foliaire (lai), la hauteur des couverts (Zh) et la profondeur de l'enracinement (Zr). Ces mesures sont répétées deux fois pour le Lai et Zh et sans répétition la profondeur des racines. Leurs valeurs maximales sont indispensables pour le fonctionnement du modèle et sa validation et représentent ainsi les paramètres d'entrées du modèle.

- La méthode, très classique, retenue pour approcher les valeurs du LAI est basée sur la mesure de la surface foliaire, soit la longueur (L) et la largeur (l) des feuilles. A chaque mesure, trois échantillons de plants sont alors prélevés aléatoirement sur chacun des quatre traitements imposés (la taille de l'échantillon est de 2 m linéaire de long pour certaines années et parfois une surface carrée de 0,5 m de côté, certaines autres années). Cette méthode conduit à une valeur K_{LAI} , telle que la surface vraie mesurée sur ces feuilles est donnée par : $S=L \cdot l \cdot K_{LAI}$. De ce fait, ces mesures sont faites sur une fraction seulement du poids de l'échantillon prélevé et le rapport de



Photo 2. Fosse réalisée pour le suivi de la progression des racines en profondeur

ponds frais permet de rapporter la mesure de la surface foliaire à l'ensemble de l'échantillon. Ces mesures sont en suite rapportées en m^2 de surface de végétation par m^2 de sol occupé. La valeur de $K_{LAI} = 0,65$ ainsi déterminée est utilisée pour l'estimation de nos LAI sur blé. Pour le sorgho, K_{LAI} n'a pas fait l'objet de détermination, compte tenu de la méthode de mesure sur pieds (non destructrice) utilisée sur cette culture (la mesure de la surface vraie est rendue difficile sans la destruction des plants et seuls les dimensions en longueur et en largeur des

feuilles étaient possibles). La valeur de 0.73 établie par Aidaoui en 1994, a été utilisée pour l'estimation des Lai du sorgho.

- La mesure de la hauteur de la tige Z_h , comprise entre le dernier organe du plant (feuille, organe reproducteur etc.) et la base de la tige, est réalisée à différents moments du développement du couvert. Mesure répétée trois fois et réalisée sur les échantillons prélevés servant aux mesures du Lai.

- La profondeur des racines, ayant fait l'objet d'un suivi sur la culture du blé seulement, a été mesurée en parallèle sur le traitement ETM (confort hydrique le plus élevé) et sur le traitement Pluv (confort hydrique le plus faible). Une fosse de 1 m de largeur de chaque côté est ainsi creusée sur une profondeur de 1.5 m, évoluant progressivement depuis le sol en fonction de la croissance en profondeur des racines du couvert (photo n°2). Une grille quadrillée a été utilisée le long de cette profondeur pour faciliter le comptage et la localisation d'impacts des racines sur les deux traitements en question (ETM et Pluvial).

- Un suivi phénologique, depuis le semis jusqu'à la fin de la sénescence sur les deux cultures, a été réalisé. Ce suivi permet de mettre en évidence les caractéristiques génotypiques du matériel végétal étudié, telle que la durée des stades constituant le développement total de la culture (D) : élément important du modèle Bilhyna (paramètre d'entrée du modèle) qui prend en compte sa variabilité tant au niveau des espèces que des variétés.

III.1.3.3. Conditions pluviométriques de la période d'essai

L'analyse des cumuls des précipitations reçues sur la période d'essai (issues d'un jeu de données climatiques journalières de janvier 1999 à décembre 2004, provenant de la station météorologique de Dar-El-Beida) montre que le caractère aléatoire et fluctuant des précipitations reste le principal élément conditionnant les potentialités de production de la région. Le cumul des pluies annuelles enregistré durant cette période demeure pour tous les essais en deçà de la moyenne annuelle de 657 mm établie sur 37 années (de 1967 à 2004). Mieux encore, le cumul annuel des années 2000, 2001 et 2002 ne dépasse guère les 490 mm (valeur considérée comme la limite de référence d'une année sèche pour la région de la Mitidja) dans les meilleurs des cas, et elles sont donc considérées comme années sèches ; ce qui dénote la sévérité des conditions pluviométriques ayant caractérisé ces trois années d'essais (*Figure 32*).

La répartition plus ou moins adéquate de ces pluies durant la période de plein développement foliaire a, tout de même, permis au couvert du blé d'évoluer dans des conditions acceptables pour l'année 2004, un peu moins pour l'année 2001 (*Figure 32*), malgré les conditions pluviométriques non favorables ayant caractérisé la période avant le semis (150 mm de pluies seulement enregistrées avant le semis; ce qui n'a pas favorisé la reconstitution de la réserve en eau du sol).

Le contraire est alors observé sur les deux autres années expérimentales réalisées sur le blé, soit 2000 et dans une moindre mesure sur 2002, où l'on note des potentialités importantes pour un bon remplissage du réservoir en eau du sol à l'automne et donc de bonnes conditions hydriques pour le démarrage de la culture, compte tenu des quantités importantes de pluies reçues avant le semis (*Figure 32*). Ce qui n'a pas été le cas durant l'ensemble du cycle de développement du blé (semis à la récolte) où l'on a enregistré près de 80 mm de pluie pour l'année 2000 et moins de 140 mm en 2002. Situation qui nous a contraints à apporter durant l'essai 2000 une irrigation de 27 mm au stade plein tallage sur les quatre traitements mis en place, afin de permettre au couvert de passer le cap d'un stress

momentané qui aurait pu nuire à la poursuite de l'essai (la différenciation des traitements hydriques a été reportée bien après le stade tallage).

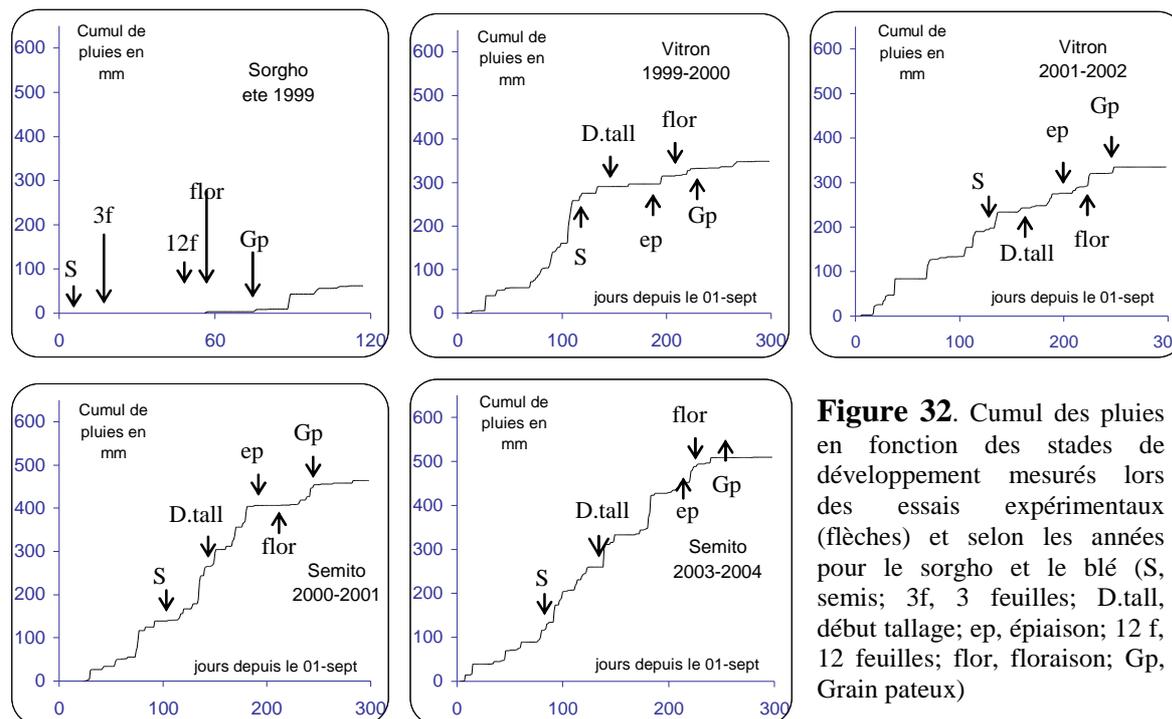


Figure 32. Cumul des pluies en fonction des stades de développement mesurés lors des essais expérimentaux (flèches) et selon les années pour le sorgho et le blé (S, semis; 3f, 3 feuilles; D.tall, début tallage; ep, épiaison; 12 f, 12 feuilles; flor, floraison; Gp, Grain pateux)

L'analyse montre aussi que la quantité de pluie reçue durant la période printanière, coïncidant généralement avec la phase floraison et la phase de sénescence du blé, demeure faible (année expérimentale 2001), voir presque nulle dans cette région (années expérimentales 2000 et 2004) comme le montre la figure 32 après le stade floraison; ce qui n'est pas sans conséquence sur les rendements finaux pour cette culture dans la mesure où le déroulement de la phase sénescence se trouve alors accélérée par le stress hydrique, pénalisant fortement la migration des réserves vers les grains.

L'agriculture dans la région de la Mitidja reste tributaire de la pluviométrie et n'est donc pas à l'abri d'un stress hydrique qui peut s'inviter à tout moment durant la période humide (période de plein développement foliaire du blé). Un ou plusieurs compléments d'eau apportés par irrigation seraient plus que nécessaires si on veut régulariser les rendements annuels, à condition de bien évaluer les besoins de cette culture et bien gérer ces apports, bien sûr. Gestion qui repose sur une évaluation adéquate du niveau de croissance des couverts.

III.1.4. Résultats expérimentaux

Les résultats présentés ci-dessous sont issus des mesures réalisées durant les cinq années expérimentales que nous avons conduites à l'ENSA d'Alger (1999 à 2004). Ils portent sur deux types de mesures : (i) le stock d'eau du sol à travers les suivis de la cinétique hydrique in-situ des sols des parcelles (rappelons que le suivi des profils hydriques réalisé durant ces quatre années expérimentales servira à établir le stock d'eau du sol entre la surface du sol et la profondeur 90 cm pour tous les traitements en vue de la validation des sorties du modèle Bilhyna.) et (ii) la croissance du couvert à travers les suivis de trois paramètres de croissance (le Lai, la hauteur du couvert Zh et la profondeur des racines Zr).

Nous verrons dans un premier temps les résultats relatifs à la culture du sorgho puis nous aborderons dans un second temps ceux relatifs à la culture du blé.

III.1.4.1. Sorgho

Le sorgho est la première culture ayant fait l'objet d'étude dans le but d'approcher au maximum les paramètres morphologiques (croissance), phénologiques (développement) mais aussi physiques (humidité du sol). Les conditions climatiques, ayant caractérisé cette période d'essai, ont été très favorables au développement de la culture, à l'exception du facteur pluie dont la raréfaction à cette époque de l'année est très caractéristique de cette région (*Figure 32*). L'irrigation a donc été nécessaire durant les premiers jours du semis pour permettre le démarrage de la culture mise en place sur un sol presque totalement asséché en surface mais aussi en profondeur par le précédent cultural. Quatre irrigations de 100 mm au total ont donc été apportées durant les dix premiers jours sur les quatre traitements de l'essai. Suite à cela, la différenciation des traitements a commencé (tableau 1, annexe III.1).

1- Cinétique hydrique

Seuls quatre profils hydriques ont été réalisés sur chacun des traitements hydriques imposés à la culture durant cette expérimentation (*Figure 33*). Bien peu nombreux, ces profils permettront tout de même de faire une comparaison avec les sorties du modèle pour fin de validation.

Le suivi des ces profils hydriques du sol montre une cinétique continue de dessèchement classique sur le traitement Pluv depuis l'arrêt des irrigations au 10^{ième} jour après le semis jusqu'à la fin des mesures, ramenant l'humidité du sol à son niveau le plus bas, comparé aux autres traitements, particulièrement sur les premiers 50 cm (*Figure 33*, traitement Pluv).

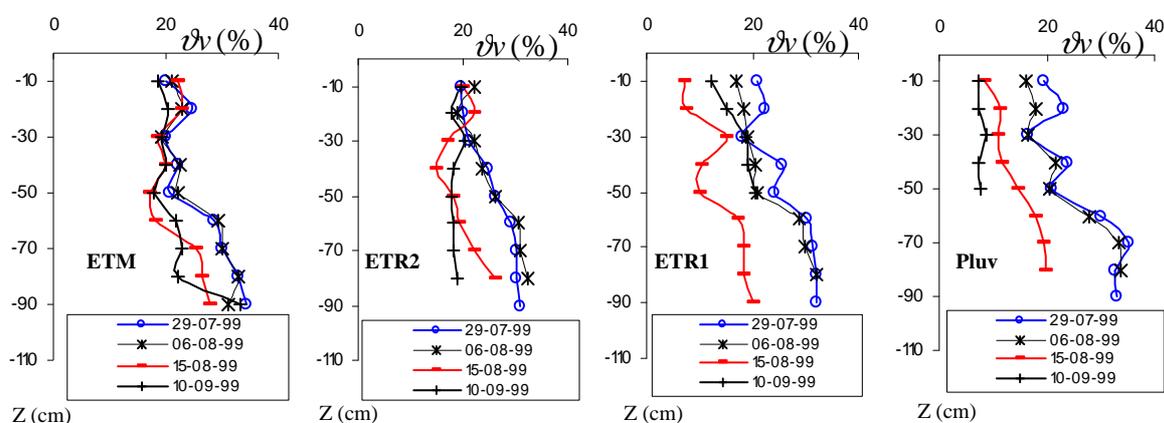


Figure 33. Mesures des profils d'humidités réalisés sur les quatre traitements (essai sur sorgho été_1999), à partir du 29-07-1999

Le traitement le mieux alimenté en eau, ETM, montre un profil relativement stable (objet de ce traitement) après chaque irrigation, se desséchant bien sûr entre deux irrigations. Ce dessèchement, plus ou moins prononcé en profondeur, montre en toute rigueur que les ETM calculées étaient un peu trop faibles (*Figure 33*, traitement ETM).

Entre ces deux traitements, on retrouve celui de l'ETR2 assez proche de la cinétique hydrique de l'ETM depuis le semis jusqu'au dernier profil (07/09), soit le stade grain pâteux, du fait des irrigations répétées sur ce traitement avec un dessèchement profond, un peu plus prononcé que sur l'ETM, dû probablement à la période de non irrigation (*Figure 33*, traitement ETR2).

Pour l'ETR1, la différence avec le pluvial est faible (profil à la mi-août, soit plein développement) compte tenu de l'arrêt des irrigations après le 18 juillet. Seule la reprise des irrigations du 6 au 18 août a permis une reprise de la croissance foliaire, très vite freinée par la sénescence (très faible consommation en mi-août malgré les 50 mm d'eau apportés puisque celle-ci se retrouve toujours dans le sol comme le montre la différence dans le dernier et l'avant dernier profils sur ce traitement (*Figure 33*, traitement ETR1). Les stocks d'eau sur une profondeur de 80 cm de sol, établis sur chacun des traitements pour cette culture, sont donnés en annexe III.2, *Figure 2A*

2- Cinétique de croissance

L'analyse des courbes expérimentales du LAI, depuis le début de sa croissance jusqu'à la fin de sa sénescence, montre que celui-ci (LAI) évolue toujours en forme de cloche, avec une phase croissante de plein développement foliaire, un palier (phase de reproduction apparaissant à mi-août) suivi du début de la phase de sénescence (*Figure 34A*). Pour la hauteur des plants (Zh), seules les deux premières phases du LAI sont observées puisque Zh reste constant après le palier et ne subit donc aucune réduction durant la phase de sénescence du LAI (*Figure 34B*). La profondeur des racines n'a pas fait l'objet de mesures durant cet essai.

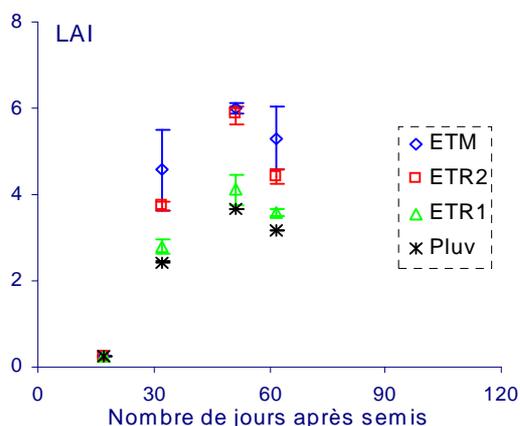


Figure 34A. Mesure de l'indice de surface foliaire LAI sur Sorgho (*Expérimentation été-1999*)

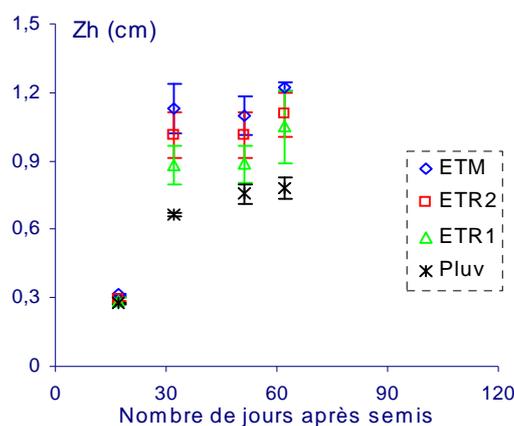


Figure 34B. Mesure de la hauteur du couvert Zh sur Sorgho (*Expérimentation été-1999*)

Cette analyse montre une évolution en forme de S sur les courbes de LAI et Zh, entre le semis et la fin de la croissance foliaire. Courbe assez caractéristique de l'ensemble des végétaux supérieurs. Un même début d'évolution, mais cette fois-ci en forme inverse, est alors observé sur le LAI seulement durant sa sénescence bien que le manque de points expérimentaux durant cette phase restent insuffisants pour confirmer cette forme d'évolution.

La réponse de la croissance du couvert aux différentes conditions hydriques imposées à la culture reste plus ou moins marquée selon l'intensité, la durée et le moment de l'installation du stress hydrique. L'analyse montre qu'au 32^{ème} jour après semis, une évolution assez différente apparaît entre les traitements ETR1 et le Pluv d'un côté, et l'ETM et l'ETR2 de l'autre, compte tenu de l'arrêt des irrigations sur les deux premiers traitements après le 18/07. De plus, cette réduction du LAI se trouve très liée au niveau de confort hydrique imposé sur chaque traitement (*Figure 34A*). On a alors :

$$LAI_{ETM} > LAI_{ETR2} > LAI_{ETR1} > LAI_{Pluv}$$

Il en est de même pour la hauteur des plants qui continue de croître jusqu'à la fin de la phase reproduction pour tous les traitements avec, là aussi, une apparente réduction à cause du stress dû à l'arrêt des irrigations sur les traitements (26 juillet et 15 août), même pour le traitement ETM (irrigation légèrement déficiente, puisqu'il n'y a pas consommation d'eau du sol en profondeur). On a, là aussi (*Figure 34B*):

$$Z_{\text{ETM}} > Z_{\text{ETR2}} > Z_{\text{ETR1}} > Z_{\text{Pluv}}$$

3- Suivi phénologique et développement (temps physiologique en °Cj)

Seul le traitement de référence ETM a été concerné par le suivi phénologique (du semis au stade grain pâteux). Le suivi phénologique en continu du couvert (température à partir de T_0) à partir du semis montre que le stade levée est atteint après une somme de température de 70 °Cj, que le stade de trois feuilles a nécessité 137 °Cj, que le stade floraison qui coïncida avec le maximum de croissance foliaire cumulée apparaît vers 875 °Cj et que le stade grain pâteux est atteint pour 1360 °Cj. Si l'on considère que la période allant du semis jusqu'au stade floraison représente la moitié du parcours de développement de la culture, la durée nécessaire pour l'accomplissement de l'ensemble du cycle de développement du sorgho serait alors de 1700 °C à 1800 °C/j.

Enfin, l'essai montre que la croissance des deux paramètres du couvert suivis (Lai et Zh) évolue selon une courbe en S à partir de la mise en place de son système aérien (stade trois feuilles environ), soit après 100 à 130 °Cj. La croissance maximale du LAI a atteint un indice de 6 après 875 °Cj, sous des conditions hydriques convenables (ETM), alors que Zh a atteint au bout de la même période 120 cm environ. Le poids du stress hydrique a été important sur les traitements les moins irrigués, causant alors un déficit de croissance du Lai (atteignant à la pleine croissance des feuilles jusqu'à 40% environ par rapport à l'ETM) et une accélération de la phase sénescence et donc de l'ensemble du cycle de développement.

III.1.4.2. Blé

A compter de la campagne année 2000, la culture du blé a constitué notre principale culture d'étude. Deux campagnes de mesures sur la variété *Vitron* (années 2000 et 2002) et deux autres sur la variété *Semito* (années 2001 et 2004) ont donc été réalisées. Le tableau 8 résume les totaux des compléments en eau apportés par irrigation pour différencier les quatre traitements d'un bloc (plus de détails sur les irrigations par traitement et par année expérimentale sont donnés en annexe III.1, tableaux 2, 3 et 4). Les stocks d'eau sur une profondeur de 90 cm de sol, établis par traitement et par année expérimentale, sont donnés en annexe III.2, *Figures 2A* et *2B*.

1- Cinétique hydrique :

Essai 2000 :

Le suivi des profils hydriques montre un dessèchement du sol évoluant en deux temps :

Le premier étant identique pour tous les traitements, concerne les 30 à 40 premiers cm du sol. En effet, en début de croissance le système racinaire est peu développé en profondeur, la présence d'une semelle de labour à 30 cm de profondeur force les racines à exploiter cette tranche de sol au maximum. Un gradient d'humidité croissant, assez visible sur l'ensemble des traitements au 70^{ème} jour après semis (*Figure 35*), est alors observé dans cette tranche de sol depuis la surface (humidité voisine de H_{min}) jusqu'à la profondeur du labour (Humidité voisine de H_{max}). Gradient dû à un défaut de pluie important durant cette phase et fortement

amplifié par les prélèvements des racines bloquées par une semelle de labour à 30 cm de profondeur (voir plus loin la figure 39 sur la croissance des racines en profondeur).

La seconde phase de dessiccation a lieu à partir du 70^{ème} jour après semis, soit après que les racines ont pu traversé la semelle de labour, et s'étend aux couches de sol plus profondes et plus humides. Ceci est particulièrement visible à 60 cm de profondeur sur le traitement Pluv où l'humidité du sol passe de 38% au 70^{ème} jour après semis à 25% au 120^{ème} jour après semis pour la même profondeur, contrairement au traitement ETM où l'on a noté une moins grande sollicitation des couches profondes, compte tenu des irrigations assez régulièrement apportées sur ce traitement.

Il convient aussi de signaler une légère remontée capillaire sur le traitement Pluv aux profondeurs 90 et 100 cm entre le 94^{ème} et le 120^{ème} jour après semis puis aux profondeurs 60 et 70 cm aux 122^{ème} jour après semis (Figure 35).

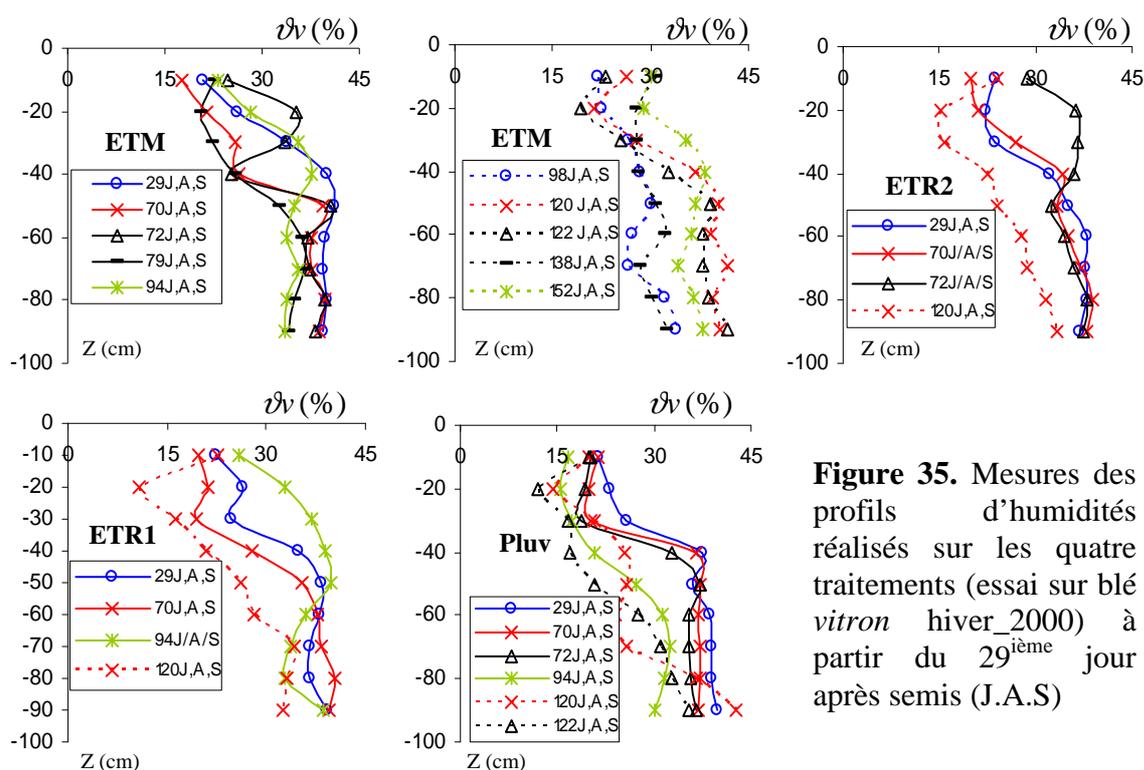


Figure 35. Mesures des profils d'humidités réalisés sur les quatre traitements (essai sur blé vitron hiver 2000) à partir du 29^{ème} jour après semis (J.A.S)

Essai 2001 :

L'essai a été caractérisé depuis le semis jusqu'à 75 jour après semis par une abondance de pluie qui a totalisé plus de 200 mm, maintenant un niveau de réserve d'eau assez voisin de Rmax pour tous les traitements durant cette période (Figure 36). La cinétique de dessèchement continue, assez visible sur l'ensemble des profils du sol des différents traitements entre le 75^{ème} jour et le 101^{ème} jour après semis, reste cependant moins marquée sur le traitement ETM qui a reçu deux apports d'eau par irrigation (40 mm au total). Ce dessèchement reste, pour le moins, assez prononcé sur les 40 premiers centimètres où l'humidité reste très proche de la valeur minimale (15%) en moyenne à cette profondeur.

Alors que la cinétique de dessèchement du sol se poursuit pour le traitement Pluv jusqu'à la fin de la maturation, atteignant un niveau d'humidité assez bas (particulièrement dans la tranche de sol allant de 0 à 60 mm), celle de l'ETM reste acceptable pour le couvert (proche de Hmax) suite aux irrigations apportées régulièrement jusqu'au 131^{ème} jour après semis, avant de chuter à son tour. Sur les deux traitements intermédiaires ETR2 et ETR1, la cinétique de dessèchement demeure, là aussi, assez visible mais reste, pour le moins, plus

forte que sur le traitement Pluv, compte tenu du complément d'eau apporté au 102^{ème} jour après semis sur ces deux traitements (55 mm sur ETR2 et 85 mm sur ETR1). A noter qu'une remontée capillaire est observée sur le traitement ETR2 pour la profondeur allant de 70cm à 90 cm entre le 131^{ème} et le 144^{ème} jour après semis.

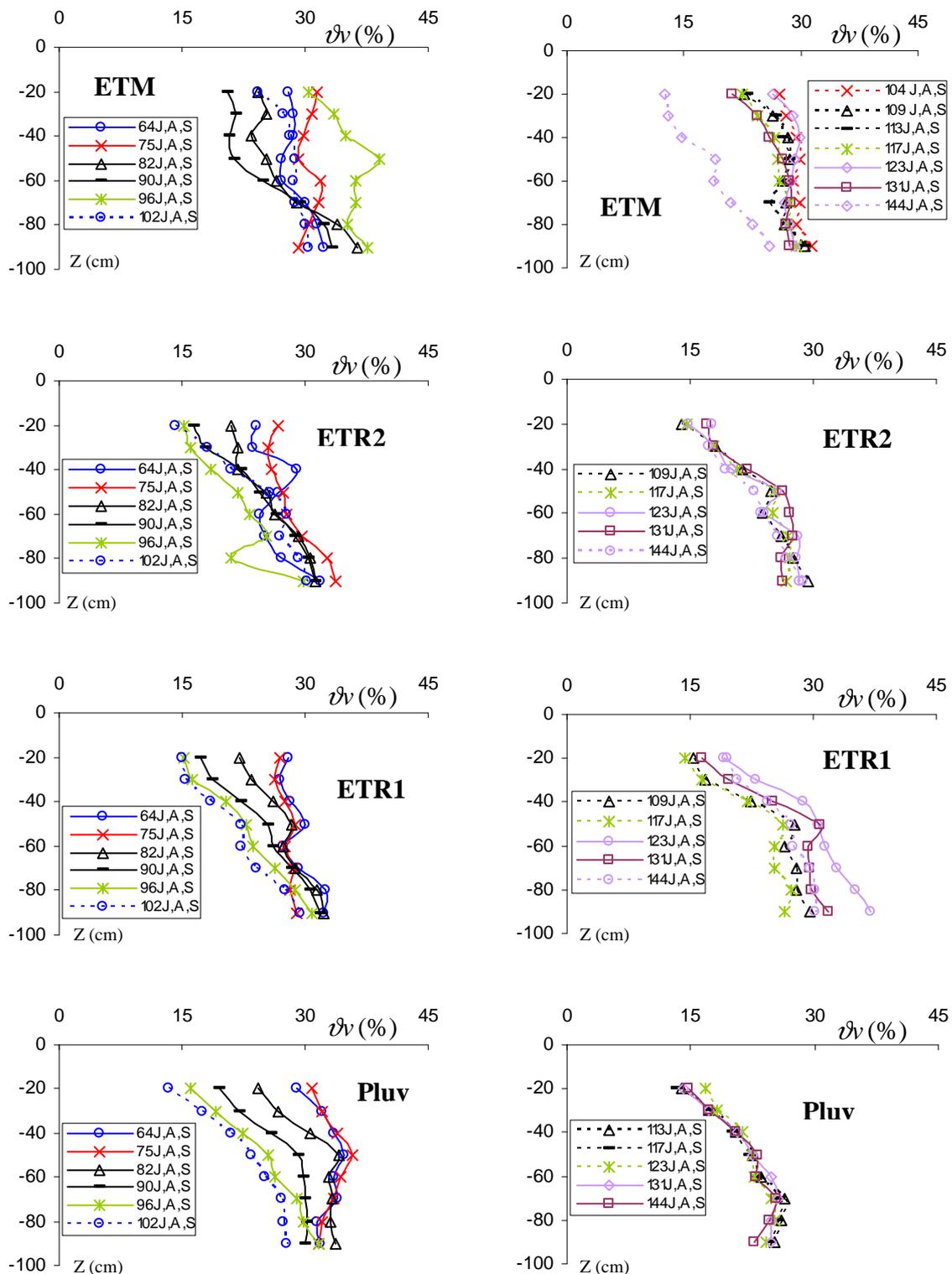


Figure 36. Mesures des profils d'humidité réalisés sur les quatre traitements (essai sur blé *sémito* hiver_2001) à partir du 64^{ème} jour après semis (J.A.S)

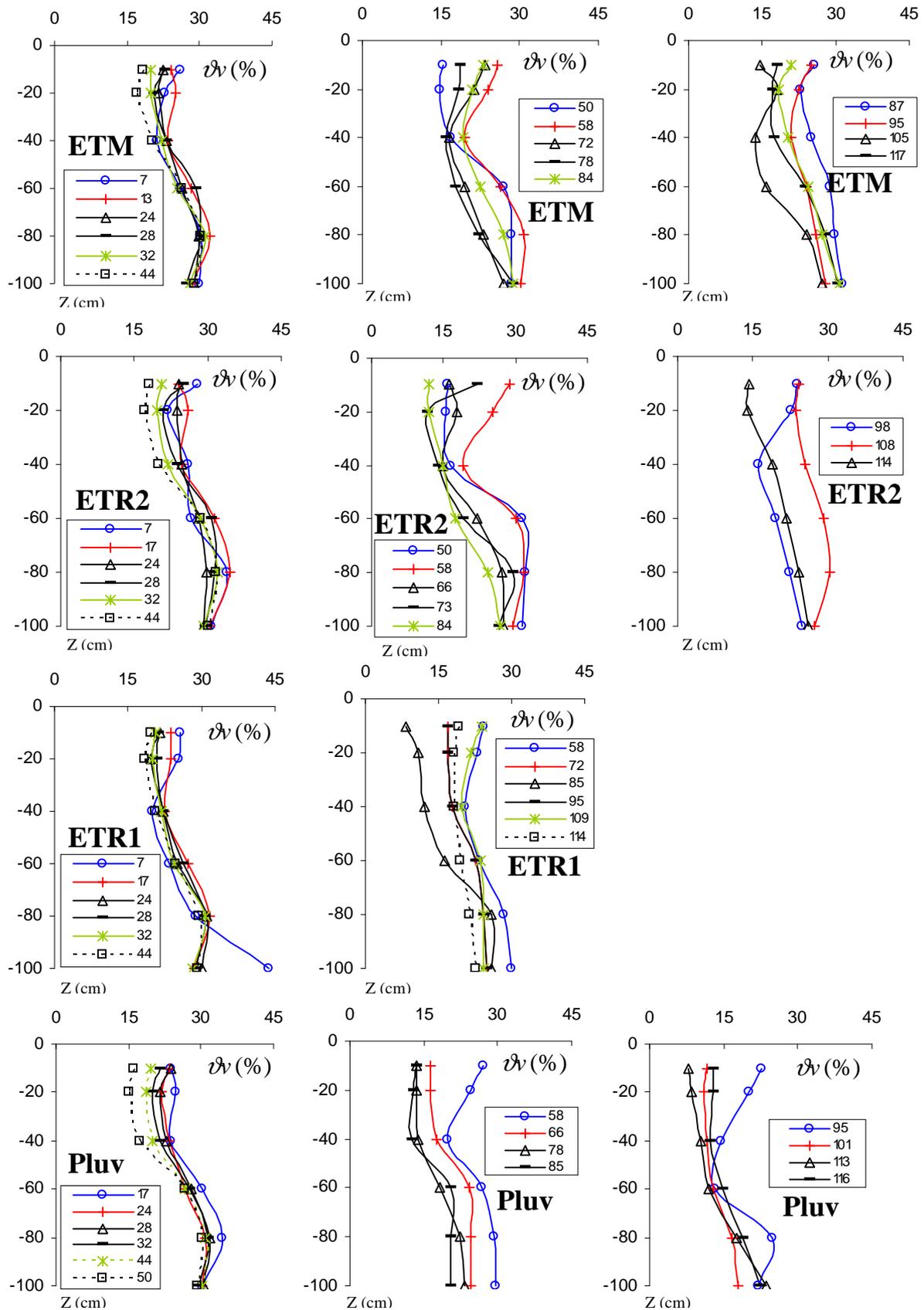


Figure 37. Mesures des profils d'humidité réalisés sur les quatre traitements (essai sur blé *vitron* hiver_2002) à partir du 7^{ième} jour après semis (J.A.S)

Essai 2002 :

Une forte cinétique de dessèchement du sol est notée depuis les semis jusqu'au stade LAmax, due principalement à un défaut de pluie durant cette période (85 mm au total). Des valeurs d'humidité minimale sont alors enregistrées à la fin de cette période sur tous les traitements, depuis la surface du sol jusqu'à 80 cm de profondeur et même au-delà, comme c'est le cas pour le traitement Pluv (*Figure 37*). Le stress hydrique a donc été fortement présent durant cette phase de développement, particulièrement à la fin de cette période, y compris le traitement ETM qui n'a reçu qu'une seule irrigation (16 mm) à ce stade de développement.

L'amélioration non négligeable du confort hydrique, suite aux pluies reçues au début de la phase de sénescence, n'a pas duré longtemps et le dessèchement a vite repris le dessus, mais de façon moins prononcée sur le traitement ETM qui maintient son niveau d'humidité entre Rmax et Rmin, grâce à plusieurs irrigations régulières durant cette phase (112 mm au total). Ce qui n'a pas été le cas des traitements qui n'ont reçu que deux irrigations au milieu et à la fin de la phase en question (115 mm pour le traitement ETR2 et 65 mm pour le traitement ETR1), encore moins pour le traitement sans irrigation qui finit sa croissance avec une disponibilité totalement nulle (*Figure 37*). Là aussi, on peut dire que le stress hydrique a marqué la période printanière (coïncidant avec la phase de sénescence du couvert) sur les traitements ayant reçu peu ou pas d'irrigation, compte du peu de pluies (52 mm) enregistrées durant cette période. comme c'est le cas pour le traitement Pluv où l'on note une légère réalimentation en eau du profil au 134^{ème} jour après semis, à la profondeur de sol allant de 80 à 100 cm.

Essai 2004 :

L'analyse des profils d'humidité montre que la situation hydrique était satisfaisante durant la période allant du semis au plein développement foliaire, compte tenu de l'abondance des pluies durant cette période (254 mm). En effet, le dessèchement évolue peu sous le poids des prélèvements et reste pour le moins assez éloigné des valeurs d'humidité minimales durant toute cette période (*Figure 38*), ce qui rend compte du bon confort hydrique dans lequel le couvert évolue. Il n'est toutefois pas exclu qu'un léger stress a pu affecter la culture au démarrage, faute d'un manque de remplissage du réservoir eau à l'automne (manque de pluies à l'automne 2004 assez visible sur la *Figure 32*).

Malgré un cumul pluviométrique faible de 81mm entre la floraison et la maturation, l'humidité du sol s'est maintenue à des niveaux élevés durant une bonne partie de la phase de sénescence, avant de commencer à chuter en fin de cycle ; ce qui a été sans trop de dommage sur la culture.

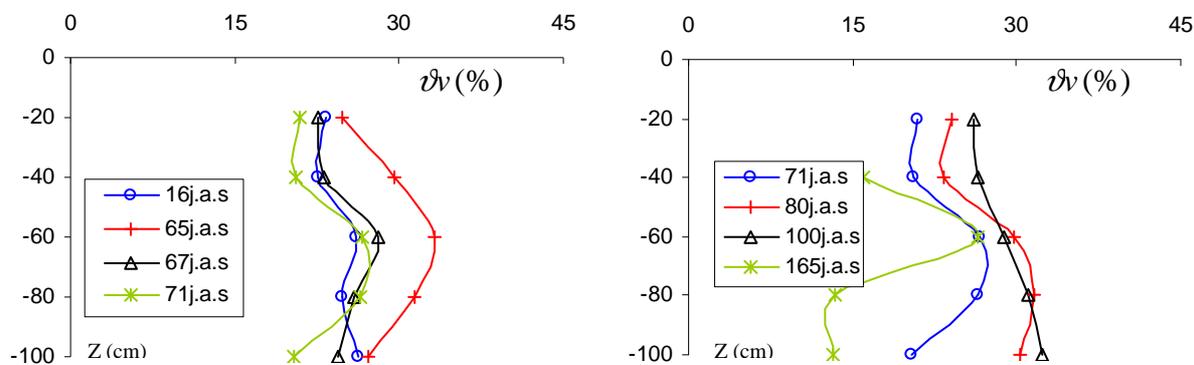


Figure 38. Mesures des profils d'humidité réalisés à partir du 16^{ième} jour après semis (J.A.S), sur le seul traitement pluvial conduit durant cet essai sur blé *sémito* (hiver_2004)

Finalement, on peut dire que le stress hydrique reste une composante majeure à prendre en compte dans toutes stratégies de gestion de l'eau visant l'amélioration de la production agricole dans cette région, particulièrement durant la période printanière. L'irrigation de complément sur blé, à titre d'exemple, peut répondre à ce problème de stress épisodique dans cette région à condition qu'elle ne soit pas généralisée aux cultures estivales (conduites uniquement sous irrigation), au quel cas, elle perdra tout son sens comme on l'a vu pour le sorgho.

Rappelons que le suivi des profils hydriques ainsi réalisé durant ces quatre années expérimentales servira à établir le stock d'eau du sol entre la surface du sol et 90 cm de profondeur.

2- Cinétique de croissance

L'analyse des courbes de croissance du Laivert du blé montre une évolution presque semblable à celle du sorgho (en forme de cloche) qui comprend deux principales phases assez caractéristiques des plantes annuelles, croissante en continu pour la première et décroissante en continu pour la seconde, séparées par un palier de croissance très court. Le même schéma est noté pour Zh et Zr pour ce qui est de la première phase et le palier, alors que durant la sénescence du LAI ces deux paramètres ne subissent aucune évolution et restent donc constants (prolongement du palier jusqu'à la fin du cycle).

De façon globale et durant la première phase de la courbe, la croissance reste assez faible pour une bonne période durant laquelle une succession de petits stades ont lieu (imbibition, émergence de la radicule et racines séminales, du coléoptère, la levée ...), aboutissant, à la fin, à la mise en place du premier vrai système foliaire (produit par les premières talles) mais aussi racinaire (représenté par les premières racines nodales émises par les talles). A la suite de cette phase initiale, une croissance active et continue de l'ensemble du couvert est alors notée jusqu'à atteindre les dimensions maximales en fin de seconde phase de croissance continue. Contrairement à Zh et Zr qui continuent leurs croissances durant la troisième phase (phase reproduction) et parfois même au-delà, avant de se stabiliser et demeurer constant jusqu'à la fin de la sénescence, le LAI_{vert} après s'être maintenu plus ou moins constant durant une courte période (palier très court représentant la troisième phase), entame alors sa décroissance avec un rythme plus ou moins soutenu mais qui tend à ralentir au fur et à mesure que l'on se rapproche de la fin de la sénescence. L'effet de la contrainte hydrique sur la croissance a été, quant à lui, beaucoup plus significatif durant la seconde phase, à l'exception du dernier essai (2004) qui a reçu suffisamment de pluie pendant cette phase et juste avant.

Essai 2000

Le cumul de 165 mm de pluie reçu durant les 30 jours avant le semis (*Figure 32*) a sans doute favorisé la reconstitution de la réserve en eau sur l'ensemble du profil d'eau du sol (*Figure 33*) ; ce qui a permis un bon démarrage de la culture malgré le défaut de pluie noté après le semis.

L'irrigation de 47 mm apportée au 70^{ième} jour après semis sur le traitement ETR2 a eu un effet très positif sur la croissance du couvert (LAI et Zh). Les valeurs du LAI et de Zh les plus élevées en fin de la phase de développement foliaire sont alors enregistrées sur ce traitement ETR2 (*Figure 39*), compte tenu l'apport en apport de 47 mm reçu durant cette phase (en plus des pluies, bien sûr), suivi juste après par le traitement ETM qui n'a reçu que 35 mm durant cette même phase (total de deux irrigations). Les valeurs de LAI et de Zh les plus basses sont alors constatées sur les deux autres traitements (ETR1 et Pluv) n'ayant reçu aucune irrigation durant cette phase de développement foliaire (pluies uniquement). Ce qui

dénote la sévérité des conditions hydriques ayant caractérisé cette phase de développement. Sévérité de stress due au manque de pluie sur l'ensemble de cette période (seulement 46 mm de pluies reçus entre le semis et la fin de la phase de développement foliaire) et fortement accentuée par la présence d'une semelle de labour, limitant la réserve en eau du sol à la seule profondeur de labour totalement asséchée sous le poids des prélèvements, durant presque 20 jours (sans pluies entre le 50^{ième} et le 70^{ième} jour après semis).

Avec 21 mm seulement reçus entre la fin du stade de développement foliaire et la fin de sénescence, le stress hydrique est de plus en plus intense, particulièrement sur les traitements ayant atteint un niveau de croissance élevé du LAI_{vert} mais qui n'ont pas reçu de complément d'irrigation durant cette période, comme c'est le cas de l'ETR2 qui a vu son LAI_{vert} chuter drastiquement durant cette période avant de se stabiliser en fin de cycle suite à une irrigation (Figure 39). Une chute qui reste assez modérée sur le traitement ETR1 au démarrage de la sénescence de même que pour le traitement Pluv dont le développement du couvert été fortement réduit suite au stress subi durant le stade plein floraison; ce qui a atténué l'effet du stress hydrique sur la perte de son LAI_{vert} durant cette phase de sénescence, mais dans une moindre mesure pour le traitement ETR1 qui a vu son LAI_{vert} chuter après une courte période de modération.

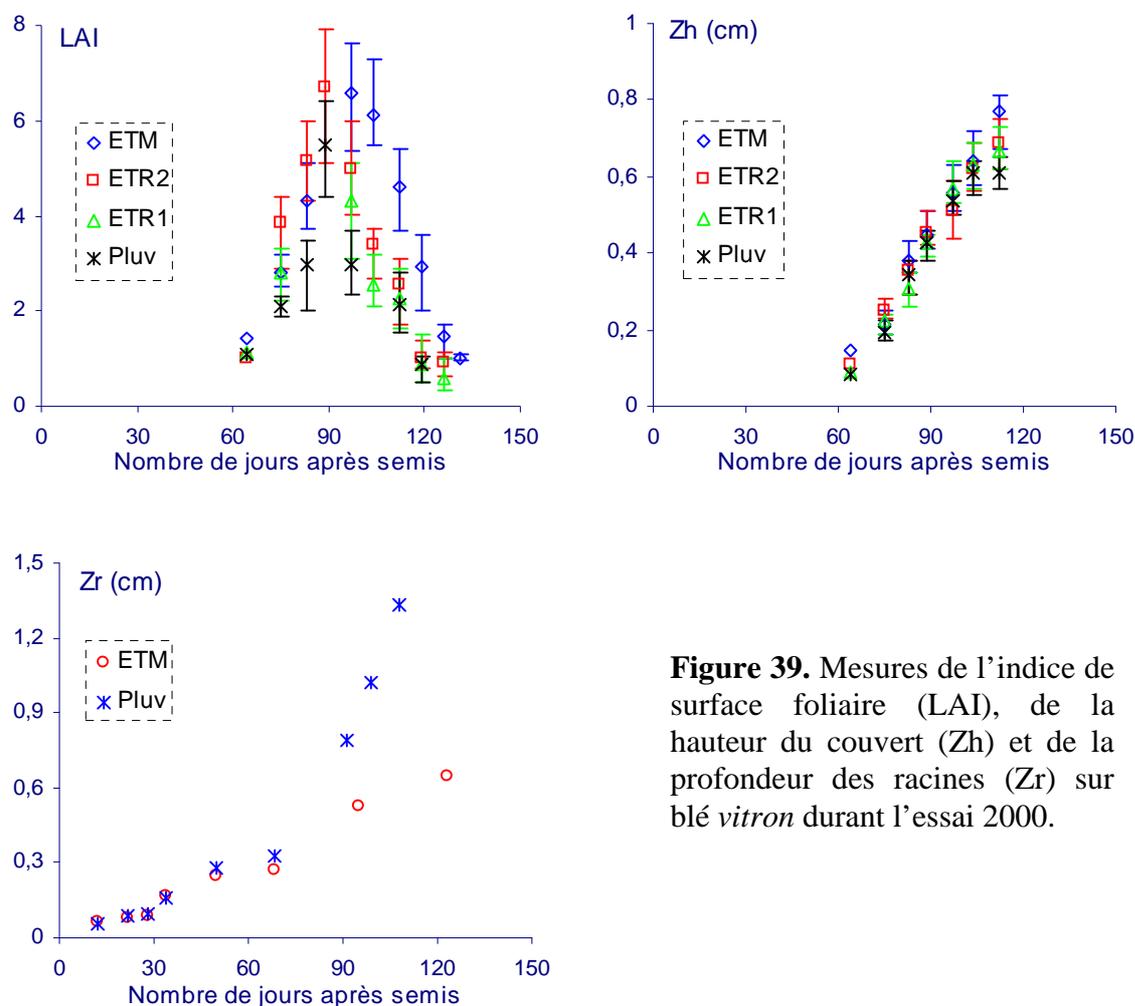


Figure 39. Mesures de l'indice de surface foliaire (LAI), de la hauteur du couvert (Zh) et de la profondeur des racines (Zr) sur blé vitron durant l'essai 2000.

La perte du LAI_{vert} la moins brutale est notée sur le traitement ETM. Les quantités d'eau importantes reçues par irrigation sur ce traitement (totalisant en tout 185 mm entre le début de la phase de reproduction et la fin de la sénescence) ont permis son couvert d'aborder la phase de sénescence (perte de LAI_{vert}) sous des conditions hydriques favorables, soit sans accélération exagérée de ce processus de sénescence. Notons au passage que la croissance du

Zh et Zr ne s'est pas limitée à la fin de la phase de plein développement, mais qu'elle s'est plutôt prolongée durant la phase plateau du LAI et au-delà, et ce pour les quatre traitements hydriques (*Figure 39*).

En conclusion, on peut dire que la culture du blé a subi cette année un stress hydrique dû à l'effet d'un manque de pluie durant le cycle de développement, accentué par la présence d'une semelle de labour au voisinage de 30 cm de profondeur. Le stress a toutefois été plus important durant la période printanière, particulièrement sur les traitements peu ou pas irrigués, comme le montrent les écarts assez significatifs enregistrés entre ces différents traitements hydriques imposés.

Essai 2001

On note presque le même schéma de confort hydrique que durant l'essai 2000 mais avec une toute autre répartition du stress durant le cycle, compte tenu du caractère aléatoire et fluctuant des précipitations dans cette région. Si le niveau du stock d'eau au jour du semis était en deçà de celui enregistré durant l'année 2000, soit moins de 100 mm, la pluviométrie était en revanche beaucoup plus soutenue après le semis, enregistrant un cumul de 260 mm durant les 70 premiers jours après le semis (LAI voisin de 2,5) et mieux répartie dans le temps. Les deux irrigations apportées sur le traitement ETM pour compenser le déficit de pluie noté durant le stade épiaison et floraison ont eu tout de même un effet positif sur l'amélioration du LAI de ce traitement, comparé au traitement non irrigué Pluv, confirmant ainsi la présence d'un effet de stress hydrique, quoique léger, durant cette phase de développement foliaire (*Figure 40*). Entre les valeurs de croissance du LAI atteintes par ces deux traitements extrêmes (ETM et Pluv), on retrouve celles atteintes par des deux autres traitements intermédiaires (ETR2 et ETR1), non irrigués jusque là aussi.

Les effets du stress hydrique sont beaucoup plus visibles durant la phase de sénescence pour le LAI. Un fort décalage est alors noté entre le traitement ETM qui a reçu trois compléments d'eau par irrigation, bien répartis durant la phase de sénescence, et les traitements qui n'ont pas reçu de complément d'eau par irrigation comme le Pluv, ou ceux pour qui l'apport par irrigation était insuffisant comme pour le traitement ETR2 ou alors suffisant mais mal réparti durant le cycle de croissance comme c'est le cas des 85 mm d'irrigation apportés en fin de cycle sur le traitement ETR1. Il est à noter aussi que la profondeur importante des racines (120 cm) atteinte par le traitement Pluv a permis à celui-ci de compenser le manque d'apport par irrigation et d'aborder la phase de sénescence dans des conditions assez proches de celles des traitements intermédiaires (*Figure 40*).

Comme pour l'année précédente, la semelle de labour est bien présente cette année aussi au voisinage de la profondeur de labour (30 cm environ), imposant là aussi un retard dans la progression des racines en profondeur sur une vingtaine de jours environ (*Figure 40*). Son rôle dans la réduction de la croissance a été, sans doute, moins important que l'année dernière durant la phase de plein développement foliaire, compte tenu de l'abondance des pluies au début de cette phase. Une fois la semelle de labour dépassée au 75^{ième} jour après semis, on note une reprise de la croissance des racines beaucoup plus importante sur le traitement Pluv (sans irrigation) qui a accusé un déficit hydrique à la fin de la phase de développement foliaire de même que durant la phase de reproduction et durant le début de la phase de sénescence, dépassant alors les 120 cm de profondeur contre seulement 75 cm pour le traitement le plus irrigué ETM.

A côté de l'effet très visible de la croissance des racines en réponse à ce stress hydrique, on note aussi celui de la hauteur du couvert (*Figure 40*) qui a atteint 90 cm sur le traitement le plus irrigué (ETM) contre 70 cm sur celui le moins irrigué (Pluv), avec bien sûr

des valeurs intermédiaires pour les traitements plus ou moins soutenus par des apports en eau par irrigation (ETR2 et ETR1).

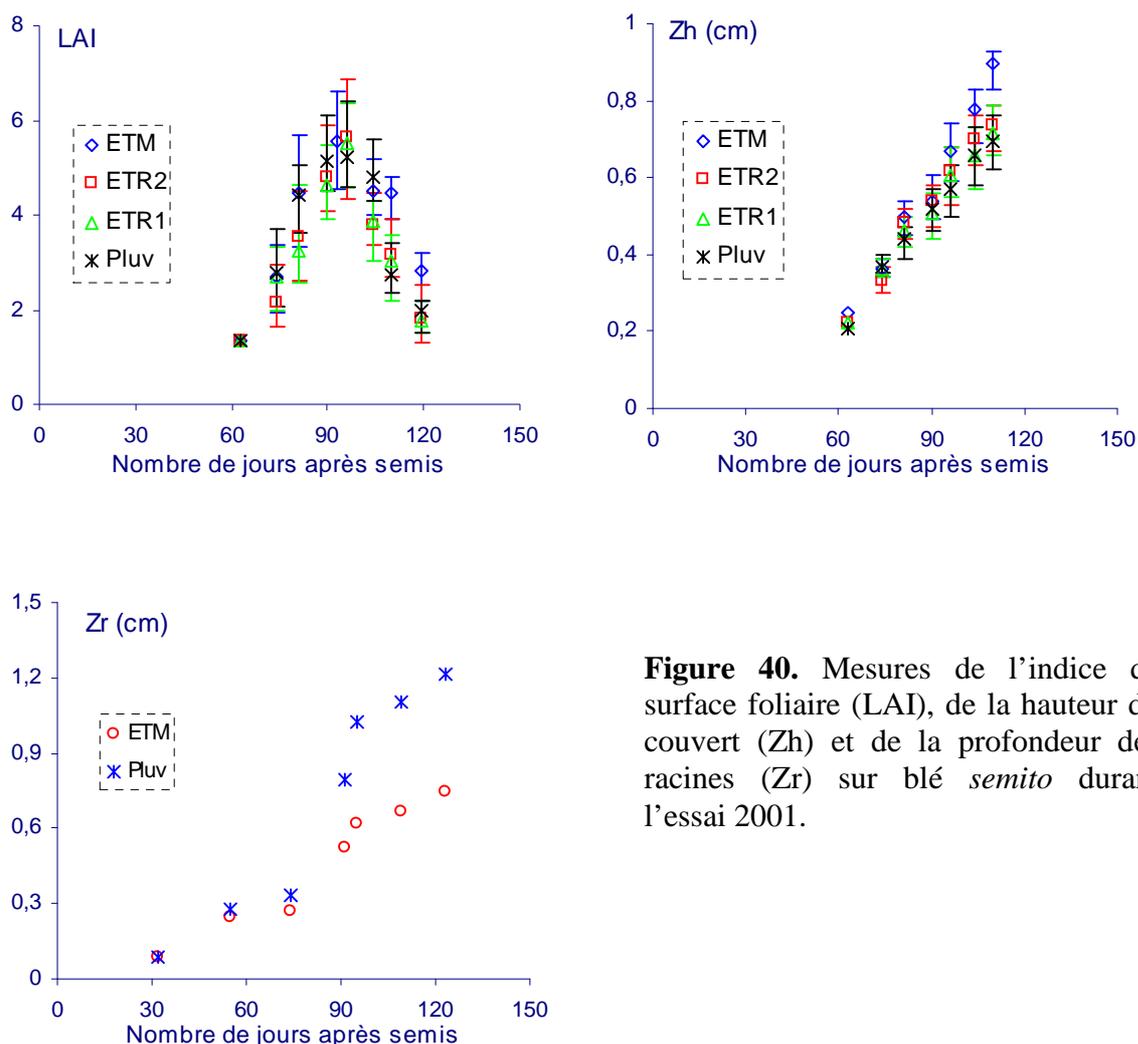


Figure 40. Mesures de l'indice de surface foliaire (LAI), de la hauteur du couvert (Zh) et de la profondeur des racines (Zr) sur blé *semito* durant l'essai 2001.

Essai 2002

C'est l'année où les conditions pluviométriques étaient les plus défavorables par rapport aux autres années. Le cumul enregistré de septembre au jour du semis ne dépasse pas les 200 mm dont seulement 65 mm ont été reçus durant les 30 jours qui précédaient le semis. Sur les 55 premiers jours après le semis, 77 mm de pluies sont alors enregistrées, contre seulement 12 mm durant la phase de reproduction (phase de plateau) et seulement 37 mm durant la phase de sénescence.

Les mesures de croissance réalisées depuis le semis jusqu'au jour de différenciation des traitements (70 jours après semis) ne montrent pas, cependant, une réduction significative du LAI qui reste assez voisin sur les quatre traitements conduits sous le seul régime pluviométrique (*Figure 41*). Là aussi, le rôle tampon de la réserve du sol a bien joué en faveur des traitements mais pour une période assez limitée durant la phase de développement foliaire, malgré le défaut de pluie noté. Une fois ce rôle tampon du sol terminé au 70^{ème} jour après semis, suite au tarissement de la réserve en eau du sol disponible, la culture subit alors un stress hydrique non négligeable sur une cinquantaine de jours, compte tenu du défaut de pluies durant cette période (40 mm de pluie tombés seulement), mais dont l'effet devient de plus en plus visible durant la phase de sénescence.

L'effet du stress hydrique durant la phase de sénescence demeure assez modéré sur le traitement ETM qui a reçu un complément en eau par irrigation d'environ 34 mm avant la sénescence et environ 95 mm durant la sénescence, contrairement au traitement sans irrigation (Pluv) dont la chute du LAI_{vert} durant cette phase a été la plus rapide et la plus importante. La sénescence du LAI_{vert} des deux traitements intermédiaires, quant à elle, évolue entre les valeurs des ces deux premiers traitements extrêmes mais reste tout de même très proche de celle du traitement ETM du fait des irrigations importantes apportées sur ces traitements en fin de course (Figure 41).

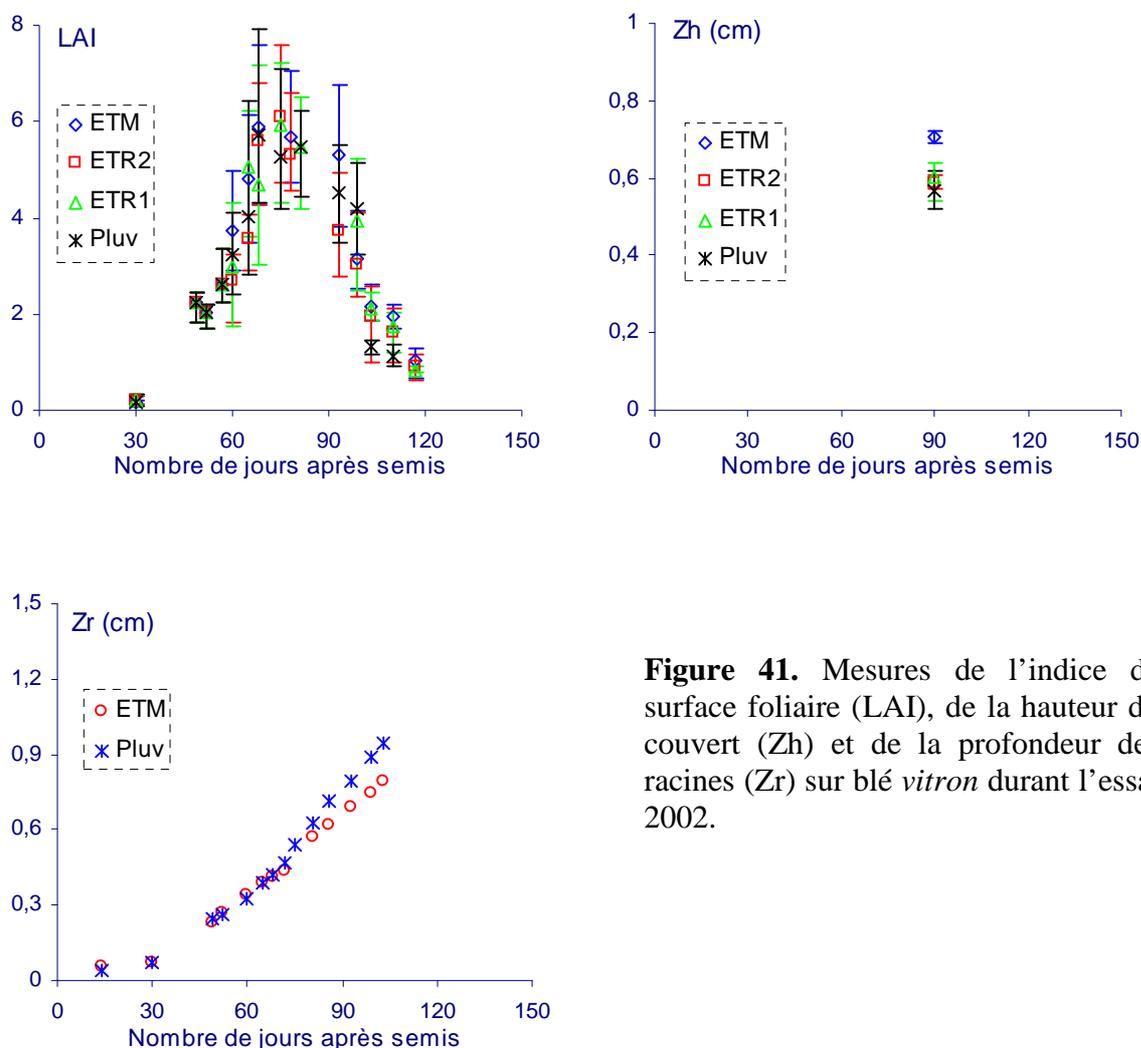


Figure 41. Mesures de l'indice de surface foliaire (LAI), de la hauteur du couvert (Zh) et de la profondeur des racines (Zr) sur blé *vitron* durant l'essai 2002.

Le suivi de la profondeur des racines montre qu'après une phase de croissance faible commence alors une seconde phase durant laquelle les racines croissent linéairement pour les deux traitements ETM et Pluv (pas de différenciation des traitements jusque-là), avant de noter une progression plus rapide pour le traitement Pluv (à partir du 70^{ème} jour après semis), compte tenu du dessèchement plus intense sur ce traitement non irrigué. La profondeur maximale atteinte par les racines sur le traitement Pluv avoisine les 95 cm contre 80 cm pour le traitement ETM. Il convient de signaler tout de même que la semelle de labour ayant caractérisé les deux premières années expérimentales, apparaît moins problématique sur cet essai sans pour autant disparaître totalement, comme le montre la croissance des racines sur la figure 41.

Essai 2004

Les conditions pluviométriques enregistrées durant cet essai ont été les plus favorables, comparées à l'ensemble des autres essais. Bien que 173 mm de pluie seulement

aient été enregistrés depuis septembre au jour du semis, la culture ne semble subir qu'un léger stress hydrique durant la première phase de croissance, compte tenu de l'abondance des pluies durant cette période (250 mm), atteignant alors un LAImax voisin de 6 et une hauteur du couvert Zh voisine de 0,7 (Figure 42) Le peu de points sur la courbe suggère une progression plutôt linéaire jusqu'au LAImax après une période de croissance lente au départ. Il en est de même pour la phase de sénescence du LAI_{vert} qui a reçu un peu plus de 120 mm bien répartis durant cette période. Une carence en pluie est cependant notée entre le 86^{ème} jour et le 115^{ème} jour après semis (30 jours environ); cela peut suggérer l'existence d'un éventuel stress hydrique momentanément modéré durant cette période, responsable de la stimulation de la vitesse de croissance des racines mesurées durant cette période (voir le graphe des racines).

Les mesures en profondeur des racines qui avoisinent les 100 cm au 103^{ème} jour après le semis semblent élevées pour un traitement ayant subi un léger stress hydrique (Figure 42). A noter que la hauteur du couvert n'a pas été suivie durant cet essai.

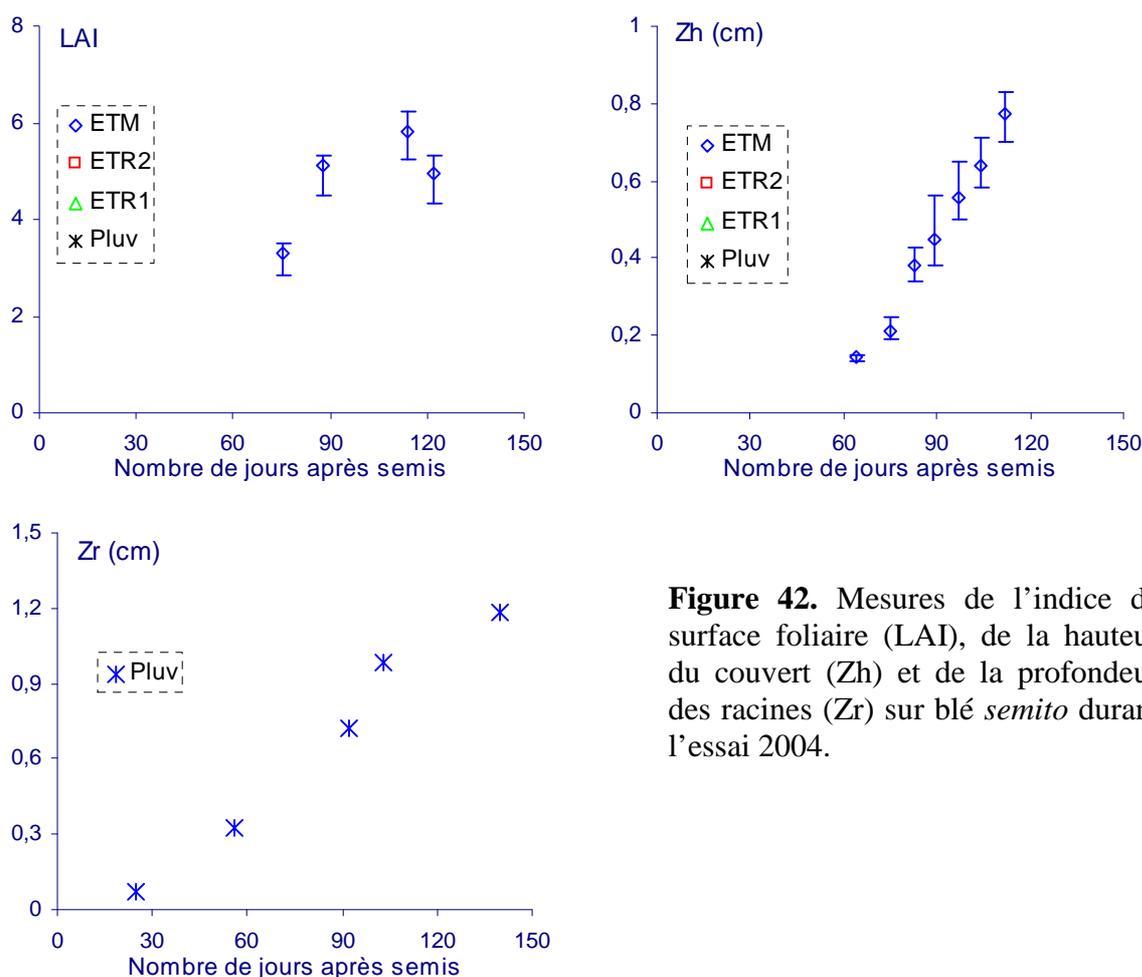


Figure 42. Mesures de l'indice de surface foliaire (LAI), de la hauteur du couvert (Zh) et de la profondeur des racines (Zr) sur blé *semito* durant l'essai 2004.

En conclusion, on peut dire que le suivi de l'évolution de la croissance sous des conditions pluviométriques dans la Mitidja montre, une fois encore, que le stress hydrique s'invite dans la plupart des situations durant la période printanière, coïncidant avec la sénescence du LAI_{vert} ayant lieu depuis la fin de la floraison jusqu'à la fin de la maturation. Un suivi rigoureux de la réserve en eau du sol combiné à une gestion adéquate des apports en eau durant cette période permettent de ralentir la perte du LAI_{vert}, favorisant alors une meilleure exportation des assimilés produits vers les graines et d'obtenir ainsi une meilleure productivité en rendement de cette culture

3- Suivi phénologique et développement (temps physiologique en °Cj)

Le suivi phénologique de la culture du blé réalisé sur les seuls traitements ETM des quatre expérimentations montre que la durée des stades, comptée en sommes de degrés jours à partir de $T_0=1^{\circ}\text{C}$, reste dans son ensemble assez stable sur chaque variété, quoique de petites différences ont cependant été relevées à certains stades (tableau 9). Ces différences peuvent dépendre des erreurs d'estimations des dates d'apparition des stades que nous avons toujours considérés comme accomplis lorsque plus de 50% des plants les ont réellement atteints. Aussi, les conditions hydriques ayant prévalu d'une année expérimentale à l'autre ne sont pas à exclure dans la mesure où le suivi réalisé sur ces traitements références, supposés bien alimentés en eau (traitement ETM), ont parfois manqué d'apport en eau (quantités déterminées par la méthode de Kc), accélérant de ce fait la durée de la réalisation de certains stades, certaines années, par rapport à d'autres années (car en fait, la somme des températures étant celle de l'air à partir de $T_0= 1^{\circ}\text{C}$ et non celle biologique de l'organe. Or nous savons qu'avec le manque d'eau ($ET < ETM$), la température de surface peut augmenter substantiellement).

Tableau 9. Durées des stades de développement du blé obtenues sur les seuls traitements ETM (bien alimentés en eau) et cumulées depuis le semis et à partir d'une température seuil de -1°C .

Stades	Blé, variété <i>Vitron</i>				Blé, variété <i>Semito</i>			
	Année 2000	Année 2002°C	Moy	Écart	Année 2001	Année 2004	Moy	Écart
Début tall (°C)	270	308	288	-38	473	435	454	2
Plein tall (°C)	413	397	405	16	684	592	638	92
Epiaison (°C)	1000	916	958	84	1127	1282	1203	-155
Floraison (°C)	1200	1054	1127	146	1338	1371	1354	-33
Grain laiteux (°C)	1324	1300	1312	24	1517	1554	1534	-37
Grain pateux (°C)	1568	1427	1498	141	1804	1774	1789	30
Fin maturation (°C)	1870	1756	1818	64	2112	2251	2181	-139

Une nette différence dans la durée du cycle de développement entre les deux variétés de blé est alors enregistrée sur ces traitements référence (ETM), soit 2181 °Cj pour *Semito* et 1818 °Cj pour *Vitron* en moyenne (tableau 9). Pour *Vitron*, il fallait entre 270 et 310 °Cj pour atteindre le début tallage et entre 915 et 1000 °Cj pour atteindre le LAImax (représentant près de 16% et 52% de la durée totale du cycle respectivement), alors que pour *Semito* ces mêmes phases ont nécessité des durées allant de 435°CJ à 475°CJ et de 1127°CJ à 1282°CJ respectivement (représentant près de 21% et 55% de la durée totale du cycle respectivement). Il est à signaler que la somme de l'ensemble des ces durées, notée D, représente le principal paramètre d'entrée du modèle développement-croissance, défini dans le fichier Base de données.

Par ailleurs, il a été noté que plus un couvert est stressé, plus son cycle total de développement est raccourci, la phase de sénescence particulièrement. En effet, la valeur de la température d'un couvert végétal bien alimenté en eau est généralement assez proche de celle de l'air (comptée à partir d'une température seuil bien sûr) alors qu'en présence d'un stress, hydrique particulièrement, cette température augmente substantiellement, dépassant de loin celle de l'air. La durée en jours de certains phase (un ou plusieurs stades), défini par une somme des degrés jour constante comme on l'a déjà vu, serait plutôt raccourcie dans le cas d'un couvert ayant subi un stress hydrique, comparée à celle d'un couvert conduit sous des conditions hydrique potentielles (sans stress hydrique). C'est ce qui a été constaté durant la sénescence du blé lors de nos expérimentations où, sous l'effet d'un stress hydrique sévère, la fin de ce stade s'est trouvée fortement raccourcie par rapport au traitement bien alimenté en eau (photo n°3ab).

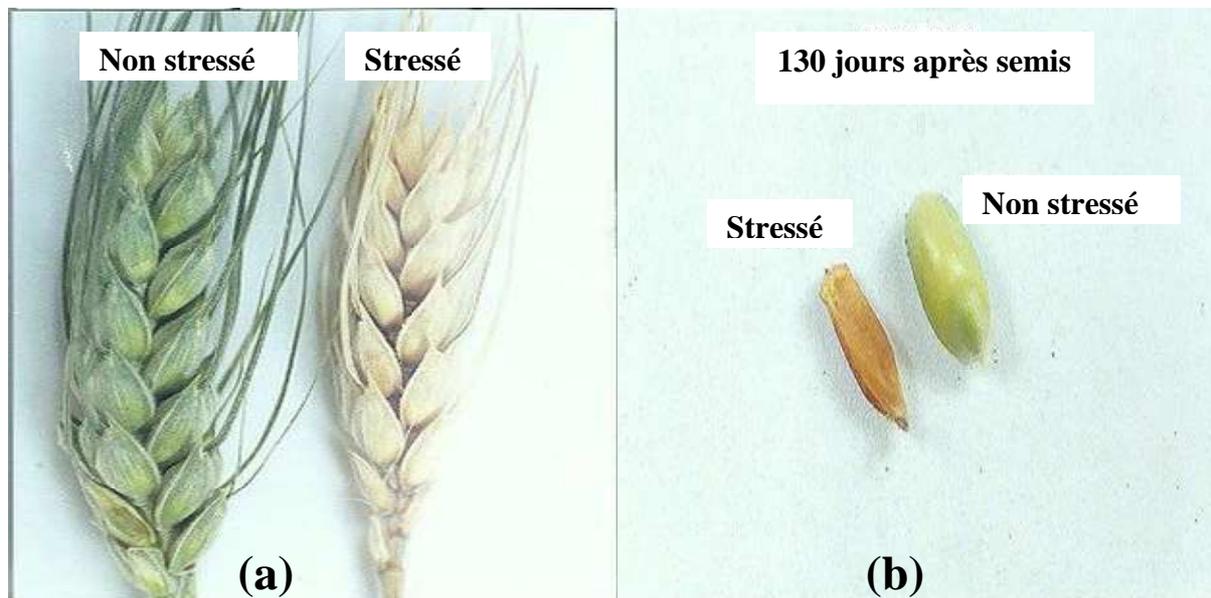


Photo 3 : Accélération de la phase de sénescence du blé, sur le traitement ayant subi un fort stress hydrique comparé au traitement ETM (peu ou pas de stress hydrique), observée au 130^{ième} jour après semis (entre les stades grain laiteux et grain pâteux) :

- (a) *à droite*, le stade de sénescence presque totalement achevé sur le traitement ayant subi un fort stress hydrique (pluies et sans irrigation) et *à gauche* début de la sénescence pour le traitement ayant subi un léger stress hydrique (ETM ayant reçu plusieurs irrigations en plus des pluies).
- (b) *à gauche*, le grain est presque entièrement mature et sec sur le traitement ayant subi un fort stress alors qu'*à droite* le grain est encore laiteux sur le traitement bien alimenté en eau ETM (peu ou pas de stress hydrique)

III.1.5 Conclusions sur l'expérimentation

Conclusion sur les résultats

Comme pour toutes les cultures agronomiques annuelles, la croissance du blé et du sorgho se réalise elle aussi en deux grandes phases : la première étant caractérisée par une croissance continue de son couvert (LAI_{vert} , ZH et Zr), depuis le semis jusqu'à atteindre leurs dimensions maximales (fin du stade reproduction) alors que durant la seconde, seul le LAI_{vert} décroît pour enfin s'annuler en fin de sénescence.

En conditions de stress, le LAI_{vert} et Zh réduisent leurs croissances sacrifiant ainsi une partie de celles-ci au profit d'un meilleur confort hydrique. La croissance en profondeur des racines (Zr), dans ces conditions, se trouve plutôt stimulée dans le but d'accroître la surface de sol explorée et augmenter par là les disponibilités en eau nécessaire pour son alimentation. La régression du LAI_{vert} lors de la seconde phase est d'autant plus accentuée que le stress est intense et prolongé.

Transition pour l'intérêt d'une modélisation

Le suivi de paramètres physiologiques de couvert au cours de sa croissance apporte donc des éléments d'informations non négligeables pour l'appréciation des dommages encourus par celui-ci selon le stress et donc de son éventuelle production en général, mais permet surtout de réaliser les deux bilans d'énergie et d'eau du sol. Apporter la quantité d'eau optimale pour atténuer l'effet d'un stress hydrique, tout en respectant l'objectif de la production visée en conditions de ressources limitantes en eau, n'est pas chose facile ; encore faut-il le prévoir à temps, bien l'évaluer et le caractériser avant tout dommage.

Le pilotage des irrigations doit constituer dans ce cas un moyen très efficace pour répondre à une demande de production programmée, dans un milieu où l'eau constitue un facteur limitant, mais aussi pour gérer les ressources en eau à plus long terme (analyse des consommations annuelles totales par rapport aux pluies d'une même année selon une culture et des techniques culturales données). Bilhyna qui se veut être un modèle de pilotage des irrigations en conditions environnementales variées de sol, de culture et de climat, répond d'une façon directe à ces deux objectifs. C'est ce que nous verrons dans le chapitre ultérieur.

III.2. Validation du modèle biophysique (développement croissance)

Nous abordons à présent dans ce paragraphe la validation du modèle croissance-développement. Deux banques de mesures expérimentales sont alors utilisées pour cette validation : la première, utilisée pour la validation du modèle de loi d'action de la température sur la croissance et le développement des couverts, provient d'un certain nombre d'expérimentations tirées de la bibliographie, relatif à trois cultures agronomiques que sont le Lin, la maïs et le blé, et réalisées par différentes équipes assez connues. La seconde banque de mesures expérimentales, provenant des résultats expérimentaux que nous avons réalisés au niveau du site expérimental de l'ENSA d'Alger entre 1999 et 2004 (voir chap expérimentation ci-dessus), a servi quant à elle à la validation des paramètres de croissance et de développement de nos deux cultures expérimentales, soit le sorgho et le blé (indice de surface foliaire Lai , hauteur des couverts Zh et profondeur des racines Zr), de même qu'à la validation du bilan d'eau de ces deux systèmes de culture (stock d'eau des parcelles). Nous procéderons dans un premier temps à la validation de la loi d'action de la température sur la vitesse de développement-croissance, en fonction des températures, pour ensuite valider l'ensemble du modèle développement-croissance, couplé au modèle de bilan hydrique *Bilhyna*, sur les deux systèmes de culture expérimentés (sorgho et blé).

III.2.1. Validation du modèle de vitesse de développement

Nous avons simulé la loi d'action de la température sur la croissance et le développement sur trois principales cultures méditerranéennes. Les valeurs des différents paramètres d'entrée de ce modèle sont déduites des résultats expérimentaux réalisés par trois auteurs assez connus (Durant, R & al. 1967 pour le Lin, Tollenaar, M & Dyanard, T.B. 1979 pour le Maïs et Geslin, H. 1944 pour le Blé) et tirées de la bibliographie (valeurs déduites précédemment sur les courbes expérimentales d'action de la température sur ces trois cultures, telles que reportées sur la figure 11 et résumées dans le tableau 1, chap II.2.1.5). Les courbes d'action de la température sur la vitesse de développement simulées par le modèle pour chacune de ces trois cultures sont ensuite comparées aux valeurs expérimentales obtenues par ces trois auteurs.

Une très bonne concordance est alors notée entre les valeurs (courbes) simulées par le modèle et celles observées par ces trois auteurs, ceci sur l'ensemble de la gamme des températures actives pour le processus. Ces tests ont été établis sur des processus particuliers de développement-croissance, faciles à expérimenter en condition contrôlée, qu'est la germination. Nous verrons plus loin comment on peut extrapoler et expérimenter ce modèle de loi de température sur l'ensemble du cycle semis-reproduction des cultures conduites en plein champ.

III.2.1.1 Culture de lin

La comparaison des résultats du modèle fonctionnant avec les paramètres des mesures expérimentales ($T_o = 4^{\circ}\text{C}$, $T_{moy} = 15^{\circ}\text{C}$, $T_f = 37^{\circ}\text{C}$ et $T_{opt} (X_{opt}) = 0,8T_f$, voir chapitre II) montre que l'approche décrite simule avec une précision assez élevée la loi de l'action de la température sur la germination du Lin, ce qui constitue un résultat extrêmement intéressant (*Figure 43a*). Le modèle confirme aussi un réalisme très élevé de la description des vitesses sur l'ensemble de la gamme des températures concernées par la culture ($R^2=0,986$), à l'exception du voisinage des températures extrêmes, où le modèle sous-estime légèrement les températures minimales et maximales (*Figure 43b*).

Signalons au passage que toutes les phases de la courbe ont donc été efficacement simulées et que le modèle a bien généré une température minimale de 2°C (valeur, bien sûr,

comprise entre la température du seuil expérimental (4°C) et la température létale minimale (-1°C).

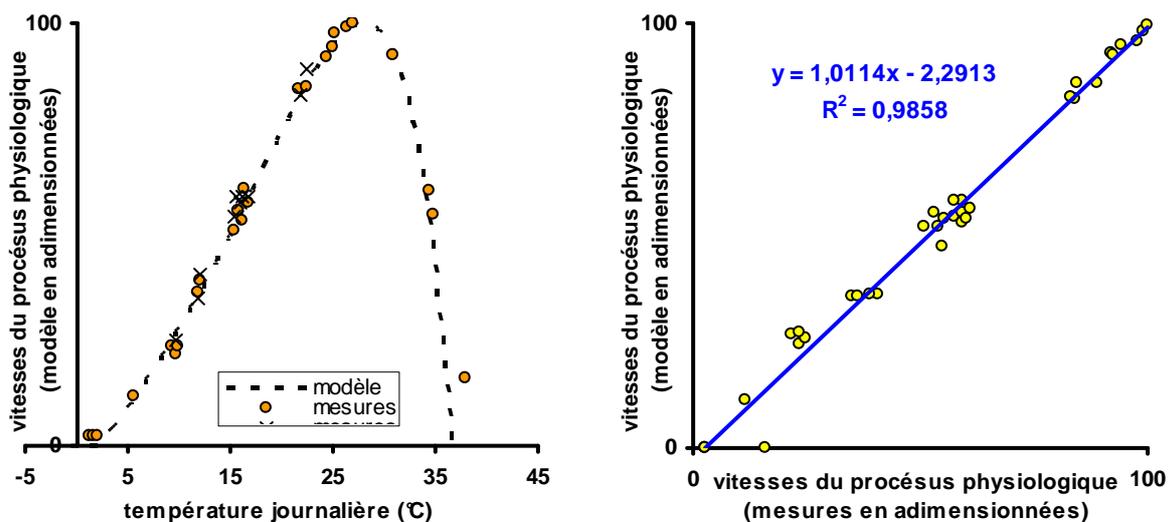


Figure 43. (a) Action de la température sur la vitesse de développement du lin (ici germination) mesurée expérimentalement par Durant, R & al 1967 (courbe en x), comparée à la courbe de cette vitesse simulée par notre modèle de vitesse de développement (courbe en points) et **(b)** Confrontation entre les valeurs de ces vitesses mesurées expérimentalement et celles simulées par notre modèle de vitesse de développement (Bilhyna)

III.2.1.2. Culture de maïs

Le modèle montre encore une fois sa robustesse dans la simulation des processus biologiques de vitesses de développement-croissance des plantes.

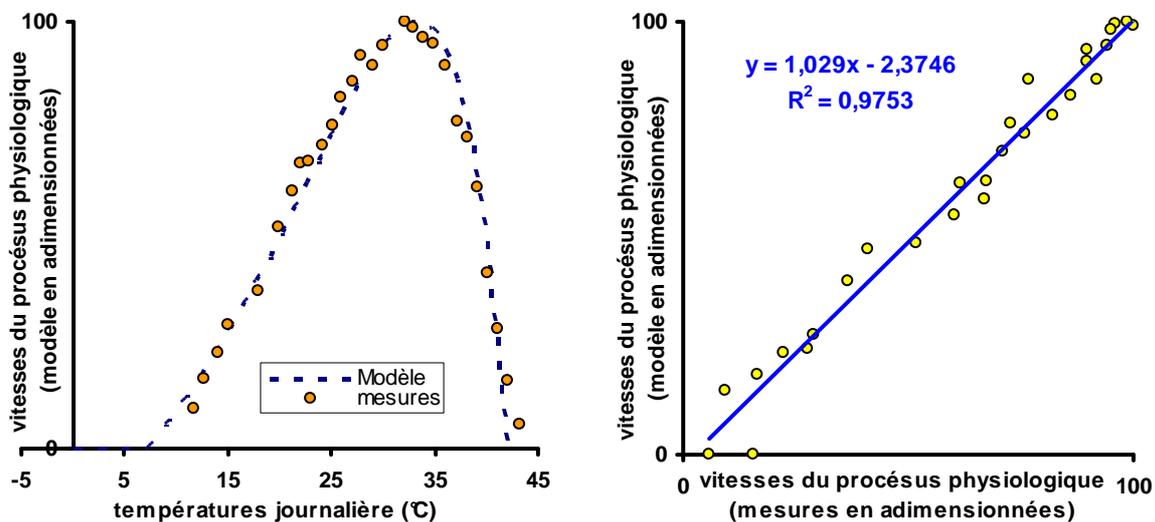


Figure 44. (a) Action de la température sur la vitesse de développement du Maïs (ici germination) mesurée expérimentalement par Tollenaar, M et Daynard, T.B., 1978 (courbe en x), comparée à la courbe de cette vitesse simulée par notre modèle de vitesse de développement (courbe en points) et **(b)** Confrontation entre les valeurs de ces vitesses mesurées expérimentalement et celles simulées par notre modèle de vitesse de développement (Bilhyna)

Comparés aux mesures expérimentales (*Figure 44a*), les résultats de la simulation de l'action de la température sur la vitesse de germination du Maïs par le modèle se révèlent être

assez conformes à la réalité du phénomène ($R^2=0,975$), comme le montre la figure 44b (test ayant utilisé les paramètres, comme dans le cas précédent de l'étude de la loi d'action de la température). La température minimale de non croissance possible $T_m=7$ °C, simulée par le modèle, est supérieure à 0° C et inférieure à la température expérimentale $T_o=9^\circ$ C. Au vu de ces tests, nous considérons, comme pour le cas du Lin, qu'un tel résultat est hautement satisfaisant sur toute la gamme des températures influençant les processus biologiques du Mais.

III.2.1.3. Culture de blé

Le manque de points expérimentaux représentant la gamme des températures influençant la germination du blé au-delà de l'optimum, ne permet pas une analyse détaillée et une évaluation précise des résultats simulés. Cependant, l'analyse globale de ces résultats montre que le modèle simule, une fois encore et de manière assez fidèle, la réalité du phénomène de l'action de la température sur la germination du blé (Figure 45a). On note alors une phase exponentielle à partir de la température létale minimale (T_m) inférieure à -2° C, générée par le modèle, mais qui s'écarte légèrement d'un certain nombre de points expérimentaux pour cette gamme de températures basses. Ce décalage est dû principalement à la valeur paramétrée de T_{opt} qui n'a pu être fixée pour le reste de la courbe, compte tenu du manque de points à ce niveau de température. Aussi, on a pris pour T_f une valeur classique proche de l'échaudage du blé (32 à 37° C). Le résultat reste toutefois satisfaisant pour l'ensemble de la gamme des températures influençant la germination du blé ($R^2=0,933$), comme le montre la figure 45b.

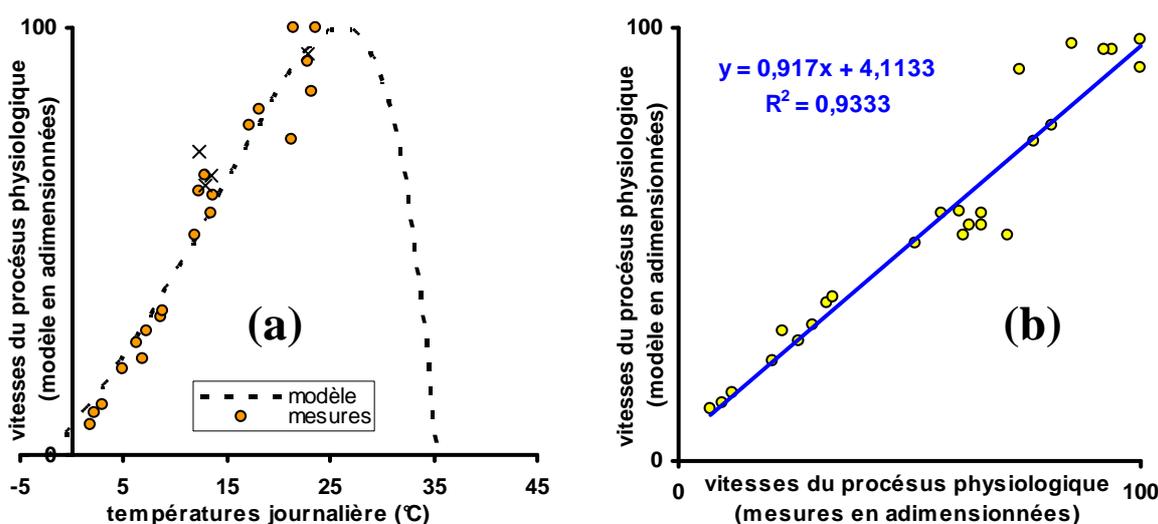


Figure 45. (a) Action de la température sur la vitesse de développement du Blé (ici germination) mesurée expérimentalement par Geslin, H. 1944 (courbe en x), comparée à la courbe de cette vitesse simulée par notre modèle de vitesse de développement (courbe en points) et (b) Confrontation entre les valeurs de ces vitesses mesurées expérimentalement et celles simulées par notre modèle de vitesse de développement (Bilhyna)

III.2.1.4. Conclusion à la validation du modèle de vitesse de développement

Le modèle de loi d'action de la température ainsi élaborée constitue un premier cadre d'intégration de l'action de l'environnement sur le déroulement des processus biologiques de la plante, et ce à travers le facteur température. Alors que l'utilisation d'une simple loi linéaire d'action de la température par les modèles de fonctionnement des cultures permet de prendre,

en partie, l'effet de l'action de la température sur une gamme assez limitée, cette nouvelle approche permet l'utilisation d'une vraie loi d'action de la température sur les différents processus biologiques liés au développement et à la croissance, et valable sur toute la gamme des températures biologiquement actives (*Figure 46*). De plus, cette approche très générique permet de travailler à n'importe quelle échelle de temps, soit de la journée comme c'est encore le cas dans beaucoup de modèles, mais aussi à des échelles horaires si nécessaire, voire autres, puisque c'est le cas pour la captation, l'infiltration et la redistribution d'eau, dont le drainage profond basé sur la loi de Darcy généralisée, introduite par Richard.

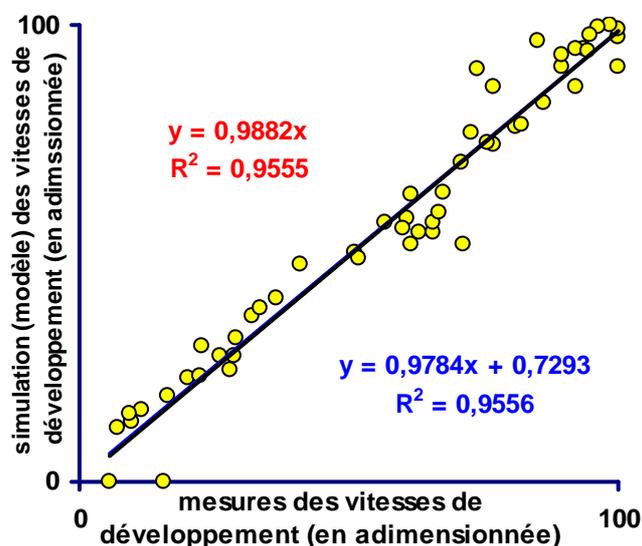


Figure 46. Confrontation globale entre les vitesses de développement simulées par notre modèle (bilhyna) et celles mesurées expérimentalement pour les trois cultures citées dans ce paragraphe III.2.I (toutes valeurs confondues du lin, du maïs et du blé)

A partir d'un petit nombre de paramètres, facilement abordables dans la bibliographie, le modèle est alors capable de simuler des vitesses de développement et de croissance, avec une très bonne précision, quelles que soient la culture et les données des températures. C'est pourquoi on a cherché à déterminer expérimentalement les quelques paramètres nécessaires pour la construction de la loi d'action de la température sur les vitesses développement-croissance (T_0, T_f, T_{moy}), sans chercher à ajuster le modèle par rapport à l'ensemble des points expérimentaux donnés pour les germinations par exemple. En effet, c'est compte tenu de ces trois valeurs expérimentales que nous cherchons à tester l'ensemble des valeurs données par le modèle qui devient très générique et évite ainsi des mesures longues et fastidieuses (courbe de la germination en fonction de la température). Bien sûr, un ajustement précis aurait donné de meilleurs résultats uniquement pour l'expérience particulière faite. Ceci est d'autant plus vrai que nous avons pris la germination comme exemple, souvent assez bien extrapolable à l'ensemble du cycle de développement-croissance de la culture. En fait, pour s'adapter à ce cycle, on a recours aux expériences des producteurs de variétés de semences qui donnent les valeurs expérimentales de températures seuils (T_0) et des sommes de températures (à partir de ce seuil) entre le semis et le stade reproduction (ou floraison), valant en général la moitié de la durée du cycle total, soit $D/2$ (D étant la durée totale du cycle de développement du couvert depuis le semis jusqu'à la fin sénescence).

Au-delà des processus biologiques, tels que le développement et la croissance des surfaces des feuilles, des hauteurs de plant et des profondeurs des racines, il devient alors possible de suivre la cinétique des vitesses journalières de toutes les entités d'une plante, comme c'est le cas des entrenœuds, tiges, bourgeons, fleurs et épis ou panicule, et finalement des fruits, moyennant la connaissance des paramètres d'entrée caractéristiques. Cette approche ouvre de nombreuses perspectives quant à son utilisation dans des études et essais basés sur des approches architecturales de la plante mais aussi dans ceux visant la sélection, le suivi, la production et l'amélioration de nouvelles variétés.

III.2.2. Validation du modèle biophysique (développement-croissance)

Dans cette partie, nous présentons la confrontation des sorties du modèle Bilhyna aux résultats expérimentaux issus des essais aux champs que nous avons conduits sur le Sorgho (été 1999), dans un premier temps, puis sur les deux variétés de blé (*Vitron* pour les années 2000, 2002 et *Sémito* pour les années 2001, 2004), dans un second temps. Les données et valeurs des paramètres utilisées dans Bilhyna sont résumées dans le tableau 1, annexe II.2.1.5. La validation porte sur les variables les plus importantes du module biophysique, celles liées au développement de la culture (à savoir la durée physiologique des stades et du cycle total) ainsi que celles liées à la croissance du couvert comme le Lai, Zh et Zr. De plus, le modèle de bilan d'eau sera testé et les résultats seront confrontés aux bilans d'eau des sols mesurés en plein champ.

Dans ce paragraphe, il est clair que les données et paramètres d'entrées du modèle sont ceux imposés par le climat, le sol, la culture et les techniques culturales pratiquées au cours des différentes années d'expérimentation. Comme on l'a vu, les variables de forçages climatiques (température, insolation, vent, humidité de l'air et pluviométrie) sont mesurées au niveau de la station météorologique de Dar El Beida et introduites à un pas de temps journalier. Les dates de semis et de labour, leurs profondeurs, etc... sont également fournies dans le fichier « calendrier cultural », de même que les paramètres du site (géographique, pédologique et physique) fournis dans le fichier « Modèle.ini » ainsi que les données biophysiques et physiologiques qui sont fournies dans le fichier « base de données ». Un exemple de ces fichiers contenant ces paramètres d'entrées pour le sorgho est donné dans l'annexe V.

III.2.2.1. Introduction

Le rayonnement et l'eau sont les deux principaux facteurs environnementaux limitants pris en compte dans le modèle. Les enseignements que l'on peut tirer des résultats de simulation concernent en premier lieu la nature du stress environnemental subi par les cultures, sa durée, sa fréquence mais aussi et surtout son poids sur la réduction de leurs croissances, compte tenu des caractéristiques du sol, du climat et de la période de développement. L'analyse des courbes de croissances potentielles du Lai simulées en conditions optimales d'eau (*Figure 47*) montrent, toutefois, que le rayonnement pris en compte par la fonction f_{PAR} ne constitue pas un facteur limitant pour la croissance des couverts dans la Mitidja, même lorsqu'il s'agit de cultures assez exigeantes en lumière telles que le sorgho (*Figure 47*).

C'est aussi le cas des cultures d'hiver comme le blé, moins exigeantes en rayonnement que le sorgho, où le stress en rayonnement f_{PAR} est peu fréquent et reste limité pour l'essentiel à la période de démarrage de la culture ; ce qui est sans grand effet sur les phases de pleines croissances du blé où la réduction la plus importante du LAI due à ce stress (de lumière) ne dépasse guère les 0,31% du LAImax pour la période étudiée (cas du blé *semito* pour les années 2001 et 2004). Dans ces conditions, toute réduction dans la croissance des couverts simulée par le modèle pour ces deux cultures ne peut qu'être attribuée de facto au stress hydrique (f_{eau}), comme nous le verrons dans le reste de l'analyse qui suit.

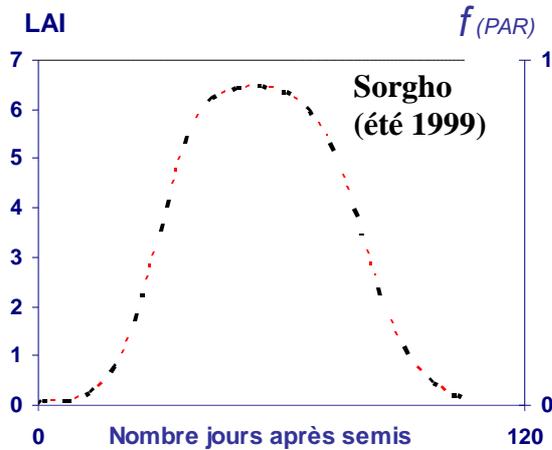
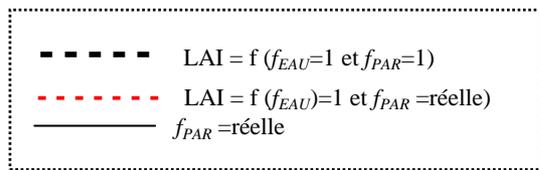
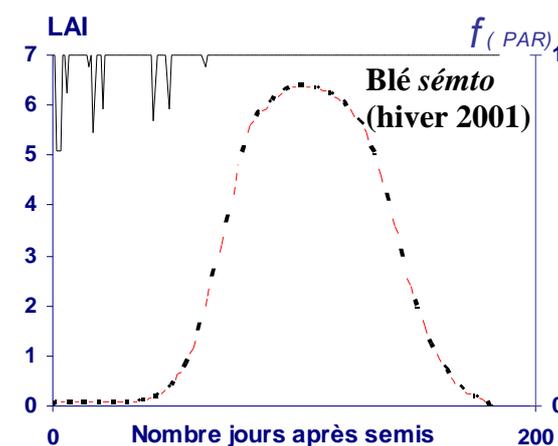
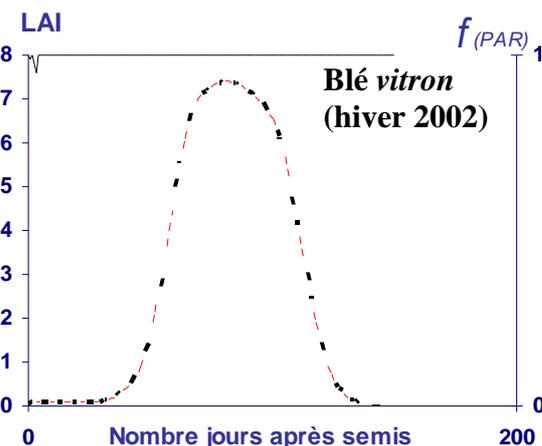
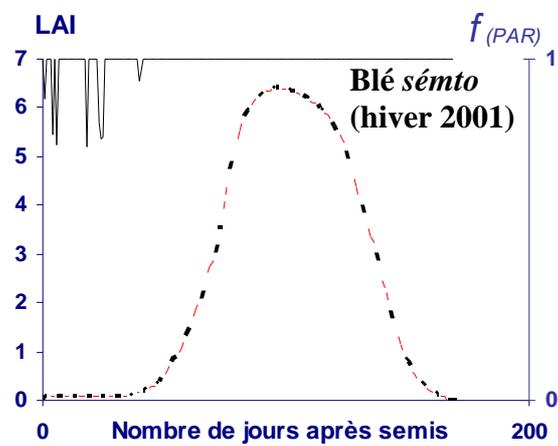
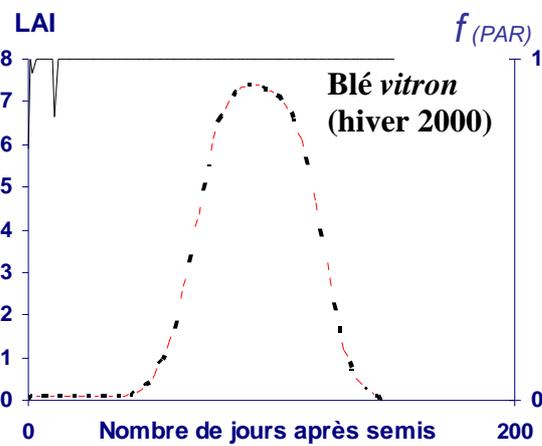


Figure 47. Evolution du LAI simulé par le modèle Bilhyna en l'absence de toute contrainte due à l'eau ($f_{PAR}=1$) et :

(i) en l'absence de toute contrainte due au manque de lumière, soit $f_{PAR} = 1$, (courbe - - - -)

(ii) en présence de contrainte due au manque de lumière imposé par les conditions réelles de la période de simulation, soit $f_{PAR} \leq 1$, (courbe - - - -).

Le niveau de la contrainte due au manque de lumière pour l'ensemble de la période soit $f_{PAR} \leq 1$ représenté par la courbe (—)



L'analyse des premiers résultats de simulations réalisées avec différents traitements qui font intervenir les stress hydriques imposés indépendamment des pluies, comme c'est le cas pour le sorgho conduit en l'absence de pluies, indique le poids assez fort du stress hydrique (f_{eau}) sur le LAI (Figure 48). Ce stress hydrique apparaît plus ou moins continu sur l'ensemble du cycle de développement, y compris sur les traitements ayant reçu des apports complémentaires par irrigation, établis selon la méthode empirique des Kc (méthode citée au paragraphe III.1.3.1). En effet, les différences nettes entre la courbe ETMbp simulée par le

modèle (sol toujours maintenu à la capacité au champ) et la courbe ETMbr donnée aussi par le modèle (les irrigations imposées au modèle sont celles effectuées en conditions expérimentales, soit aux jours d'applications avec les quantités réellement apportées), traduisent le poids du stress imposé sur l'ensemble du cycle de végétation. L'effet du stress sur la phase de sénescence apparaît plus nettement en comparant les courbes des graphes de la figure 48, soit la sénescence avec stress à partir du maximum de croissance réalisé (Figure 48a) et la sénescence sans stress hydrique à partir du même maximum (Figure 48b).

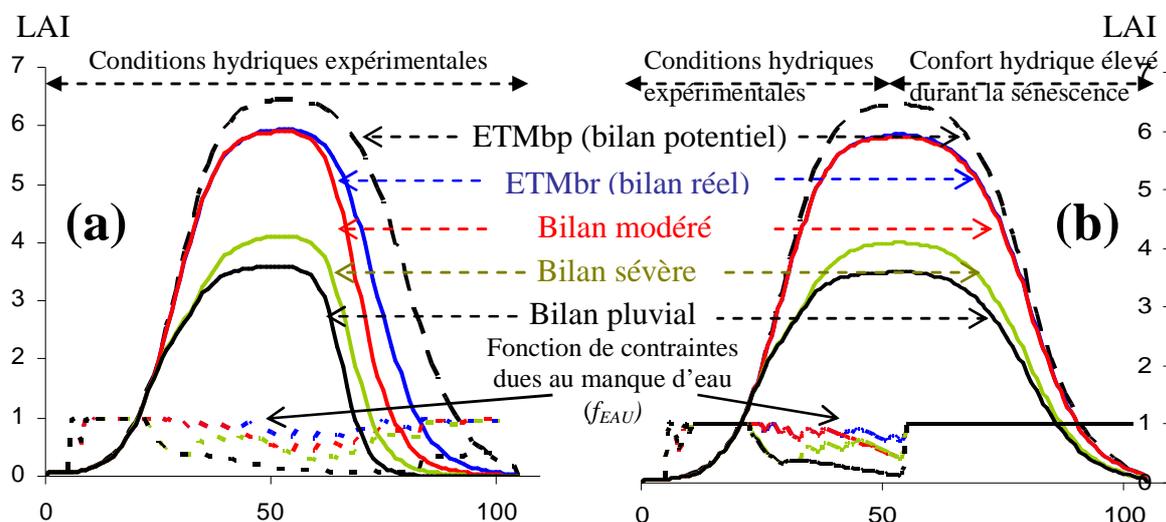


Figure 48. Simulation du LAIvert (sorgho 1999) selon les conditions hydriques expérimentales imposées pour les différents traitements jusqu'à la fin de la sénescence (a) ; avec levée du stress hydrique (sans contrainte hydrique, soit $f_{EAU} = 1$) sur tous les traitements depuis le début de la sénescence et jusqu'à la fin du cycle (b)

III.2.2.2. Evolution du couvert (LAI, Zh et Zr)

L'objectif recherché est de modéliser les niveaux de LAI_{vert}, de la hauteur du couvert Zh et aussi de la profondeur des racines atteintes à tout moment Zr, sous n'importe quelles conditions environnementales, stressées notamment. Objectif dominant les évolutions temporelles du bilan hydrique selon les cultures possibles mais aussi selon les climats et les sols. Les courbes d'évolution journalière des LAI_{vert}, Zh et Zr simulées par le modèle pour les deux cultures (sorgho et blé), selon les mêmes traitements hydriques imposés tout au long des quatre années expérimentales, seront alors comparées aux mesures réalisées sur ces mêmes cultures durant les périodes expérimentales.

Lorsque l'on fait une analyse comparée entre les résultats simulés et mesurés on peut dire, globalement (Figures 49A et 51a mais plus de détails par cultures et par traitement sont donnés dans l'annexe III.2 Figure 1A), que cela paraît bon sur le LAI et que statistiquement les écarts entre les valeurs du modèle et ceux de l'expérimentation ne sont pas élevés ; une partie de ces écarts peut être expliquée par les conditions des essais, c'est en particulier la cas du rôle joué par la présence d'une semelle de labour notée sur ces parcelles expérimentales. Semelle qui a fortement influencée l'évolution de ces trois paramètres. Malgré cela, les résultats restent satisfaisants dans la mesure où le modèle simule bien les quatre phases d'évolutions du couvert végétal, tout en prenant en compte l'effet du stress et sa rétroaction sur la croissance du couvert.

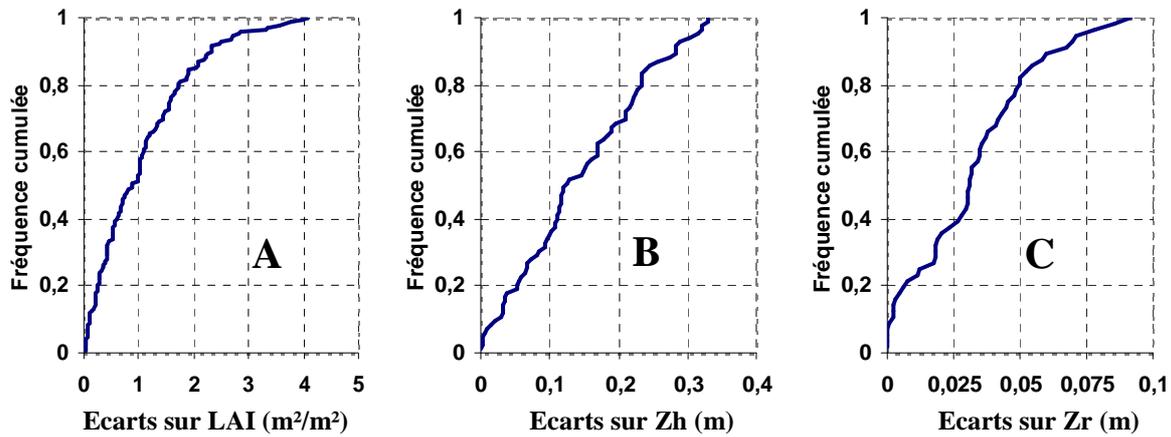


Figure 49. Fréquence des écarts entre les valeurs simulées par le modèle Bilhyna et celles mesurées expérimentalement pour le LAI et Zh (tous les traitements hydriques et années d'essais confondus) de même que celles donnée par l'ITGC (tous les traitements ETM et années d'essais confondus).

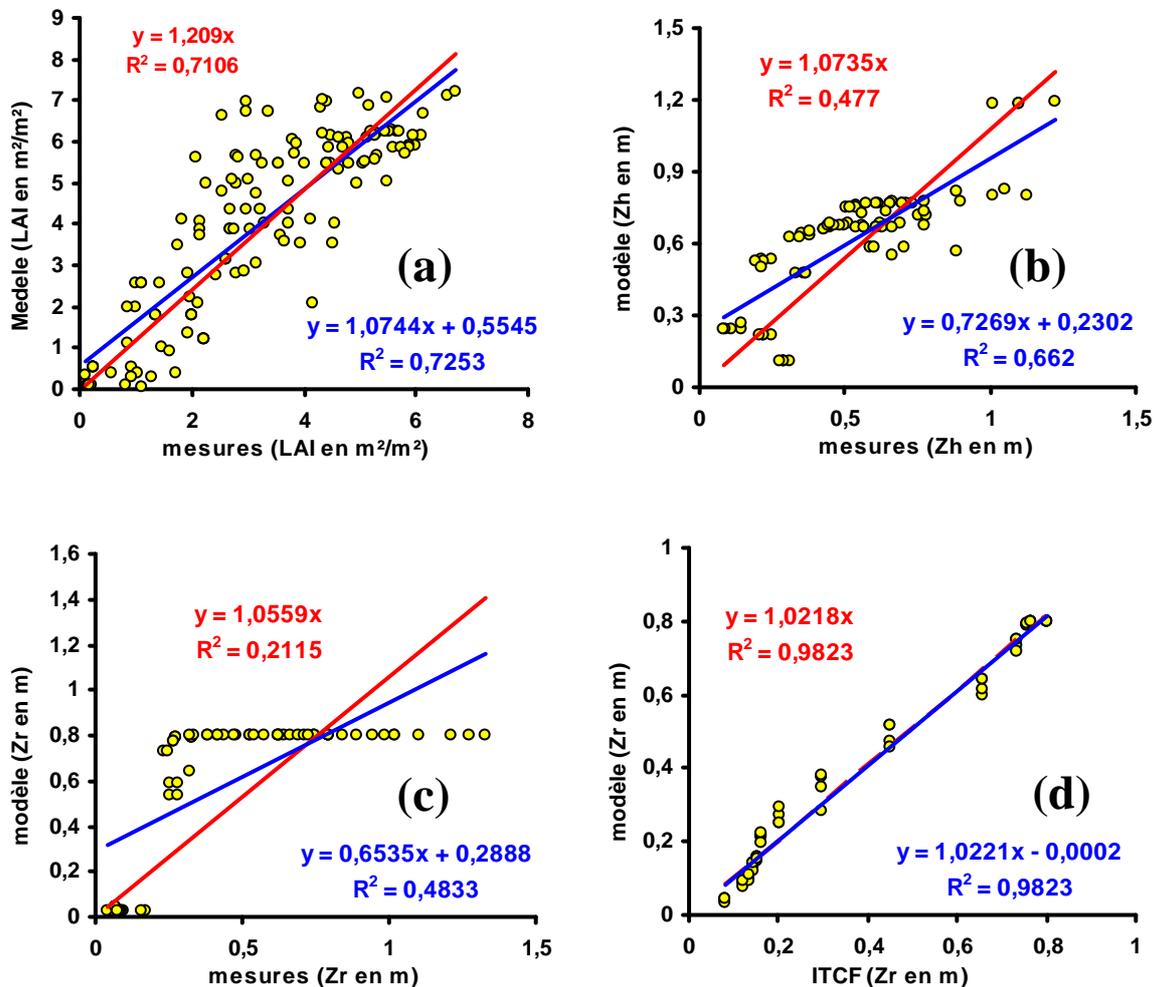


Figure 50. Confrontation entre les sorties du modèle Bilhyna et
 (i) les valeurs expérimentales mesurées de l'indice de surface foliaire LAI **(a)**, de la hauteur du couvert Zh **(b)** et de la profondeur des racines Zr **(c)** ;
 (ii) les valeurs de la profondeur des racines données par l'ITCG pour une croissance potentielle **(d)** et utilisées dans cet exemple comme référence.

Les résultats plus ou moins bons (*Figure 49B*) des écarts entre les valeurs simulées et mesurées des hauteurs du couvert semblent s'expliquer, quant à eux, par les effets de la présence de cette semelle de labour. Il y donc une répercussion directe du sol sur cette dispersion des points (*Figure 50b*) qui reste, tout de même, plus importante que sur le LAI (plus de détails par culture et par traitement sont donnés dans l'annexe III.2, *Figure 1B*). Les problèmes liés au xylème dans les tiges font que, généralement, les plantes réagissent fortement à un stress.

Le même constat est fait sur les racines puisque le stress se répercute en premier lieu sur ce paramètre avant de répercuter ses effets sur le reste des autres paramètres de croissance du couvert. La figure 50c montre donc un déphasage important entre les valeurs simulées par le modèle et les mesures expérimentales aux champs et cela à partir de 30 cm de profondeur environ, correspondant précisément à la profondeur de labour sur ces champs. En revanche, si on compare les valeurs des profondeurs des racines du blé simulées par le modèle bilhyna avec celles données par l'ITCG, on trouve un résultat presque parfait (*Figure 49C*), comme le montre la dispersion des points sur la figure 50d (plus de détails par année de cultures et par traitement sont donnés dans l'annexe III.2, *Figure 1C*). Ce qui laisse supposer que l'hypothèse de l'effet induit par cette semelle de labour est loin d'être négligeable.

En effet, on retrouve cette semelle de labour sur les essais 2000 et 2001, de même que sur les deux autres essais 2002 et 2004, mais de façon moins prononcée (*Figures 51A, 51B et 51C*), ce qui explique l'effet plus prononcé de cette semelle de labour sur les deux premières années de la culture du blé. A noter que cet effet de la semelle de labour n'a pas beaucoup influencé la croissance du sorgho conduit en pleine période estivale (sans pluie), sur un sol sec et fracturé (fontes de retraits).

Pour les années 2000 et 2001, on voit bien les valeurs de la profondeur des racines mesurées qui s'éloignent des valeurs modélisées (*51s 51A et B*). Une croissance normale des racines en profondeur, cependant, est notée sur les valeurs mesurées avant les 40 à 50 jours après semis, soit à environ 25 à 30 cm de profondeur de sol, qui restent d'ailleurs assez proches des valeurs modélisées. La semelle de labour qui se trouve à ce niveau de profondeur dans le champ bloque alors la progression des racines et le modèle décroche bien à partir de ce moment là. Les racines ne réussissent à dépasser cet obstacle qu'après une vingtaine de jours alors que durant ce temps là, le modèle continue à faire croître les racines qui s'approchent de plus en plus de la valeur maximale.

Fort de ce diagnostic, il est clair que ce phénomène de frein (semelle de labour), non pris en compte dans le modèle, doit être intégré dans la fonction f_{eau} qui régule la vitesse de croissance des racines en l'absence de conditions hydriques optimales. Nous allons donc voir quelles sont les répercussions de cette semelle de labour sur les paramètres du couvert LAI, Zh et Zr.

1- Indice de surface foliaire (LAI)

Comme on l'a vu sur le sorgho (*Figure 51A*) la semelle de labour n'a pas joué beaucoup sur la croissance du LAI, compte tenu des conditions de sol sec ayant caractérisé cet essai, et sa valeur simulée reste donc très proche de celle mesurée, en fonction du niveau de confort hydrique imposé. Pour le blé par contre, on voit bien le retard dû à l'effet de la semelle de labour sur les valeurs mesurées par rapport aux valeurs simulées (*Figures 50, 51A, 51B et 51C*), particulièrement durant la phase de sénescence. C'est le cas des deux premiers essais sur le blé (2000 et 2001). Les résultats sont cependant meilleurs sur les deux essais suivants (2002 et 2004) où l'effet de la semelle de labour semble moins fort, sans pour autant

disparaître totalement (détails de la confrontation mesures simulations sont donnés dans l'annexe III.2, *Figure 1A*).

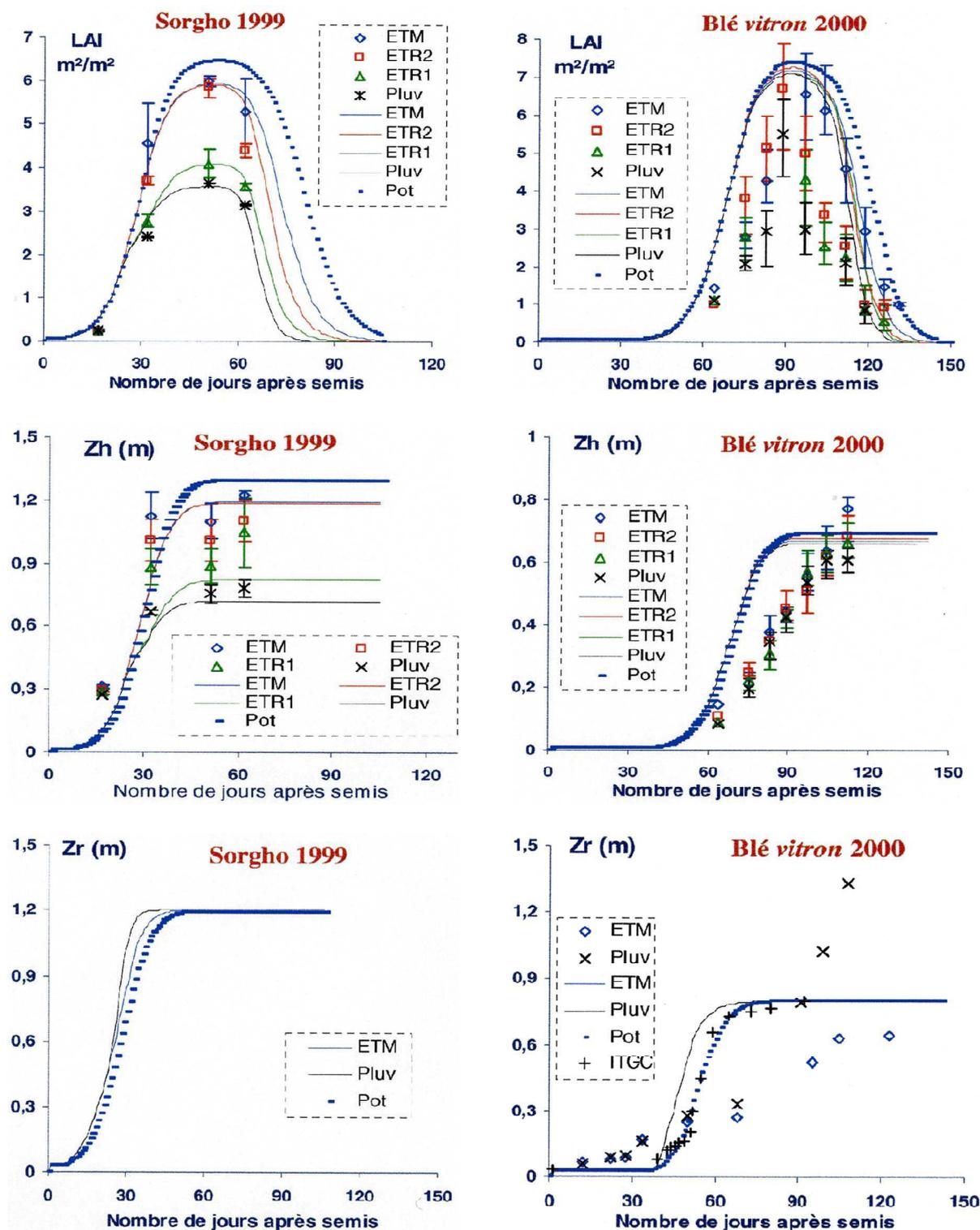


Figure 51A. Comparaison entre les valeurs de Lai, de Zh et de Zr, mesurées expérimentalement sur traitements ETM, ETR2, ETR1 et Pluv (représentées par \diamond , \square , Δ , \times , respectivement) et celles simulées par le modèle Bilhyna : (i) pour les mêmes conditions expérimentales sur chacun des quatre traitements (courbes en —, —, —, — respectivement) ; (ii) et en l'absence de toute contrainte hydrique (croissance potentielle Pot donnée par la courbe en -). Les valeurs de Zr de l'ITGC (courbe en +) sont présentées à titre indicatif.

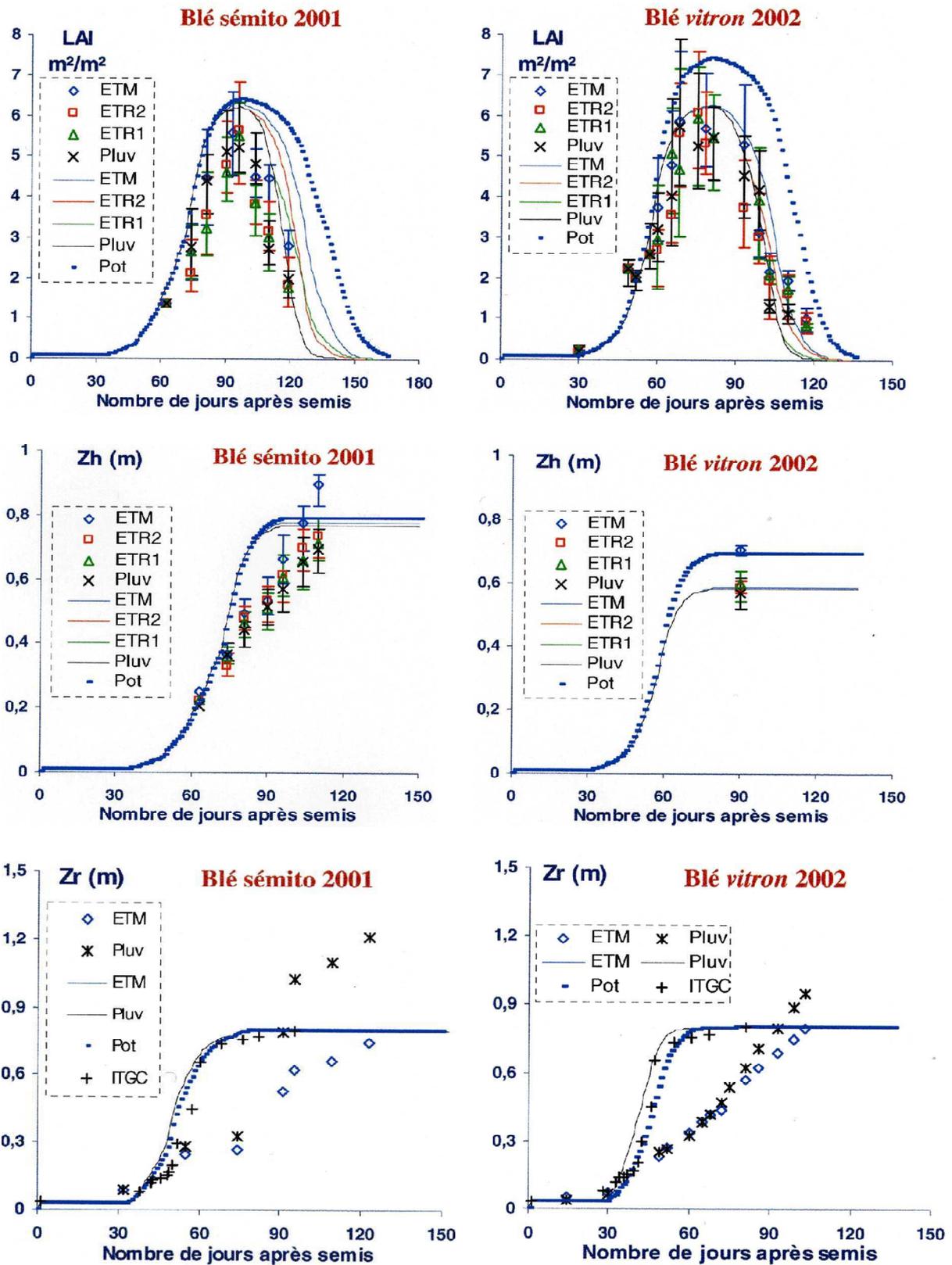


Figure 51B. Comparaison entre les valeurs de Lai, de Zh et de Zr, mesurées expérimentalement sur traitements ETM, ETR2, ETR1 et Pluv (représentées par \diamond , \square , \triangle , \times , respectivement) et celles simulées par le modèle Bilhyna : (i) pour les mêmes conditions expérimentales sur chacun des quatre traitements (courbes en —, —, —, — respectivement) ; (ii) et en l'absence de toute contrainte hydrique (croissance potentielle Pot donnée par la courbe en -). Les valeurs de Zr de l'ITGC (courbe en +) sont présentées à titre indicatif.

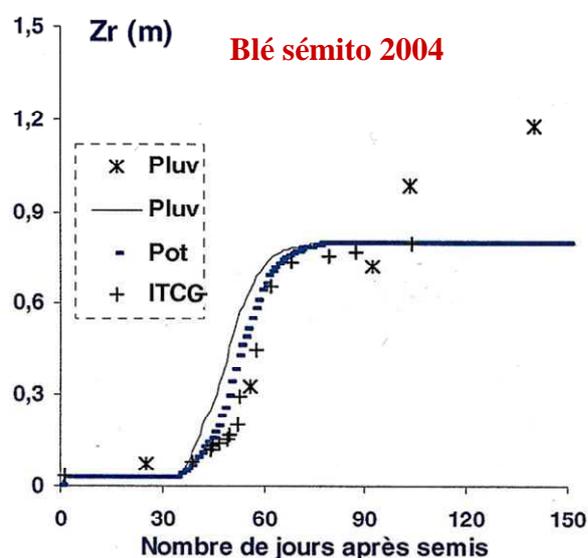
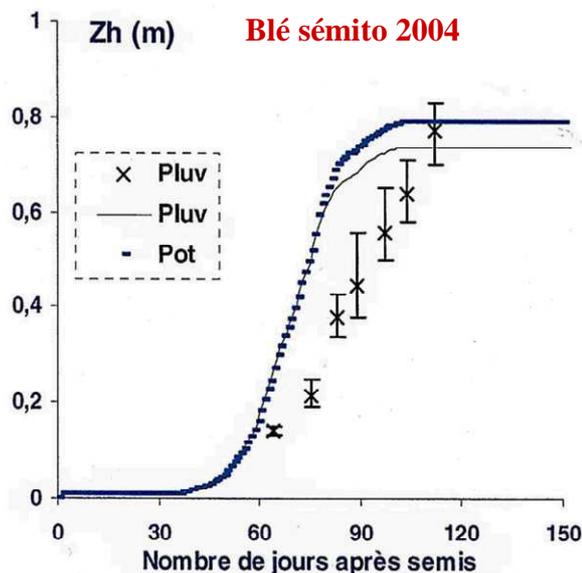
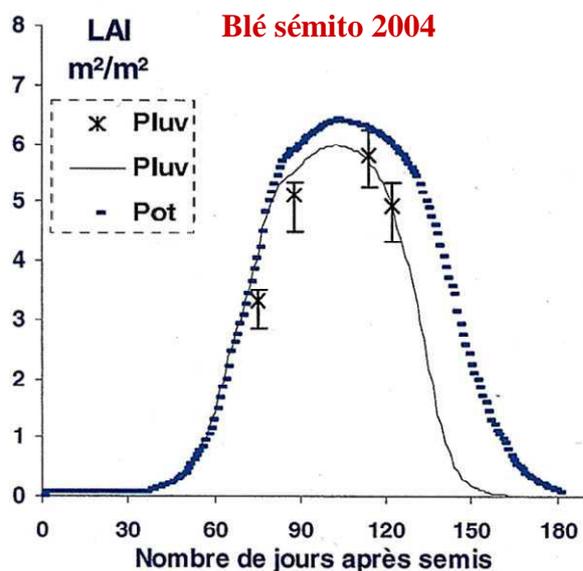


Figure 51C. Comparaison entre les valeurs de Lai, de Zh et de Zr, mesurées expérimentalement le traitement Pluv (représentées par X) et celles simulées par le modèle Bilhyna pour les mêmes conditions expérimentales (courbe en trait plein) et (ii) et en l'absence de toute contrainte hydrique (croissance potentielle Pot donnée par la courbe en -). Les valeurs de Zr de l'ITGC (courbe en +) sont présentées à titre indicatif.

2- Hauteur du couvert (Zh)

Le même constat que pour le LAI est fait sur Z_h , mais de façon plus prononcée comme le montrent les figures 50, 51A, 51B et 51C pour les hauteurs Z_h (détails de la confrontation mesures simulations sont donnés dans l'annexe III.2, *Figures 1B*). Deux raisons peuvent, cependant, expliquer ces divergences notées entre le modèle et l'expérimentation :

- la première concerne la durée de la croissance en hauteur du couvert arrêtée à la floraison par le modèle (imposée comme donnée d'entrée au modèle), et qui aurait dû se prolonger jusqu'au début de la sénescence, comme on le voit sur les valeurs expérimentales.
- La seconde étant celle liée à l'effet de la semelle de labour comme on l'a déjà vu car, en effet, on voit apparaître un stress hydrique sur les hauteurs des tiges coïncidant avec le moment de l'arrêt de la croissance des racines, induisant alors un retard de croissance pour ce qui est des valeurs mesurées par rapport aux valeurs simulées par le modèle.

Au vu de ces données, on a tendance à proposer une durée du cycle de développement des racines et des tiges pour toute la période de développement foliaire et pour une partie de la phase de sénescence (début de sénescence au moins)

3- Profondeur des racines (Z_r)

Les valeurs moyennes de la profondeur des racines données par l'ITGC confirment donc la bonne vitesse de croissance des racines simulées par le modèle (*Figures 49C, 50d, 51A, 51B et 51C pour les racines*) et que le décalage noté entre les valeurs simulées et mesurées s'explique, en partie, par la présence de la semelle de labour dans ces sols (détails de la confrontation ITGC et simulation sont donnés dans l'annexe III.2, *Figure 1C*). Rajouter une telle condition de sol dans le modèle, comme étant un troisième stress (en plus de celui du rayonnement de l'eau) dû à la matière du sol (définie par la densité du sol) et qui pourrait jouer comme un frein à la progression des racines, permet de mieux prendre en compte ces effets sur le retard de la croissance du couvert.

Par ailleurs, l'hypothèse d'inversion de k_0 pour traduire la stimulation des racines lors de l'installation d'un stress hydrique semble très bonne, bien que le modèle au moment où les simulations ont été faites ne permettait pas une progression de ces racines au-delà de $Z_{r_{max}}$. Toutefois, le modèle prend bien en compte, lors d'un stress hydrique, le volume de sol explorée par les racines qui se trouve alors supérieure à celui exploré par les racines évoluant en conditions hydriques sans contrainte, résultat illustré dans la figure 27, au paragraphe II.4. Il est à rappeler que le modèle Bilhyna, dans sa version actuelle, fait pousser les racines au-delà de la profondeur maximale lorsqu'un stress hydrique s'installe et prend en compte, dans ces calculs, cette surface de sol supplémentaire explorée sur une profondeur maximale ne dépassant pas $Z_{r_{max}}$.

Finalement, cette confrontation entre résultats simulés et mesurés a permis de tirer trois enseignements majeurs qu'il faudra prendre en compte dans le modèle, et qui sont l'allongement du cycle de croissance des tiges (et peut-être des racines) au-delà de la floraison, la progression en longueur des racines au-delà de la profondeur maximale lorsqu'un stress hydrique survient (déjà prise en compte dans la dernière version) et enfin la prise en compte de la nature des sols comme étant un frein susceptible de ralentir la progression en profondeur des racines et le considérer comme un stress induisant lui aussi un retard dans la croissance.

III.2.2.3. Développement et durée physiologique

La durée totale du développement simulée par le modèle prend bien en compte les particularités des divers types de cultures (espèces et variétés), selon la durée expérimentale en valeurs moyennes. Ces valeurs induisent donc des durées de stades semblables pour les mêmes types de cultures expérimentées (blé vitron, blé semito et sorgho), ce qui n'est pas surprenant en conditions de non stress, dans la mesure où ces durées de phases sont fixées dans le modèle comme données d'entrée. L'originalité du modèle, cependant, tient dans le fait que le Bilhyna est capable de raccourcir la durée totale du cycle de la culture lorsque celle-ci évolue sous les conditions d'un stress hydrique, en fonction de sa durée et de son intensité.

Le tableau 10, ci-dessous, résume les résultats des mesures expérimentales réalisées durant l'essai 2000, mais aussi ceux simulés par Bilhyna et leurs comparaisons. L'expérience réalisée montre que les traitements ayant reçu moins d'apport en eau que le traitement noté ETM (et ont donc subi plus de stress) ont achevé leurs phases de sénescence bien avant celle de l'ETM, et que la réduction de la durée de leur phase de sénescence, et par là de la totalité de leurs cycles, se trouve ainsi plus ou moins importante selon la durée et l'intensité du stress

hydrique. C'est le cas des traitements ETR1 et Pluv qui ont reçu le moins d'apport en eau et ont ainsi accusé la plus forte réduction de la durée du cycle, imposée par une sénescence plus rapide. Le traitement ETR2, qui a reçu plus d'eau, a accusé un stress moins fort et par là une sénescence moins sévère, qui à durée plus longtemps (perte moins rapide de LAIvert de cette phase) que celles observées sur les traitements ETR1 et Pluv (tableau 10).

Tableau 10: Raccourcissement du cycle total du blé (semis à fin sénescence) dû aux limitations en alimentation hydrique imposées selon les traitements (expérimentation de l'année 2000)

	Pluv	ETR1	ETR2
Durées des cycles des trois traitements notées Pluv, ETR1 et ETR2,, mesurées expérimentalement et rapportées à la durée du quatrième traitement considéré comme proche de l'ETM (noté ETM) et mesurée elle aussi expérimentalement	0.84%	0.84%	0.92%
Durées des cycles des trois traitements notées Pluv, ETR1 et ETR2, simulées par le modèle en fonction des conditions expérimentales réellement appliquées à la parcelle, rapportées à la durée du quatrième traitement considéré comme proche de l'ETM (noté ETM) et simulée elle aussi par Bilhyna en fonction des conditions expérimentales réellement appliquées à la parcelle	0.87%	0.90%	0.93%
Durées des cycles des trois traitements notées Pluv, ETR1 et ETR2, simulées par le modèle en fonction des conditions expérimentales réellement appliquées à la parcelle, rapportées à celle d'un traitement réellement potentiel (réserve en eau maintenue à la capacité au champ) simulée par le modèle Bilhyna	0.83%	0.85%	0.88%

Bilhyna, lui aussi, a réussi à bien traduire ce raccourcissement selon les différents confort hydriques imposés expérimentalement et pris en compte dans les simulations, avec une sénescence plus rapide sur les traitements stressés (notés ETR1 et le Pluv), et dans une moindre mesure pour le traitement au confort hydrique modérée (noté ETR2), comparé au traitement bien irrigué (noté ETM). Ce raccourcissement du cycle reste, tout de même, moins important que celui donné par l'expérimentation. En effet, la présence de la semelle de labour mentionnée plus haut (paragraphe III.2.2.2) semble avoir joué un rôle dans l'accentuation du stress durant la phase de sénescence sur les traitements ayant reçu peu ou pas d'apport supplémentaire par irrigation ; ce qui a conduit à un raccourcissement plus prononcé de la durée de la phase de sénescence mesurée expérimentalement, comparée à la durée suggérée par le modèle qui, lui par contre, ne prend pas en compte l'effet de cette semelle de labour.

Nous considérons ces résultats comme excellents dans la mesure où le modèle traduit un raccourcissement du cycle en conditions de stress, tout en modulant cette durée en fonction de l'intensité du stress. Une telle pertinence permet au modèle de prédire dans le temps, et en conditions variables de milieu, les dates probables de fin de croissance des couverts, comme c'est le cas du calendrier de récoltes en agriculture.

III.2.2.4. Evolution des stocks d'eau du sol

1- Introduction

L'élément essentiel de la modélisation des bilans hydriques est de faire une bonne estimation des stocks d'eau, car de cette estimation dépendra une bonne gestion des irrigations en complément aux pluies. C'est également cette gestion des stocks qui, compte tenu de l'évolution des LAI, Zh et Zr en fonction des stress, permet de gérer et d'optimiser l'utilisation de l'eau et sa consommation.

La confrontation entre l'expérience et la simulation est essentielle pour la validation du modèle. Aussi, on trouvera en annexe III.2, *Figures 2A et 2B*, tous les cycles sur lesquels nous avons travaillé, à la fois en cultures et en années climatiques. Dans Bilhyna, le bilan d'eau lié au bilan d'énergie permet de faire une gestion adéquate des bilans de stock d'eau, des prélèvements et des restitutions à la nappe. Toutefois, les modèles peuvent faire des erreurs d'entrées ou de sorties de résultats, d'où l'importance de cette partie validation.

Dans ces expérimentations, la seule mesure liée au bilan d'eau est celle du stock d'eau du sol, car les mesures de ruissellement, de captation et de drainage sont difficiles à faire. Finalement, on est donc essentiellement réduit dans ce travail à la validation du modèle par les seules mesures des stocks d'eau du sol disponibles. Notons que le modèle a déjà fait l'objet de tests pendant trois années de cultures sur 2 sites de la région de la Beauce (thèse B. Jabour, 2009), avec des modifications introduites à Bilhyna, dont celles que j'ai élaborées avec monsieur Alain Perrier (publication interne).

2- Bilan global

L'analyse montre une assez bonne à très bonne concordance entre les simulations de la réserve en eau par le modèle et les mesures réalisées sur le terrain (*Figure 52a*). Bien sûr, certaines mesures étaient à l'évidence totalement incohérentes avec la réalité de l'évolution des stocks et ont donc été supprimées ; ceci ne représente que cinq mesures incohérentes sur une série de mesures de 149 points.

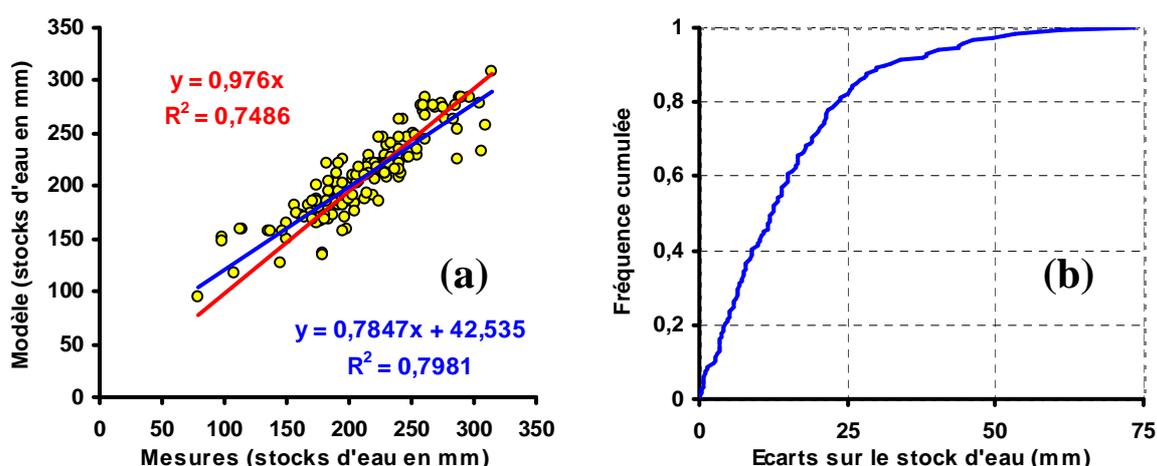


Figure 52. Confrontation des valeurs simulées par le modèle et celles mesurées expérimentalement (tout traitement et années confondus) pour les deux cultures **(a)** et fréquences des écarts entre ces valeurs mesurées et simulées **(b)**

Les écarts entre le modèle et les mesures sont de l'ordre de 15 à 25 mm dans l'ensemble, comme le montre la figure 52b. La plupart des points (82 %) présentent des différences de moins de 25 mm et moins de 9 % autour des différences comprises entre 25 et 35 mm. Cette plage de valeurs (25 à 35 mm) est comprise dans le domaine de l'incertitude des mesures, du moins celles réalisées en conditions de sols secs ; ce qui donne une précision de l'ordre de 6 % environ. Précision qui demeure très intéressante pour la gestion des irrigations, de même que pour l'établissement et le suivi des bilans annuels.

Les points divergents (moins de 9 %) sont dus dans la plupart des cas : (i) soit à une sous-estimation des stocks (comme on l'a vu sur le sorgho où on n'arrive pas à expliquer une vidange de sol mesurée au champ de l'ordre de 80 mm en l'espace de 10 jours, du 32^{ième} au

42^{ème} jour, sur les traitements bien desséchés, ETR1 et Pluv) ; (ii) soit à une surestimation de la recharge en eau du sol mesurée suite à des irrigations engendrant parfois des écoulements préférentiels entre le tube de la sonde à neutrons et le sol (espace créé souvent par suite d'alternance de phases d'humectation et de dessèchement du sol autour du tube de la sonde).

3- Stock d'eau par traitement et par essai

L'analyse montre une très bonne concordance entre les valeurs simulées par le modèle et celles provenant des mesures expérimentales (*Figure 53A et 53B*), si on exclut bien sûr les quelques valeurs divergentes qui restent incohérentes avec les conditions hydriques imposées aux parcelles expérimentales (plus de détails par traitement et par culture sont donnés en annexe III.2, *Figure 2A et 2B*). Ces résultats, assez satisfaisants à nos yeux, s'expliquent par la grande capacité du modèle à bien traduire, d'une part, les phases de dessèchement du sol (élément principal du modèle) dictées à la fois par l'évaporation du sol et les prélèvements par les racines et, d'autre part, par les phases de réhumectation du sol, bien prises en compte par le module infiltration.

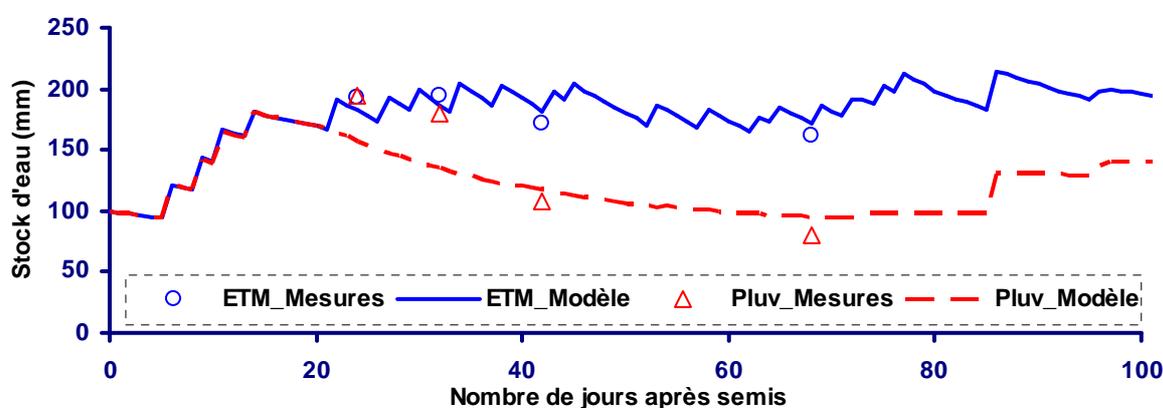


Figure 53A. Evolution des stocks d'eau mesurés expérimentalement (sorgho été 1999) et simulés par le modèle Bilhyna pour deux niveaux de confort hydriques imposés : celui du traitement proche de l'ETM (pluies + irrigations) et celui du traitement conduit sous conditions uniquement pluviales (sans irrigation)

La restitution des mesures a été en moyenne très bonne à bonne selon les années. Les meilleurs résultats sont obtenus sur le blé durant les essais 2000 et 2001 où, à quelques points près, le modèle est particulièrement fidèle aux mesures. L'écart maximum relevé entre les simulations et les mesures sur les deux traitements extrêmes (le premier ayant reçu plusieurs irrigations en plus des pluies alors que le second n'avait reçu que les pluies, tels que représentés sur la *Figures 53A et 53B*) ne dépasse pas les 30 mm. L'alternance des phases de dessèchement et d'humectation est relativement bien traduite, ce qui dénote la bonne estimation des prélèvements des racines, d'une part, et des processus d'infiltrations de l'eau, d'autre part.

Pour ce qui est des autres années expérimentales (culture de blé), le moins bon résultat sur le bilan d'eau a été observé sur le sorgho (ETR1 et Pluv particulièrement), conduit en pleine période estivale. Les prélèvements effectués sur les traitements ayant reçu peu d'eau d'irrigation ont été faits sur un sol totalement desséché et donc difficilement pénétrable avec une tarière, lorsque la sonde n'était pas disponible bien sûr ; ce qui laisse croire à d'éventuelles imprécisions sur les mesures durant cet essai.

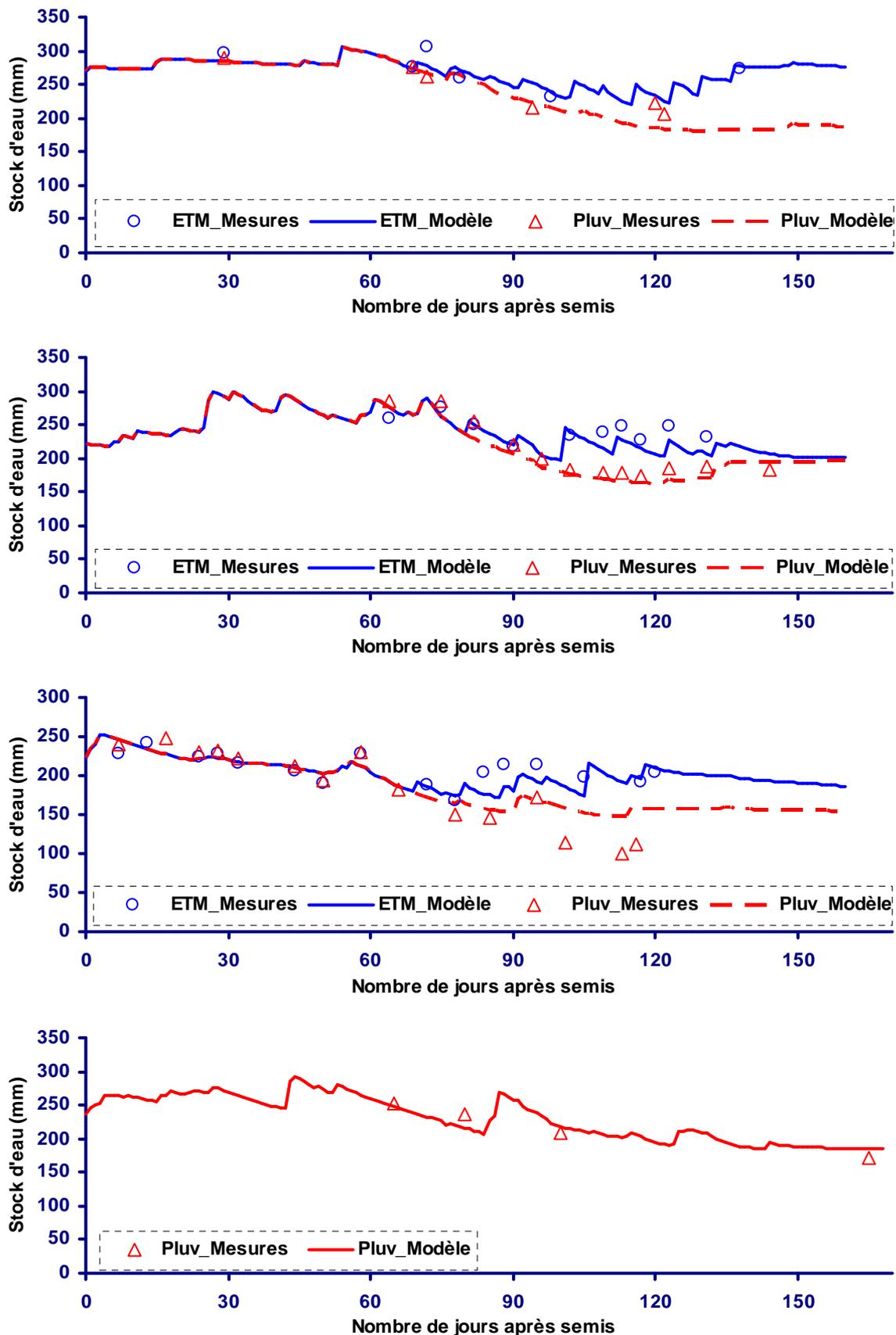


Figure 53B. Evolution des stocks d'eau mesurés expérimentalement (blé 2000, 2001, 2002 et 2004) et simulés par le modèle Bilhyna pour deux niveaux de confort hydriques imposés : celui du traitement proche de l'ETM (pluies + irrigations) et celui du traitement conduit sous conditions uniquement pluviales (sans irrigation)

Globalement, les traitements les plus soutenus avec les irrigations (ETM et ETR2) présentent une concordance entre les valeurs mesurées et simulées, légèrement inférieures à celles données pour les traitements ETR1 et le Pluv. La méthode d'irrigation (homogénéisation de l'arrosage) et les quantités d'eau réellement apportées (le temps d'irrigation, la pression en tête de réseau et au niveau d'asperseurs) peuvent expliquer en partie cette différence entre les deux groupes de traitements. Différence qui reste, pour le moins, assez faible lorsqu'il s'agit des traitements conduits en conditions pluviales uniquement (les mesures des pluies sont généralement comptabilisées au niveau des stations de météorologie, selon des protocoles assez rigoureux).

Il ressort de cette analyse, finalement, que le modèle présente de bons résultats quant au suivi de l'évolution temporelle des stocks d'eau, en conditions réelles notamment, malgré les quelques points divergents qui restent tout de même limités à un nombre assez réduit de situations.

III.2.2.5. Conclusion à la validation du modèle biophysique (développement-croissance)

Nous avons cherché à traduire de façon simple l'évolution des couverts à travers un modèle de loi dit de logistique, largement utilisé pour décrire l'évolution de divers processus biologiques, et que nous avons adapté au contexte physiologique des cultures évoluant souvent sous des conditions de milieux variés. La régulation de la croissance dans cette logistique a été possible à travers la modulation de sa vitesse de croissance, définie par le terme k , en fonction des deux stress les plus importants chez les végétaux, soit l'eau et le rayonnement. Cela permet de caractériser à partir d'un petit nombre de paramètres facilement abordables en bibliographie, tout type de couverts végétaux évoluant en conditions de sol et de climat variés.

L'évolution des paramètres du couvert a des effets relativement importants sur l'évolution des bilans. C'est pourquoi nous avons cherché à approcher ces valeurs du couvert (LAI, Z_h et Z_r) et à renseigner le modèle à tout moment, quelles que soient les conditions du milieu. On a vu qu'à travers un petit nombre de paramètres renseignés pour faire tourner le modèle, Bilhyna est capable, sous divers confort hydriques, de traduire l'évolution des couverts avec une bonne précision. Les résultats des cinq essais apportent par ailleurs des indications très intéressantes pour l'amélioration du modèle, concernant en particulier (i) le frein à la croissance en profondeur des racines induit par la matière du sol (comme c'est le cas de la semelle de labour) et sa prise en compte comme un stress retardant la croissance, (ii) le prolongement de la durée de la croissance des tiges (et probablement des racines) qui semble se maintenir jusqu'au début de la sénescence et enfin la croissance en profondeur des racines qui tend à dépasser de loin celle imposée par $Z_{r_{max}}$ lorsqu'un stress hydrique s'installe. Le modèle proposé a l'intérêt de pouvoir être facilement extrapolable à différentes situations, comme on vient de le voir sur les cinq essais expérimentaux (deux cultures, deux variétés, deux types de sols et différents confort hydriques).

Les résultats montrent, dans l'ensemble, une bonne restitution par le modèle des valeurs de bilan d'eau mesurées, avec une erreur inférieure à 6 %, ce qui constitue en soit un résultat fort intéressant pour la gestion des systèmes de production où la précision tient une place non négligeable, comme c'est le cas pour le pilotage des irrigations, les bilans de nappes de même que pour toutes les approches intégrant différents processus, qu'ils soient d'ordre physique, biologique, agronomique et autres.

III.3. Conclusion au chapitre expérimentation-validation

L'approche utilisée dans l'élaboration du modèle de loi d'action de la température sur la vitesse de croissance a été originale dans le sens où ce modèle permet d'utiliser une vraie loi d'action de la température qui prend en compte l'ensemble de la gamme des températures actives pour un processus biologique donné, contrairement à une simple loi linéaire qui reste valable pour une gamme assez limitée de température, mais aussi de travailler à des échelles de temps variées (journées, heures et autres). Aussi, nous avons vu que ce modèle, qui nécessite un petit nombre de paramètres découlant tous de l'expérience et facilement accessibles dans la bibliographie, simule avec une grande précision l'action de la température sur la vitesse de germination des graines ; processus assez facilement extrapolable à l'ensemble du cycle de développement-croissance d'un couvert, comme on vient de le voir dans cette partie.

Nous avons vu également la grande capacité du modèle développement-croissance à traduire l'évolution du couvert à travers le modèle logistique introduit, en se basant lui aussi sur des paramètres provenant de l'expérience et disponibles dans la Bibliographie. L'intérêt de ce modèle réside dans son approche générale du processus développement-croissance qui permet son extrapolation à tous les types de couverts végétaux (cultures et variétés). Ce modèle, qui prend aussi en compte la variabilité des sols et des climats, a été testé avec de bons résultats en conditions de confort hydriques variés face aux mesures, bien que certains phénomènes (semelle de labour) non pris en compte par Bilhyna n'ont pas permis de pousser plus loin la confrontation et donc sa validation. Ces tests nous ont, tout de même, permis de tirer un enseignement riche et intéressant dans la mesure où ils nous ont apporté des indications intéressantes d'amélioration du modèle, en relation avec les freins possibles de la progression des racines dus à la nature de sol (densité). Ces expériences montrent que la croissance des racines peut aller bien au-delà de la profondeur maximale renseignée au modèle lorsqu'un stress s'installe. On constate aussi que pour la hauteur du couvert, comme c'est le cas pour le blé qui a toujours été considérée comme évoluant de façon très similaire au LAI, peut se différencier de l'évolution du LAI et avoir un comportement particulier, avec une croissance non négligeable durant la troisième phase nommée plateau. Question qu'il est important, éventuellement, de traiter dans Bilhyna.

Les trois paramètres des couverts (LAI, Z_h et Z_r) étant facilement approchés par le modèle, il devient alors possible de suivre l'évolution des bilans d'eau d'un sol et d'intervenir à tout moment pour apporter des conseils, comme c'est le cas lors du pilotage des irrigations en vue de corriger le bilan d'une parcelle. A ce titre, le modèle a montré de grandes capacités à établir un suivi assez précis des stocks d'eau du sol, justifiant pleinement son utilisation dans le pilotage des irrigations mais aussi dans l'établissement des bilans des nappes d'eau, comme c'est le cas actuellement sur la nappe de Beauce et celles des Oasis en Tunisie ; ceci ouvre de grandes perspectives quant à son utilisation sur d'autres approches, telles que celles liées aux milieux forestiers par exemple.

CHAPITRE IV.

INTERVENTIONS TECHNIQUES : MODÈLE DE PRISE DE DÉCISION LABOUR-SEMIS

IV. Interventions techniques : modèle de prise de décision Labour-semis

Les pratiques culturales sont des éléments déterminants dans l'évolution du cycle des cultures et des bilans d'eau du sol. Ils doivent permettre un meilleur positionnement des cultures dans le temps et favoriser une bonne adéquation avec le pédoclimat. Sous l'angle du bilan de l'eau par exemple, le retournement du sol réalisé suite à un labour accélère le dessèchement de la couche travaillée surtout si une courte période sans pluie s'installe, mais facilite en revanche le remplissage rapide et profond de cette tranche de sol lorsqu'une pluie survient. Quant à la date propice pour le semis, elle déterminante pour la phase de germination et d'émergence du couvert puis celle du cycle de développement-croissance qui suit. Cette évolution des parties aériennes et souterraines va modifier fortement les bilans hydriques et nécessite un bilan fortement positif, d'où l'importance du positionnement du cycle et la nécessaire minimisation des irrigations de complément, hors cultures sous irrigation totale. C'est pourquoi il est important de bien positionner et donc de prévoir à priori la meilleure date pour le labour et le semis dans un modèle de bilan hydrique, d'autant plus, que ces deux pratiques sont fortement conditionnées par le contexte pédoclimatique d'une région. Notre objectif est donc de simuler les meilleures dates probables et possibles pour la réalisation du labour et du semis lors du démarrage d'une campagne agricole, mais aussi de générer ces dates de façon automatique par le modèle Bilhyna lors des simulations rétrospectives et surtout prospectives effectuées pour toutes les études systématiques de bilan d'une région.

IV.1. Module labour et prise de décision

La réalisation des travaux de sols nécessite en général que le sol ne soit pas trop humide, afin de minimiser tous les problèmes liés au tassement des sols, à leur compression et surtout à la praticabilité des parcelles pour l'utilisation des machines. Bien sûr, le labour nécessite des sols pas trop secs, pour éviter les pertes de particules facilement transportables par le vent et amoindrir les coûts de la traction, et par là, celle de la consommation d'énergie. Pour éviter ces deux situations dans le contexte de la Mitidja (fin d'été très sec avec des épisodes pluvieux et parfois assez forts et aléatoires en automne), nous avons mis en place un module simulant les conditions propices pour la réalisation des labours et des façons superficiels en général, basé sur ces deux limites d'humidité définie en terme de réserve en eau du sol (R) pour la profondeur du labour, soit $[R]_0^{Z_{LAB}} = \rho(H_{cc} - H_a) \cdot Z_{LAB}$. Les paramètres de ce module sont:

- Pluies : données d'entrées du modèle (*pluies réelles jusqu'au temps t et analyse prospective des pluviométries probables à partir d'analyses statistiques*)
- ETR : Données de sorties du modèle (valeurs calculées jusqu'au temps (t), et valeurs probables en prospective)
- Limite du niveau de réserve en eau maximale $[(R_{LAB})_{Max}]_0^{Z_{LAB}}$ pour effectuer le labour, qui dépend des caractéristiques du sol considéré et de leurs comportements vis-à-vis des caractéristiques des outils et de la traction. Cette humidité est généralement connue pour une certaine profondeur de sol et de labour (données souvent disponibles sur les notices et fiches techniques des constructeurs d'outils et de machines, mais peut-être également approchées par la connaissance expérimentale des producteurs eux-mêmes sur leurs sols)

- Limite du niveau de réserve en eau minimale pour effectuer le labour $\left[(R_{Lab})_{Min} \right]_0^{Z_{LAB}}$. Cette réserve minimale dépend, comme précédemment, du sol, des outils et de la qualité des labours recherchés.

Il est important de signaler que l'analyse par Bilhyna doit au minimum commencer après la récolte d'une culture, mais le plus souvent résulte de la continuité de la modélisation à travers les successions culturales et des cycles annuels. L'état exact de l'humidité du sol étant ainsi parfaitement défini chaque jour (t) par le modèle.

Conditions nécessaires à la décision de labour :

Soit une réserve pour la profondeur de labour souhaité $\left[R_{LAB} (t) \right]_0^{Z_{LAB}}$, renseignée quotidiennement par Bilhyna, il y aura donc décision de labour effectuée par le modèle lorsque les deux conditions limites ci-dessus sont simultanément satisfaites. Cette première condition générale est d'ordre technico-pratique mais n'est qu'une condition nécessaire et non suffisante pour effectuer le labour.

- Première condition :

$$\left[(R_{LAB})_{Min} \right]_0^{Z_{LAB}} < \left[R_{LAB} (t) \right]_0^{Z_{LAB}} < \left[(R_{LAB})_{Max} \right]_0^{Z_{LAB}}$$

Une seconde condition cherche à éviter que, malgré la première condition satisfaite, cette condition résulte d'une série de pluies assez importantes durant les trois derniers jours qui rendraient la partie supérieure du sol (les premiers cm de sol particulièrement) encore trop humide par manque de rééquilibrage avec la partie sous-jacente à l'horizon de sol travaillé (horizon de labour). Pour éviter une saturation excessive dans les premiers centimètres du sol travaillé, la seconde condition s'écrira :

- Deuxième condition :

$$\left[\sum_{j=1}^{j-n} P - \sum_{j=1}^{j-n} ETR \right] \leq \frac{1}{x} \cdot \frac{n}{n_{Max}} \cdot \left[R_{Lab}(t) \right]_0^{Z_{LAB}}$$

et x varie selon les potentialités de ressuyage des sols (de 2 pour sols avec bon ressuyage à 5 pour des sols avec un mauvais ressuyage).

Bien sûr, cette condition doit être satisfaite, à la fois pour le premier jour avant labour (n=1), mais aussi pour les deux jours précédents le labour (n=2), comme pour les trois jours précédents le labour (n=3). Ce qui se passe avant $n_{Max}=3$, n'a plus trop d'importance car le ressuyage a eu lieu à peu près sûrement. Il est évident que pour des sols très peu filtrants, la valeur de n_{Max} peut atteindre des valeurs supérieures à trois.

La réalisation du labour et des façons superficiels dépend non seulement des conditions climatiques et du sol comme on vient de le décrire, mais aussi des conditions matérielles dont dispose chaque agriculteur (disponibilité de matériels de labour et des autres outils superficiels, de la main d'œuvre etc...). C'est pourquoi les tests de simulations des dates de labours sont possibles chaque jour, depuis la récolte. Si les agriculteurs n'ont pu intervenir à temps pour cette opération (pour des raisons de disponibilités), le modèle continuera à proposer d'autres dates plus tardives de labours possibles. Mais l'agriculteur, comme on le verra avec le semis, peut perdre un temps précieux pour la culture en retardant cette intervention.

IV.2. Module semis et prise de décision

Le but recherché à travers ce module semis est de permettre à Bilhyna de décider une date de semis propice à l'installation de la culture en fonction de l'évolution climatique réelle de l'année et de l'état du bilan d'eau du sol. Ce choix doit aussi permettre d'assurer un certain confort hydrique acceptable pour la culture, depuis la date de semis décidée jusqu'au début le plus certain de la période humide (pour ce qui est de l'agriculture pluviale), pluies qui deviennent significatives pour le remplissage de la réserve du sol..

Si l'agriculteur dispose d'un stock d'eau pluviale (retenue en eau ou barrage ou aquifère), il peut décider de mettre cette quantité (ou partie de cette quantité) à contribution (quantité qui est à renseigner au sein du modèle). Cette valeur permet au modèle une décision sur une date de semis qui peut-être plus précoce, forte utile pour le développement rapide de la végétation, ce qui est toujours souhaitable compte tenu des printemps parfois très sec et très chauds (sans sécurité d'une réserve assez importante, le risque de perte d'un semis précoce est trop grand).

IV.2.1. Conditions nécessaires à la prise de décision d'un semis

Un semis dépend pour sa réussite de deux conditions majeures :

* d'un lit de semence suffisamment humide (pas de fonte de semis). L'humidité de la première couche du sol (les 10 premiers centimètres) est et simulée et renseignée quotidiennement par Bilhyna.

* et des conditions de réserves suffisantes pour assurer une sécurité de développement et de croissance satisfaisante, même si le semis est tardif. En effet, les risques sont grands depuis la date de semis jusqu'au début de la période humide (période des pluies statistiquement sûre et significative, définie par $(\Sigma P - \Sigma ETP) \gg 0$. Par contre, l'intérêt du risque d'un semis précoce (atténué éventuellement par les disponibilités en eau) est d'avoir un développement final précoce (profitant au maximum de la période humide) et par conséquent de satisfaire au mieux les besoins en eau en début de printemps.

Pour satisfaire ces conditions, qui sont inconnues pour une année en cours (prospective), le seul moyen est de faire une analyse statistique du risque encouru à partir de la date de semis décidée jusqu'au début de la période humide. Compte tenu d'une série d'années de données climatiques (au moins 30 à 50), Bilhyna peut être utilisé, a priori, pour calculer les besoins d'une culture entre la date de semis et le début de la période humide, et d'en préciser la statistique (méthode des quintiles par exemple) sur la période de données climatiques. Cette statistique permet de choisir avec quelle probabilité on a la possibilité de conduire le couvert sous conditions hydriques satisfaisantes depuis le semis jusqu'au début de la période humide (les conditions moyennes sont données par le 3^{ième} quintile, soit en moyenne une bonne conduite de la culture, sans aléas, assurée une année sur deux).

Suivant le choix du quintile, on peut réduire le risque (quatrième ou cinquième quintile) ou au contraire augmenter ce risque (deuxième ou premier quintile).

IV.2.2. Base méthodologique d'analyse du risque

Pour obtenir des valeurs prospectives de consommation en eau en supposant de bonnes conditions hydriques depuis le choix de la date de semis (jour j) jusqu'au début de la période

humide (Dh), $\sum_{j=0}^{\text{début période humide}} ET_{sys}$, il a été proposé de faire une analyse statistique de ces

consommations sur environ 40 ans de données disponibles. Dans ces conditions, instruire une analyse statistique fréquentielle simple (comme celle donnée par une approche en quintiles) permettrait de définir cette variabilité des besoins en eau pour un bon développement (valeur fixée arbitrairement dans le modèle « Bilhyna » à un sol maintenu au dessus de $0.75 R_{max}$, ce qui revient à maintenir des ET_{sys} proches des ETM).

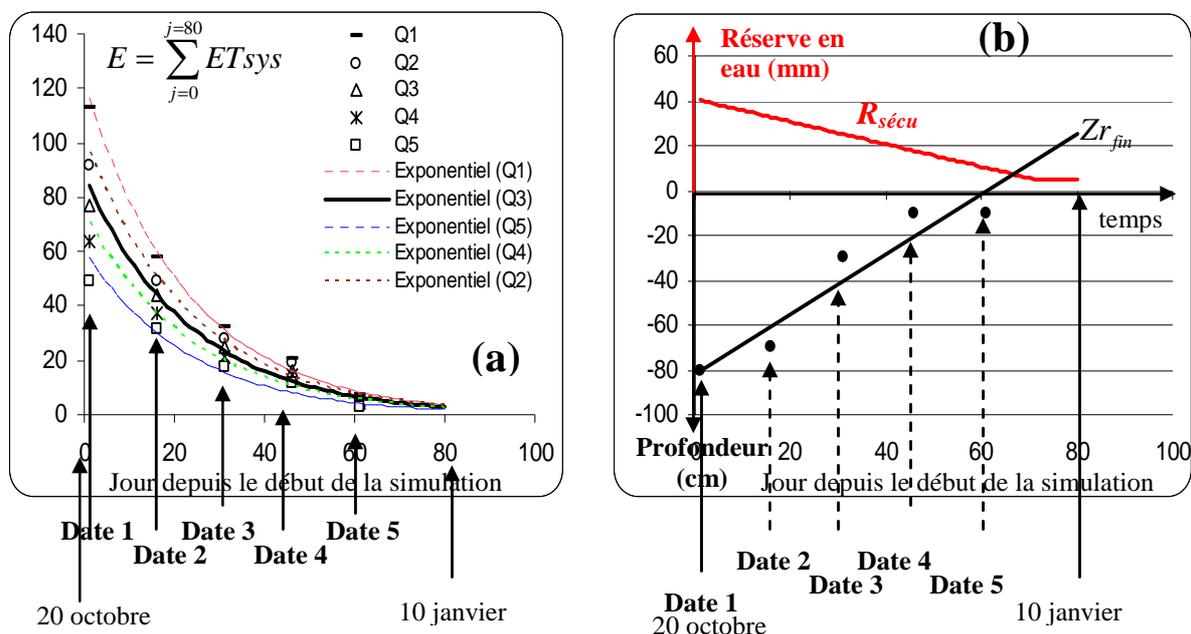


Figure. 54. (a) Evolution de la consommation (ou besoin) en eau possible (E) pour la période d'étude statistique (pour une réserve en eau supérieur ou égale à 75% de R_{max}), associée à un niveau de probabilité obtenu à partir de cinq dates de semis réalisés durant cette même période d'étude (chaque courbe exponentielle ajuste les points des besoins en eau de la culture obtenus chaque jours et appartenant au même niveau de probabilité).
 (b) Evolution (i) de la profondeur de semis (droite en noir) en fonction des dates de semis prises en compte durant la période d'étude statistique (évolution journalière assimilée à une droite Zr_{fin}); (ii) et de la réserve de sécurité $R_{sécu}$ (droite en rouge).

En fait, cette analyse se fera en fonction de cinq périodes de semis couvrant l'ensemble de la période de semis possible (du 15/10 au 31/12, pour des intervalles de 15 jours). Pour des questions pratiques de calcul et de simple signification compte tenu de la variabilité interannuelle, le choix d'une période de quinze jours a été fait (il aurait pu être d'une semaine, mais pas moins). Il est alors possible d'établir pour ces cinq périodes de semis (centrées sur les dates du 23/10, 7/11, 22/11, 7/12, 22/12) une statistique de la variabilité des consommations sous forme de cinq valeurs (valeurs associées à chaque quintile). Il est aisé d'obtenir pour un même quintile et pour l'ensemble de la période possible de semis la courbe exponentielle qui ajuste les points de besoins en eau des cultures obtenus (Figure 54a). Selon le choix d'un quintile l'exponentielle correspondante permet d'obtenir les besoins en eau souhaitables pour assurer un bon semis jusqu'à la période humide pour chaque jour de la période de semis (15/10 au 31/12).

Simultanément, le calcul par Bilhyna de ces besoins en eau prospectifs de la culture fournit la profondeur moyenne des racines atteinte à la fin de la période humide pour chacun des cinq semis. Ces valeurs évoluent en fonction de leur date de semis prise en compte dans cette étude statistique (période de développement croissante) et peuvent être bien simulées par une droite de régression utilisée pour obtenir, à partir de chaque date possible, la profondeur des racines, Zr_{fin} (Figure 54b).

Par ces deux solutions prospectives proposées, les besoins en eau nécessaires pour conduire le semis jusqu'à la période humide et la profondeur du sol ($Z_{r_{fin}}$ atteinte) sur laquelle cette quantité d'eau nécessaire doit être disponible à la date de semis, sont obtenus et ces résultats dépendent du choix du quintile admis (sécurité admise).

IV.3. Application et résultats des simulations (labour-semis)

IV.3.1. Données d'entrée pour le modèle labour-semis :

Un essai de simulation des dates de labours et des semis a été réalisé sur un jeu de données météo provenant de la station météorologique d'Alger (Dar-el-Beida), couvrant sur 37 années la période propice pour laquelle les deux opérations culturales sont préconisées pour la culture du blé, conduite sous conditions pluviales. Les sols de la Mitidja (Ouest particulièrement) sont caractérisés en moyenne (Imache, 2005) par les limites hydriques volumiques suivantes :

H_{cc} (humidité volumique à la capacité au champ) = 40%

H_{min} (humidité volumique au point de flétrissement permanent) = 20%

H_a (humidité volumique en équilibre avec celle de l'air) = 10%

Pour une profondeur de labour de 30 cm, la réserve $[R]_0^{Z_{LAB}} = \rho(H_{cc} - H_a) \cdot Z_{LAB} = 60 \text{ mm}$

Ces sols sont de type limoneux-sableux, considérés comme profonds, avec un assez bon drainage.

Pour le labour :

Première condition :

$[R]_0^{Z_{LAB \min}}$ et $[R]_0^{Z_{LAB \max}}$ ont été estimés et fixés, compte tenu de la variabilité des caractéristiques des matériels utilisés pour la réalisation de cette intervention et de la variabilité des sols, aux valeurs moyennes suivantes valables à l'échelle régionale:

Pour une profondeur de labour (Z_{LAB}) de 30 cm

$$[R]_0^{Z_{LAB \min}} = \frac{1}{2} \cdot [R]_0^{Z_{LAB Hcc}} = 30 \text{ mm} \quad \text{et} \quad [R]_0^{Z_{LAB \max}} = [R]_0^{Z_{LAB Hcc}} = 60 \text{ mm}$$

Deuxième condition : $x = 3$ et $n_{\max} = 3$

Pour le semis :

Première condition :

Permettre une bonne germination en prévoyant dans la première couche (lit de semence) une humidité suffisante ou optimale (R_{Lit_opt}) :

$$0.8 [R_{cc}]_0^{Z_{Lit \text{ semence}}} < R_{Lit_opt} < [R_{cc}]_0^{Z_{Lit \text{ semence}}}$$

Deuxième condition :

Risque par rapport au quintile choisi pour assurer le bon développement jusqu'à la période humide, soit par exemple pour le 3^{ème} quintile, qui offre une sécurité d'une année sur deux (Plus de détails sur l'exemple et sur le suivi du semis sont donnés en annexe IV)

Avec ces paramètres d'entrée du modèle pour le labour et son travail de surface, puis pour le semis, il est possible de déterminer le moment adéquat du semis. Ce moment est arrêté lorsqu'au jour j , le bilan établi entre la consommation probable du couvert (du jour j au jour D , soit jusqu'au début de la période humide) et la disponibilité réelle en eau du sol au jour j considéré, est positif ($\text{Disponibilité} - \text{Consommation} > R_{\text{positive}}$). En fait, cette disponibilité est calculée pour la profondeur du sol qui correspond à la profondeur atteinte par les racines au jour D ; Disponibilité, Consommation et Réserve positive ont été décrites au paragraphe IV.2 ci-dessus.

En effet, selon ce double principe (labour et semis) et compte tenu du choix ci-dessus des paramètres (n) nécessaires, il est possible de simuler les dates de labours puis de semis sur toutes les années de données disponibles (37 ans).

Pour réaliser cela, le module analyse les conditions et déclenche la réalisation de l'intervention technique. Cependant pour la date de semis, il faut chaque jour j (du 1/09 à la date du déclenchement de l'intervention) définir : (i) la valeur de la consommation probable selon la courbe exponentielle établie (consommation probable entre j et D) pour une sécurité choisie (quintile de 1 à 5 dans la figure 54a); (ii) la disponibilité en eau réelle au jour j donnée par Bilhyna et fixée par la profondeur d'enracinement probable au jour D , compte tenu de la droite (profondeur d'enracinement en fonction du temps, donnée sur la figure 54b); (iii) et, en plus, une réserve de sécurité supplémentaire $R_{\text{sécu}}$ (critère optionnel pour les cultures très sensible au stress hydrique) fixée en fonction des aléas climatiques et surtout du sol selon la courbe de réserves de sécurité donnée par la profondeur en fonction du temps j (figure 54b).

IV.3.2. Résultats pour le module labour :

Les résultats montrent que les premières possibilités de labour se présentent très tôt, dès les premières pluies de septembre, le sol étant sec à ce moment de l'année (sortie de la période estivale, caractérisée par une absence presque totale de pluies). Tout risque d'engorgement en eau des sols est alors totalement écarté, ce qui élimine la première condition liée à la praticabilité des engins agricoles en situation d'engorgement des sols, compte tenu le climat zone d'étude en question (zone de la Mitidja à climat proche de celui semis aride).

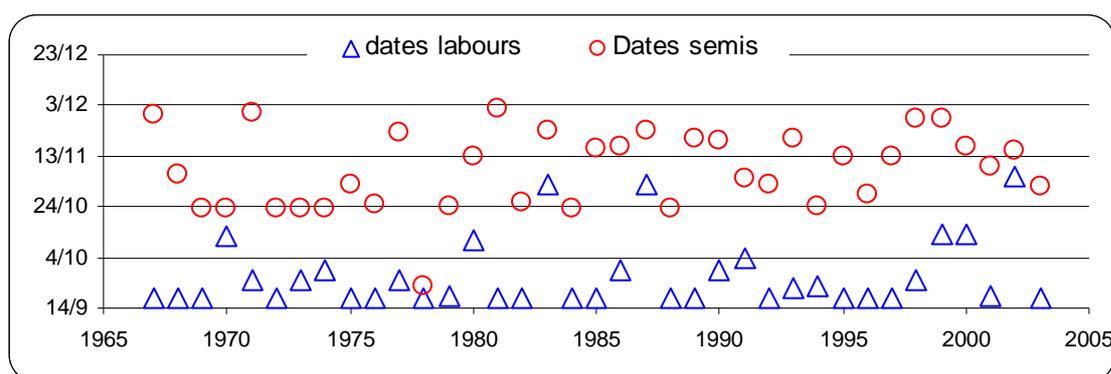


Figure 55. Premières dates de labours et des semis simulées par Bilhyna durant la période de simulation (période allant du 15 septembre pour le labour et du 20 octobre pour le semis jusqu'au début janvier).

La seconde condition se trouve, quant à elle, très vite satisfaite avec les premières pluies puisqu'il s'agit de remplir à moitié les premières couches de sol, soit la tranche de sol labourée, ce qui est souvent atteint à partir du mois de septembre (Figure 55). Ceci n'exclut toutefois pas d'éventuels retards dans la réalisation des labours, faute de pluies durant cette

période sur la région en question. On constate en première approximation que 60% des labours se font dès la première quinzaine de septembre alors que le reste a lieu au mois d'octobre, voire au tout début novembre pour certains, ce qui n'est pas sans importance pour le semis et finalement sur le retard de la période de croissance.

IV.3.3. Résultats pour le module semis

Le modèle montre que les premières dates de semis, quant à elles, arrivent bien plus tard que les labours dans la mesure où les pluies tombées de septembre à la mi-octobre n'arrivent pas à combler le déficit de réserve accusé durant la période estivale. Les premières dates de semis possibles sont, d'après le modèle pour fin octobre ; on comprend pourquoi les risques de pertes de semis sont élevés si ces derniers venaient à être réalisés en fin septembre ou début octobre, ce qui était parfois le cas, compte tenu de l'irrégularité des pluies entre cette date et la période humide. Il faut donc attendre la fin octobre et début novembre pour que les conditions de remplissage du réservoir sol soient satisfaites pour statistiquement au moins une année sur deux seulement (le risque statistique admis pour cet exemple est d'une année sur deux), assurant à la culture une meilleure garantie de réserve permettant d'atteindre la période humide sans trop de dommage si les pluies venaient à faire défaut. En effet, le modèle montre qu'un tel scénario n'est pas à exclure et que pour plusieurs années, les premières dates de semis ne sont disponibles que vers la fin de novembre, voire même début décembre, comme le montre la figure 55. C'est, du moins, ce que nous avons noté chez les producteurs de la région qui repoussent les dates de semis jusqu'au début décembre très souvent, parfois même jusqu'à la fin décembre et début janvier, lorsque les pluies font fortement défaut.

On a vu que la consommation de la culture est déterminée statistiquement et qu'elle représente les besoins de croissance nécessaires à la culture entre la date du semis fixé et le début de la période humide. Il n'est donc pas exclu que l'humidité du sol, suite à des conditions climatiques sèches, soit assez proche de R_{min} avant ou à l'approche de la période humide, ce qui peut affecter le fonctionnement des cultures ayant une grande sensibilité au stress hydrique. Dans ces conditions, il suffit de prendre une marge de sécurité ($R_{sécu}$) en majorant les besoins de consommation (définis statistiquement) d'un coefficient (∇) supérieur à 0 (qui peut aller de 0 à 1, voire même plus) en fonction des types de sols et de la sensibilité des couverts aux stress hydriques, soit $R_{sécu} = (\nabla \cdot \text{Consommation})$. Le bilan entre la disponibilité réelle journalière donnée par Bilhyna et les besoins de consommation devient alors : $[\text{Disponibilité} - (\text{Consommation} + R_{sécu})] > R_{positive}$. Ce qui a pour effet de retarder le semis, compte tenu de l'exigence supplémentaire imposée par la marge de réserve $R_{sécu}$.

L'exemple ci-dessous (*Figure 56*) montre que pour une $R_{sécu}$ de 50 mm sur la profondeur totale atteinte en début de période humide à partir du premier jour de simulation (une sécurité d'environ 25% de R_{cc} au 15 octobre pour notre cas), le modèle propose le 04 novembre comme date de semis qui se trouve alors retardée de 16 jours pour une $R_{sécu}$ de 88 mm (une réserve de 40% R_{cc} au 15 octobre pour notre cas), soit un semis à partir du 20 novembre. En dehors de ces deux valeurs de $R_{sécu}$, la date de semis a lieu avant le 04 novembre pour un $R_{sécu} < 50$ mm et bien après le 20 novembre pour une $R_{sécu} > 88$ mm. Ainsi, il devient alors possible pour les plantes qui craignent le moindre stress hydrique (cultures aux systèmes racinaires superficiels par exemple) de prévoir une marge de sécurité de réserve hydrique pour leur éviter d'évoluer pendant un moment plus ou moins court avec une réserve proche de R_{min} .

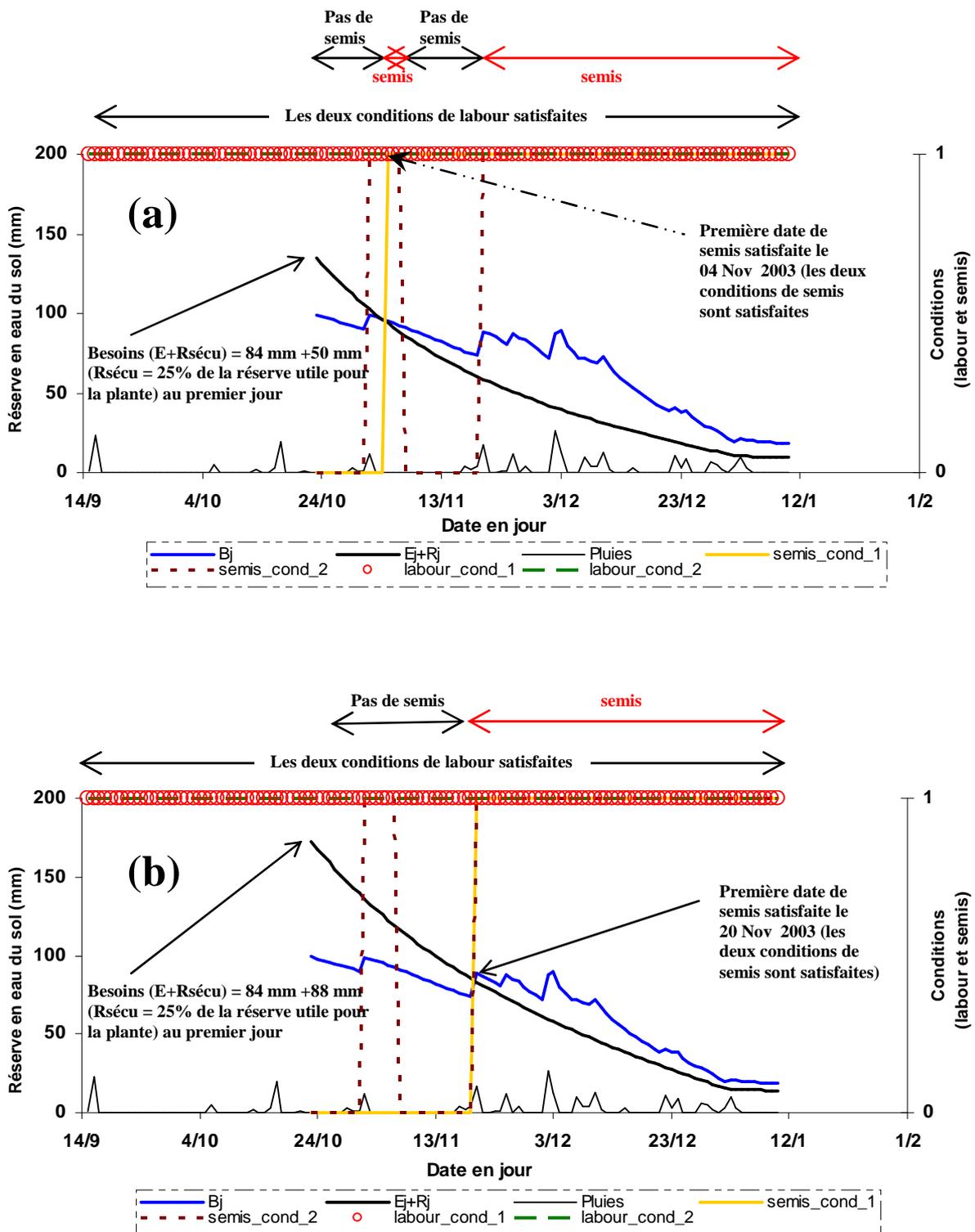


Figure 56. Effet de la prise en compte de la valeur de la réserve de sécurité (Rsécu) sur la prise de décision des dates de semis par le modèle Bilhyna : **(a)** semis possible à partir du 04 octobre pour une Rsécu = 50 mm (point d'intersection entre besoin probable de la période (consommation E+Rsécu)_j et les disponibilités réelles en eau du sol pour la plante Bj) ; mais **(b)** semis retardé de 16 jours pour les mêmes conditions de consommation (E) mais avec, cette fois, ci une Rsécu = 88 mm (risque plus élevé), soit un semis possible à partir du 20 octobre.

IV.4. Conclusion au chapitre modèle labour-semis

Bien qu'il soit simple d'approche, le modèle labour permet de renseigner sur la faisabilité ou pas d'un travail du sol, à travers deux conditions qui définissent le domaine d'humidité possible et sans conséquence pour le sol et son devenir (absence de tassement, pas de sol pulvérisé et donc emporté par le vent et moindre érosion hydrique). L'avantage de cette approche est qu'elle ne dépend que des sorties du modèle, à quelques paramètres près souvent assez bien définis pour le sol et souvent estimés pour les caractéristiques techniques. C'est donc le cas pour ce qui est de la première condition (les humidités des couches sont calculées chaque jour par « Bilhyna »), et pour la seconde qui ne dépend que des pluies déjà renseignées au sein du modèle.

L'approche suivie dans l'élaboration du module de semis, appliquée à la culture du blé en condition pluviale, est très générale et se base à la fois sur l'état des réserves au temps t et sur les situations probabilistes qui suivent (analyse à faire sur au moins 40 ans). Ce double principe permet d'élargir facilement le domaine d'application à d'autres cultures, pour n'importe quelle période de l'année. Nous avons tenu à ce que la méthodologie suivie reste très proche de la réalité des périodes liées aux pratiques utilisées dans la région de la Mitidja. Il est clair que la bonne réussite de cette approche est cette confrontation, entre disponibilité réelle jour après jour donnée par le modèle, avec une bonne estimation des consommations probables fournies par le modèle en conditions hydriques artificiellement satisfaisantes, compte tenu du choix d'un certain niveau de risque dû aux conditions pluviométriques très irrégulières dans cette région.

Ces deux modules représentent de véritables outils d'aide à la décision capables de renseigner sur les principales dates de labours et de semis possibles pour une période adaptée à un type de culture donnée ; mais cette approche est facilement adaptable à d'autres cultures et donc à d'autres périodes. C'est pourquoi ils sont aussi des outils indispensables pour aborder des études prospectives qui demandent, pour avoir une analyse réaliste, que les interventions techniques se modulent automatiquement en fonction du climat annuel comme tentent de le faire les agriculteurs, mais avec peu de moyens et de connaissances intégrées. Cette constatation est encore plus importante lorsqu'on réalise des études prospectives sur les changements climatiques puisque ces changements induisent des changements dans les cycles et les pratiques, ce que ne font pas les modèles actuels.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale :

Le travail mené et présenté a permis de mettre en place au sein du modèle de bilan énergétique et hydrique « Bilhyna », un sous-modèle qui permet de suivre une réelle cinétique de croissance et de développement adaptée à un grand nombre de types de couvert, évoluant sous diverses situations environnementales d'eau et de rayonnement. La non prise en compte dans ce premier sous-modèle de la rétroaction des éléments du milieu sur la cinétique de l'évolution des couverts ne permettait pas d'approcher des milieux où, même avec irrigation, les valeurs potentielles n'étaient pas toujours atteintes ; que dire alors de travaux sur l'optimisation des irrigations de complément pratiquement impossibles à aborder ? Aussi développer une approche complémentaire à ce sous-modèle biophysique pour pouvoir traiter, de façon également très générique les rétroactions liées aux contraintes, semblait absolument nécessaire. Ce travail a représenté la seconde partie de nos développements théoriques. L'intérêt global de ce double travail plus théorique est précisément d'avoir pu traiter de façon très complémentaire, à la fois les principaux processus de développement et de croissance, mais aussi leurs rétroactions positives et négatives avec le milieu à partir de lois biophysiques en fonction d'un petit nombre de paramètres choisis parce que facilement estimés par la bibliographie.

La première partie de ce sous-modèle est relative à l'élaboration d'une loi d'action de la température sur la vitesse des processus biologiques de la plante ; il a été élaboré dans le but d'approcher autant que possible la réalité du développement tout au long du cycle de végétation d'un couvert. La vitesse de développement décrite s'applique à l'ensemble de la gamme des températures actives sur les processus de développement et de croissance et non pas seulement sur une gamme restreinte de températures dont la loi généralement utilisée est une simple linéarité encore utilisée par la plupart des modèles de fonctionnement des cultures. La fonction construite est capable de reproduire avec une bonne précision la loi d'action de la température sur les processus de développement et de définir ainsi le temps physiologique qui interviendra dans la croissance. Cette fonction qui donne la vitesse de développement selon la température est établie moyennant la connaissance de trois paramètres seulement, le plus souvent disponibles dans la bibliographie. De cette manière cette fonction s'adapte sans ajustement à chaque culture et se trouve être ainsi très générique. Elle permet aussi de s'adapter à diverses échelles de temps (horaires, journalières, et autres), selon les échelles des données bibliographiques disponibles. C'est ce temps physiologique qui permet, à partir de la définition d'une vitesse de croissance, d'établir par intégration la loi de croissance appliquée aux différents stades du cycle de végétation. Fort de la robustesse et de la généralité de cette simulation des processus liés à la croissance, le sous-modèle de développement-croissance est appliqué aux principaux paramètres des couverts ayant un rôle important sur les processus énergétiques et hydrologiques que sont la surface des feuilles, la hauteur du couvert et la profondeur des racines du couvert. Cette modélisation de la loi d'action de la température sur le développement, puis sur la croissance, reste adaptée à des applications sur d'autres entités de la plante telles que la croissance d'entre-nœuds, le développement d'organes floraux et autres. L'utilisation de cette approche peut être également fort utile dans des études assez fines en relation avec l'analyse du suivi de variétés végétales en vue de leur sélection et de leur production.

Le second intérêt de l'approche poursuivie dans ce travail relève de la modélisation purement biophysique utilisée pour décrire la cinétique de l'évolution du couvert à l'échelle du cycle entier de la plante. En effet cette loi de croissance qui conduit à une logistique est fondée sur le principe d'une valeur limite du critère de croissance et du potentiel de croissance restant à accomplir, notions largement utilisées par les biologistes et qui sont plutôt liées à des facteurs internes biophysiques (relevant des propres caractéristiques génétiques de l'individu). Mais il est indispensable de lier cette croissance aux rétroactions dues aux

contraintes externes (conditions de ressources limitantes ou défavorables), qui imposent des modulations souvent négatives mais parfois positives (stimuli). Ces fonctions de rétroaction s'inscrivent bien, selon les hypothèses faites pour cette approche développement-croissance dans la modulation du facteur de potentialité (k_0) de la vitesse de croissance et donc de la logistique. Ce fut la dernière partie de notre travail de modélisation.

Ainsi, on a pu montrer qu'à travers la prise en compte des caractéristiques phénotypiques des plantes (limitation d'ordre interne dépendant de la valeur du critère analysé), ce facteur de potentialité permettait de rendre compte de l'évolution de la croissance des couverts tout au long des quatre phases successives, d'une part de façon continue et d'autre part à travers un même processus de développement et de croissance. Quant aux fonctions de rétroaction introduites pour moduler les potentialités en conditions de disponibilités de la ressource du milieu, elles complètent le sous-modèle pour le rendre plus réaliste et auto dépendant face à la variabilité continue forte des conditions climatiques intra annuelles et interannuelles, et finalement face aux changements possibles sur le long terme. Ces fonctions dépendent toujours à la fois d'un paramètre lié aux aptitudes de résistance aux contraintes propre à chaque culture et du niveau de la contrainte due à la ressource disponible.

Confronté aux mesures expérimentales, le modèle a montré des résultats satisfaisants, d'abord sur le plan des grandeurs du couvert simulées par le modèle (surface foliaire, hauteur du couvert et profondeur des racines du couvert), avec notamment une assez bonne prise en compte de la stimulation des racines qui exploitent une surface de sol plus importante en cas de contrainte hydrique. De même, on observe que la stimulation de la sénescence du LAIvert qui le fait disparaître plus rapidement est très réaliste. Enfin, sur le plan global du modèle Bilhyna, on constate de bonnes relations entre l'évolution des stocks d'eau donnée par le modèle et les mesures expérimentales. Notons malheureusement que cette confrontation entre les sorties du modèle et les mesures n'a pu être poussée très loin en raison de la présence d'une semelle de labour (connue sur le site à une profondeur d'environ 30 cm) qui a induit, lors de son atteinte par les racines, un retard à la propagation réelle des racines et un décrochement entre modèle et mesures, à plusieurs reprises. Cet obstacle, lié aux caractéristiques du sol (ici la densité) vient nous rappeler une fois de plus qu'il reste encore des améliorations à entreprendre dans un tel modèle pour traduire toute la complexité des milieux. Besoin d'amélioration précisément pris en compte dans le travail conduit sur la rétroaction de contraintes (eau, lumière) sur la croissance. Cette confrontation modèle-mesure a aussi montré d'autres besoins d'amélioration qui sont soit liés à une durée du développement des tiges par rapport à l'indice foliaire, soit à une croissance des racines que nous avons limitée à la fin de la phase de reproduction alors que l'expérience suggère une croissance qui tend à se prolonger au-delà de cette phase, jusqu'en période de sénescence.

Enfin, deux modules liés aux pratiques culturales (labour et semis) ont été mis en place durant ce travail et intégrés au modèle Bilhyna afin de lui permettre de décider de façon automatique la date la plus souhaitable pour effectuer le labour, puis le semis par les agriculteurs. L'intérêt de rendre automatique les interventions techniques (labour, semis, et ce qui existait déjà dans le modèle, irrigations et récoltes) est assez évident car ces décisions permettent de conduire des études prospectives qui tiennent compte de décisions non pas à date fixe (la plupart des modèles) mais à date fluctuante fonction des conditions passées et probables du futur. Ce plus grand réalisme permet de mieux analyser les fluctuations interannuelles qui ne sont plus influencées par la condition d'imposer une date fixe. Ces dates fournies et utilisées par le modèle peuvent être aussi un résultat d'aide à la décision afin de conduire ces deux pratiques dans des conditions compatibles avec un travail de sol réussi (cas du labour) ; mais aussi pour permettre, sous certaines conditions climatiques, de définir une date de semis avec un risque acceptable de réussite en fonction des conditions réelles passées

et des potentialités de la ressource hydrique future d'une région (pluie et disponibilité en apport).

Finalement, notre travail répond de façon directe à un besoin de meilleure prise en compte des grandeurs motrices du couvert (surface foliaire, hauteur du couvert, enracinement) sur l'analyse des bilans énergétiques et hydriques, voire de la production de biomasse en relation avec les conditions climatiques et les contraintes qui en résultent pour la culture. La modélisation des deux principales contraintes pour gérer leurs effets aux niveaux des processus biologiques d'une plante (développement-croissance) et leur répercussion sur les échanges quantifiés par le modèle Bilhyna, assure à celui-ci une utilisation réaliste et pertinente en conditions de ressources et de milieux variés. Les modèles de décision des interventions techniques également très importants pour la généricité du modèle global « Bilhyna » restent au niveau d'une première adaptation aux conditions semi-arides et ne sont pas encore assez bien adaptés à n'importe quel type de climat.

Mais il est clair qu'un tel modèle facilite l'étude des rotations et de leur poids éventuel sur les bilans d'eau annuels et surtout interannuels au niveau d'une région. De plus, l'évolution du cycle d'une culture donnée par le modèle permet à la fois de gérer le jour de la récolte automatique et donc le début des repousses, fréquentes après récoltes (deuxièmes végétations, mais éparées), et dont les effets sur l'évaporation surtout en période estivale ne sont pas négligeables. Le modèle peut alors mieux gérer une éventuelle troisième culture (de couverture ou de production), si cette culture semble nécessaire ou au moins possible suivant le climat.

Cette gestion des cultures et de leur succession offre un moyen d'optimiser les irrigations, et en particulier de tester les apports d'irrigation de complément (situation d'irrigations non optimales) afin de répondre efficacement à la durabilité de l'utilisation de l'eau disponible pour l'irrigation des cultures sur une zone donnée. Le modèle définissant à la fois les besoins en eau de chaque instant et, en fonction des apports décidés et des pluies, calculent les retours sous forme de drainage profond du système (pluie plus irrigation), le bilan annuel résultant permet de tester annuellement et pluri annuellement cette durabilité réaliste.

Au sein du modèle « Bilhyna », ce sous-modèle biophysique de développement-croissance est maintenant bien adapté à l'ensemble des décisions automatiques (labour, semis, récolte, critère d'irrigation, quantité d'irrigation par apport, récolte et succession des cultures sur l'année). C'est donc un outil performant pour analyser, à partir de données climatiques simulées par modèles de changements climatiques (contraintes thermiques, hydriques et radiatives), l'impact réel sur les bilans d'eau résultants. En effet les données techniques des cultures s'adaptent aux modifications climatiques intra et interannuelles et le modèle permet de fournir en fonction des changements climatiques de vraies tendances d'évolution des besoins en eau et ce pour de nombreux types de culture.

Ce modèle reste facilement adaptable aux modes d'utilisation des modèles climatiques par sa généricité à s'appliquer à toutes conditions de sol et de climat et surtout à s'adapter à tout type de végétation.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques :

Abreu, M.E., Munne-Bosch, S. 2007. Salicylic acid may be involved in the regulation of drought-induced leaf senescence in perennials : A case study in field-grown *Salvia officinalis* L. plants. *Environment and Experimental Botany* **64**: 105-112

Acock, B., Charles-Edward, DA, Fitter, DJ., Hand, DW., Ludwig, LJ., Warren-Wilson, J., Withers, AC. 1978. The contribution of leaves from different levels within a tomato crop to canopy net photosynthesis: An experimental examination of two canopy models. *J Exp Bot* **29**, 815-827. 1978

Aiken, R.M. 2005. Applying Thermal Time Scales to Sunflower Development. *Agronomy Journal* **97**, (3), 746-754.

Alfredo, A., Calves, C., Setter, T.L. 2004. Response of Cassava Leaf area Expansion to Water Deficit: Cell Proliferation, Cell Expansion and Delayed Development. *Annals of botany* **94** :605-613, 2004.

Alm, D.M, McGiffen, J.M.E., Hesketh, J.D. 1991. Weed phenology. In : Hodges T, ed. *Predicting crop phenology*. Boca Raton, FL : CRC Press, 191-218.

Andrieu, B. 2005. L'approche « plante virtuelle » pour la modélisation des plantes et peuplements cultivés. Information et optimisation: quel dialogue entre la biologie et les autres disciplines ? Ecole interdisciplinaire d'échanges et de formation en biologie. 7 pp.

Awada, T., Perry M E.L., Schacht, W.H. 2003. Photosynthetic and growth responses of the C3 *Bromus inermis* and the C4 *Andropogon gerardii* to tree canopy cover. *Canadian Journal of plant science*, juillet 2003, volume 83, N°3.

Alvino, A., Delfine, S., Mori, M. 1999. Foliar senescence in maize plants grown under different water regimes. 1999. *Agronomie*. **19** : 591-601

Barriere, Y., Gay, J.P. 1984. Approche physiologique de la sénescence du "maïs. Physiologie du "maïs. *Dans colloque INRA-CNRS-AGPM*, Royan, 15-17/03/1983. *Sous la direction de* : A. Gallais. INRA, Paris. P.355-365.

Batt, T., Woolhouse, H.W. 1975. Changing activities during senescence and sites of synthesis of photosynthetic enzymes in leaves of labiate, *Perilla frutescens* (L.) Britt. *J Exp Bot* **26**: 569-579.

Benech, A.R.L., Ghera, C.M., Sanche, R.A., Garcia Fernandez, A.E. 1988. The role of fluctuating temperature in the germination and establishment of *Sorghum alepense* (L.) Pers. Regulation of germination under leaf canopies. *Functional Ecology* **2**, 311-318.

Ben Hadj, S.H., Tardieu, F. 1995. Temperature affects expansion rate of Maize leaves without change in spatial distribution of cell length. *Plant Physiology* **109**, 861-870.

Ben Hadj, S.H., Tardieu, F. 1996. Quantitative analysis of the combined effects of temperature, evaporative demande and light on leaf elongation rate well-watered field and laboratory-grown maize plants. *Journal of experimental Botany* **47**, 1689-1698.

- Bonhomme, R., Ruget, F. 1990.** Modélisation du fonctionnement d'une culture de Maïs: Cas du CONGRO et CERES-Maïs. In Picard D, éd. *Physiologie et production du Maïs*. Paris : INRA édition 385-391.
- Bonhomme, R., Drouet, J.L., Améglio, T. 1995** Introduction à la modélisation du fonctionnement physiologique d'un couvert. In : *Actes de l'école chercheurs INRA en bioclimatologie- Le Croisic 3-7 avril 1995* 1 De la plante au couvert végétal, 647-667
- Bonhomme, R. 2000.** Bases and limits to using "degree day" units. *European Journal of agronomy* **13**, 1-10.
- Boote, K.J., Jones, J.W., Hoogenboom, G. 1998.** Simulation of crop growth: CROPGRO Model. *Chapter 18. pp 651-692. In R.M. Peart and R.B. Curry (eds). Agriculture Systems Modelling and Simulation.* Marcel Dekker, Inc, New York.
- Borras, L., Maddonni, G.A., Otegui, M.E. 2002.** Leaf senescence in maize hybrids : plant population, row spacing and kernel set effect. **Field Crops Res**, **82**. 13-26
- Borrell, A.K., Hammer, G.L., Douglas, A.C.L. 2000.** Does maintaining green leaf area in sorghum improve yield under drought? I. Leaf growth and senescence. *Crop. Sci.* **40**: 1026-1037
- Boubaker, M., Ben-Hammouda, M., Gdiri, H. 1999.** Réponse du blé dure au stress hydrique et à la profondeur de semis pendant le stade jeune plante. *Sécheresse*, Vol. 10 (1) : 35-38
- Boyer, J. S. 1970.** Leaf enlargement and metabolic rates in corn, soybeans, and sunflower at various leaf water potentials. *Plant Physiology* 46 :233-235 (1970).
- Bradford, K.J., Hsiao, T.C. 1982.** Physiological responses to moderate water stress. p. 264-323. In O.L. Lange et al. (ed.) *Encyclopaedia of plant physiology*. Vol. 12B. Springer Verlag. Berlin.
- Brisson, N., Delécolle, R. 1991.** Développement et modèle de simulation des cultures. *Agronomie*, **12**, 253-263.
- Buis, R. 1993.** Models of growth kinetics in plants. In: H. Greppin, M. Bonzon, R. Degli Agosti (Eds.), *Some Physicochemical and Mathematical Tools for Understanding of Living Systems*, université de Genève, Suisse, 1993, pp. 295-318.
- Buis, R., Luck, J. 2006.** Sur la notion de limite interne et externe dans les fonctions de croissance monotones. Une reformulation de l'équation logistique. *Biomodélisation. C.R. Biologies* **329**, 880-891.
- Campbell, N. A., Reece, J. B. 2004.** Biologie. Adaptation française : Richard Mathieu. ERPI
- Carberry, P.S., Hammer, G.L., Muchow, R.C. 1993.** Modelling genotypic and environment control of leaf area dynamics in garin Sorghum. 3. Senescence and prediction of green leaf area. *Field Crops Res*. **33**(3) : 329-351.
- Casadebaig, P., Debaeke, P., Lecoœur, J. 2008.** Thresholds for leaf expansion and transpiration response to soil water deficit in a range of sunflower genotypes. *Europ. J. Agronomy* **28**, 646-654

- Champagnat, P., Ozenda, P., Baillaud, L. 1969.** Biologie végétale III. Croissance morphogénèse, reproduction. Ed Masson, Paris. 510p.
- Chapman, S.C., Hammer, G.L., Palta, J.A. 1993a.** Predicting leaf area development in sunflower. *Field. Crops Research* **34**, 101-112.
- Chapman, S.C., Hammer, G.L., Meinke, H. 1993b.** A sunflower simulation model: I. Model development. *Agron. J.* **83**: 725-735.
- Chartier, P., Bethenod, O. 1977.** La productivité primaire à l'échelle de la feuille, in les processus de la production végétale primaire, A.MOYSE Ed., Gauthier Villars, Paris (1977).
- Chen, C.T., Kao, C.H. 1990.** Comparative study of the metabolism of α -aminocyclopropane-1-carboxylic acid and senescence of water-stressed and ABA-treated excised leaves. *Plant Cell Physiol.* **31**: 463-468
- Chenu, C., Chapman, S.C., Hammer, G.L., McLean, G., Ben Hadj, S.H., Tardieu, F. 2008.** Short-term responses of leaf growth rate to water deficit scale up to whole-plant and crop levels: an integrated modelling approach in maize. *Plant, Cell and environment.* **31**, 378-391.
- Colomb, B., Kiniry, J.R., Debaeche, Ph. 2000.** Effect of soil phosphorus on leaf development and senescence dynamic of field-grown maize. *Agron. J.* **92**. 428-435
- Comb, L. 2005.** Nouvelle méthode de suivi au champ de la sénescence des feuilles de "maïs". *Can. J. Bot.* **83** : 941-953
- Comstock, J.P. 2002.** Hydraulic and chemical signalling in control of stomat conductance and transpiration. *J. Exp. Bot.* **53** (367), 195-200
- Connor, D.J., Jones, T.R. 1985.** Response of sunflower to strategies of irrigation. II. Morphological and physiological responses to water stress. *Field Crop Res*, **12**, 91-103
- Connor, D., Hall, A. 1997.** Sunflower physiology. Sunflower Technology and Production. Agronomy Monograph 35, 67-113.
- Dale, R.F., Coello, D.T., Gallo, K.P. 1980.** Prediction of daily green leaf index for corn. *Agronomy. J.* **72**(6) : 999-1005.
- Dang, Q.L., Margolis, H.A., Coyea, MR., Sy, M., and Collatz, G.J. 1997a.** Regulation of branch-level gas exchange of boreal trees : roles of shoot water potential and vapour pressure difference. *Tree Physiologie* **17**: 521-535.
- Dang, Q.L., Margolis, H.A., Sy, M., Coyea, MR., Collatz, G.J., and Walthall, C.I. 1997b.** Profiles of photosynthetically active radiation, nitrogen and photosynthetic capacity in the boreal forest: implication for scaling from leaf to canopy. *Journal of Geophysical Research* **102D**:28845-28859.
- Dangl, J.L., Dietrich, R.A., Thomas, H. 2000.** Senescence and programmed cell death. In Buchanan, B.B., Gruissem, W., Jones, R.L. (Eds), *Biochemistry and Molecular Biology of Plants*. American Society of Plant Physiologists. Rockville, MD, pp. 1044-1100.

- Daudet, F.A., Tchamitchian, M. 1993.** Radiative exchange and photosynthesis, in Crop structure and light microclimate, characterization and applications, C. Varlet Grancher, R. Bonhomme and H. Sinoquet Ed, INRA Editions, Science Update, 400-417 (1993).
- Delécolle, R., Guérif, M. 1986.** Les modèles agrométéorologiques de développement. Note interne N° M_-/9, station de bioclimatologie, INRA, Montfarvet. Projet ESA "Utilité SAR", 40, 61p
- De Luca d'Oro, G.M., Trippi, V.S. 1987.** Effect of stress conditions induced by temperature, water stress and rain on senescence development. *Plant Cell Physiol.* **28**(8) : 1389-1396.
- Deschamps, J.J. 1902.** Principes de biologie relationnelle. Bull. Soc. Philomath. Paris. 9ieme ser. **4**, 127-178.
- Doorenbos, J., Kassam, A. 1979.** Yields response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper. Rome.* **33**, 306 p
- Durant, R. 1967.** Action de la température et du rayonnement sur la croissance. *Ann. Physiol. Vég.*, **9** (1), 5-27.
- Durant, R., De Parcevaux S., Roche P. 1967.** Action de la température sur la croissance et le développement du lin. *Ann. Physiol. Vég.*, **1967**, **9** (1), 87-105.
- Dwivedi, S., Kar, M., Misra, D. 1979.** Biochemical changes in excised leaves of *Oryza sativa* subjected to water stress. *Physiol. Plant.* **45**: 35-40
- Eik, K., Hanway, J.J. 1965.** Some factors affecting development and longevity of leaves of corn. *Agron. J.* **57** : 7-12.
- Ellis, R.H., Hadley, P., Roberts, E.H., Summerfield, R.J. 1990.** Quantitative relations between temperature and crop development and growth. In "Climatic Change and Plant genetic Resources".(Eds M. T. Jackson, B. V. Ford Lloyd and M. L. Parry.) pp. 85-115. (Belhaven Press: London)
- Evens, J.R. 1983.** Nitrogen and photosynthesis in the flag leaf of wheat, *Plant Physiol* **72**, 297-302.
- Finnam, J.M., Jones, M.B., Burke, J.I. 1998.** A time-concentration study on the effect of ozone on spring wheat (*Triticum aestivum* L.). 3. effect on leaf area and flag leaf senescence. *Agric. Ecosyst. Environ.* **69**(1) : 27-35.
- Fournier, C., Andrieu, B. 2000.** Dynamics of the Elongation of Internodes in the Maize (*Zea mays* L.): Analysis of Phases of Elongation and their Relationships to phytomer Development. *Annals of Botany* **86**, 551-563.
- Fournier, C., Durand, J.L., Ljutovac, S., Schauffele, R., Gastal, F., Andrieu, B. 2005.** A functional-structural model of the elongation of the grass leaf and of its relationships to the phyllochron. *New Phytologist.* **166**: 881-894
- Gabrielle, B., Denoroy, P., Gosse, G., Justes, E., Andersen, M.N. 1998.** A model of leaf area development and senescence for winter oilseed rape. *Field Crops Res.* **57**: 2009-222

- Garcia Huidobro, J., Monteith, J.L., Squire G.R. 1982a.** Time, temperature and germination of pearl millet (*Pennisetum typhoides* S. & H.). I. Constant temperature. *J Exp Bot* 33 (133): 288-296.
- Garcia Huidobro, J., Monteith, J.L., Squire G.R. 1982b.** Time, temperature and germination of pearl millet (*Pennisetum typhoides* S. & H.). II. Alternating temperature. *J Exp Bot* 33 (133): 297-302.
- Gary, C., Barczy, J., Bertin, N., Tchamitchian, M. 1995** – Simulation interactive de la croissance d'une plante de tomate en fonction de son environnement et de sa conduite (modèle TOMAGRO). In Bouchon, J., editor, Architecture des arbres fruitiers et forestiers, pages 333-343. INRA édition.
- Geslin H. 1944.** Etude des lois de croissance d'une plante en fonction des facteurs du climat (Température et Radiation solaire), contribution à l'étude du climat du blé. Thèse Doct., Faculté des sciences de l'université de Paris.
- Gosse G., Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R., Chartier, M., Allirand, J.M., Lemaire, G. 1986.** Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepter par un couvert végétal, *Agronomie*, 6, 47-56.
- Garnier, C., Massonnet, C., Turc, O., Muller, B., Chenu, K., Tardieu, F. 2002.** Individual Leaf Development in *Arabidopsis thaliana*: a Stable thermal-time-based Programme. *Annals of botany* 89, 595-604.
- Garnier, C., Tardieu, F. 1998.** Is thermal time adequate for expressing the effects of temperature on sunflower leaf development? *Plant, Cell and environment*. 21, 695-703.
- Grime, J.P. 1979.** Plants Strategies and Vegetation Process. Chichester: Wiley.
- Grover, A. 1993.** How do senescing leaves lose photosynthetic activity? *Current. Sci.* 64 (4) : 226-234.
- Gustavo, A.S., Rawson H.M. 1990.** Rates and Cardinal Temperatures for Processes of Development in Wheat: Effects of Temperature and Thermal Amplitude. *Aust. J. Plant Physiol.*, 22, 913-926.
- Hansen, S., Jensen, H.E., Nielsen, N.E., Swenden, H. 1990.** DAISY –Soil Plant Atmosphere System Model S *NPO Research in the NAEP report. The royal veterinary and agricultural university (ed) Nr A10, 272 pp.*
- Hartmann, C., Joseph, C., Millet, B. 1998.** Biologie et physiologie de la plante : Âge chronologique, âge physiologique et activités rythmiques. Eds Nathan. Paris. 224p.
- Hartmann, C. 1992.** La sénescence des végétaux. 1^{ière} éd. 200p Paris. Harmann.
- Hayati, R., Egli, D.B., Crafts-Brandner, S.J. 1995.** Carbon and nitrogen supply during seed filling and leaf senescence in soybean. *Crop Sci* 35: 1063-1069.
- Heller, R. 1978.** Abrégé de physiologie végétale. Tome II : Développement. Ed MASSON.

- Hensel, L.L., Grbic, V., Baumgarten, D.A., Bleecker, A.B. 1993.** Developmental and age-related processes that influence the longevity and senescence of photosynthetic tissues in Arabidopsis. *Plant Cell* **5**: 553-564.
- Hsiao, T.C. 1973.** Plant responses to water stress. *Annual Review of Plant Physiology* **24**: 519-570.
- ITCG., 2002.** Stades du blé. **Gate P et Giban M.**
- Jarvis, P.G., McNaughton, K.G., 1986.** Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. *Adv. Ecol. Res.*, **15**, 1-49
- Jiang, C.Z., Rodermel, S.R., Shibles, R.M. 1993.** Photosynthesis, rubisco activity and amount, and their regulation by transcription in senescing soybean leaves. *Plant Physiol* **101**: 105-112
- Jones, H.G. 1983.** *Plants and microclimate- A quantitative approach to environmental physiology*, Cambridge Univ. Press
- Jones, C.A., Kiniry J.R. 1986.** CERES-Maize a simulation model of maize growth and development. *Texas A & M University, Press, college station, 204p*
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., Ritchie, T.J., 2002** – The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomic*. Vol 18, Issues 3-4, 235-265
- Katerji, N., Hallaire, M. 1984.** Les grandeurs de référence utilisable dans l'étude de l'alimentation en eau des cultures. *Agronomie* **4**, 999-1008
- Keating B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L. 2003.** An overview of APSIM, a model designed for farming systems situation. *European Journal of agronomy* **18**, 267-288.
- Kiniry, J.R., Blanchaet, R., Williams, J.R., Texier, V., Jones, C.A., Cabelguenne, M. 1992.** Sunflower simulation using the EPIC and ALMANAC models. *Field Crop Research* **30**, 403-423.
- Kofler, L. 1963.** Croissance et développement des plantes. *Gauthier-Villars, 234 p.*
- Champagnat, P. 1969.** Croissance, morphogenèse et développement. In : « Biologie végétale III, Croissance, morphogenèse, reproduction », *Masson, Paris, 1-265.*
- Lafarge, T., De Raissac, M., Tardieu, F. 1998.** Elongation rate of sorghum Leaves has a common response to meristem temperature and diverse African and European conditions. *Field Crop Research* **58**, 69-79.
- Lafarge, T.H., Hammer, G.L. 2002.** Preding plant leaf area production: shoot assimilate accumulation and partitioning, and leaf area ration, are stable for a wide range of sorghum population densities. *Field Crops Res.* **77**, 137-151
- Lafolie, F. 1991.** Modelling water flow, nitrogen transport and root uptake including physical non-equilibrium and optimization of the root water potential, *Fertilizer Research* **27**, 215-231.

- Larcher, W. 1981.** Effect of low temperature stress and forest injury on plant productivity. In: Johnson CB (Ed) Physiological processes limiting plant productivity. Butterworths, London, pp 253-269.
- Larcher, W. 2003.** Physiological Plant Ecology. Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups. Fourth Edition. Ed Springer. New York.
- Leclerc, J.C. 1999.** Ecophysologie végétale, Publication de l'université de Saint-Étienne. Equipes d'écophysologie des petits fruits.
- Lecoecur, J., Wery, J., Truc, O., Tardieu, F. 1995.** Expansion of pea leaves subjected to short water deficit: Cell number and cell size are sensitive to stress at different periods of leaf development. *Journal of experimental botany* 46 :1093-1101.
- Lecoecur, J., Sinclaire, T.R., 1996.** Field pea transpiration and leaf growth in response to soil water deficit. *Crop Sci.* **36**, 331-335.
- Lecoecur, J., Sinclaire, T.R. 2001.** Harvest index increase during seed growth of field pea. *Europ J Agronomy.* **14**, 173-180
- Lecoecur, J., Guilioni, L. 1998.** Rate of leaf production in response to soil water deficit in field pea. *Field Crops Res*, **57**, 319328
- Leshem, Y.Y., Halevy, A.H., Frenkel, C. 1986.** Processes and Control of Plant Senescence, Elsevier Science Publisher BV, Amsterdam, The Netherlands, pp. 250.
- Levitt, J. 1972.** Responses of Plants to Environmental Stress. Academic Press, New York and London.
- Levitt, J. 1980.** Responses of Plants to Environmental Stress. Seconde Edition, Vols. I and II. Academic Press, New York and London.
- Li, S.H., Huguet, J.G., Bussi, C.1990.** Réponse de jeunes pêchers cultivés en pots a différents régimes d'alimentation hydriques. I: Conséquences sur la transpiration, la résistance stomatique, le potentiel hydrique foliaire, la photosynthèse et les variations micromorphométrique des tiges. *Agronomie* **10**, 263-272
- Lin, J.N., Wang, J.W., Kao, C.H. 1999.** Effects of abscisic acid and water stress on the senescence of detached rice leaves. *Biologia Plantarum* **42** (2): 313-316
- Lioret, C. 1974.** L'analyse des courbes de croissance. *Physiol. Vég*, **12** (3), 413-434.
- Lizaso, J.I., Batchelor, W.D., Westgate, M.E. 2003.** A leaf area model to simulate cultivar-specific expansion and senescence of maize leaves. *Field Crops Research* **80**, 1-17.
- Lockhart, J.A. 1965.** An analysis of irreversible plant cell elongation. *Journal of theoretical biology* **8** :264-276.
- McCree, K.J. 1973.** A rational approach to light measurements in plant ecology. Commentaries in Plant Science No. 5. Octobre. *Current Advances in Plant Science* (3)4 : 39-43.

- Malet, P., Delécolle, R. 1977.** Utilité, insuffisances et possibilités des modèles de développements des plantes (plus particulièrement des céréales et des fourrages). In : « *Le tocsin du radiateur* » n°5, Méribel (France) 17-20 mars 1977, 205-215.
- Meyer, W.S., Green, G.C. 1980.** Water use by wheat and plant indicators of available soil water. *Agron Jour* **72**, 253-257.
- Merriam, R.A., 1960.** A note on the interception loss equation. *J. Geophys. Res.*, 65: 3850-3851.
- Miceli, F., Crafts-Brandner, S.J., Egli, D.B. 1995.** Physical restriction of pod grown alters development of soybean plants. *Crop Sci* **35**: 1080-1085.
- Monteith, J.L. 1965.** Evaporation and environment. *Proc. Symp. Soc. Exp. Biol.*, no.19, p.205-234.
- Monteith, J.L. 1984.** Consistency and convenience in the choice of units for agricultural science. *Experimental agriculture* **20**, 125-135.
- Monteith, J.L., 1996** The quest for balance in crop modelling *Agronomy Journal* **88** 695-697.
- Mullet, J.E., Whitsitt, M.S. 1996.** Plant cellular responses to water deficit. *Plant Growth Regulation*: (20) 2, 119-124.
- Munné-Bosch, S., Panuelas, J. 2003.** Photo-antioxidative protection, and a role for salicylic acid during drought and recovery in field-grown *Phillyrea angustifolia* plants. *Planta* **217**: 758-766
- Munné-Bosch, S., Alegre, L. 2004.** Die and let live: leaf senescence contributes to plant survival under drought stress. *Functional Plant Biology* **31** (3). 203-216.
- Nilson Erik, T., Orcutt, D.M. 1996** : Physiology of plants under stress, Abiotic Factors, usa ; Awada T, Perry M E.L, Schacht W.H 2003).
- Ong, C.K. 1983.** Response to temperature in a stand of pearl millet. I. Vegetative development. *Journal of Experimental Botany* **34**: 337-348.
- Ong, C.K., Black, C.R., Simmonds, L.P., Bennett, J.M. 1985.** Influence of saturation deficit on leaf production and expansion in stands of groundnut (*arachis Hypogaea* L.) grown without irrigation. *Ann. Bot.* **56**, 523-536.
- Osaki, M. 1995.** Comparison of productivity between tropical and temperate maize. I. Leaf senescence and productivity in relation to nitrogen nutrition, *Soil. Sci. Plant Nutr.* **41**(3) : 439-450
- Pell, E.J., Dann, M.S. 1991.** Multiple stress-induced foliar senescence and implications for whole-plant longevity. Dans *Response of plants to multiple stresses*. Chap. 9. *Sous la direction de* : H.A Mooney, W.E Winner, et E.J. Pell, Academic Press, New York. P, 189-204
- Perrier, A., Tuzet, A. 2003.** Le cycle de l'eau et les activités au sein de l'espace rural. Enjeux globaux, solutions locales et régionales. *C.R.Geosciences*, 337 (205) 34-35

Perrier, A. 1973- “Bilan Hydrique de l’assolement blé-jachère et évaporation d’un sol nu, en région semi-aride”, In Slatyer R.O., Plant response to climatic factors, Reponse des plantes aux facteurs climatiques, Colloque, UNESCO, Uppsala (SWE), 1970/09/15-20, UNESCO, Paris, pp 477-487.

Perrier, A., Tuzet, A. 1998. I. Généralités. L’eau dans la biosphère. Dans Traité d’irrigation. Tiercelin J.R.Lavoisier. Paris. 7-43p

Perrier, A. 1982. ‘Land surface processes vegetation’, In : ed. By P.S., Eagleson, Land surface processes in atmospheric general circulation models, World Meteorological Organisation, Geneve (CHE). Greenbelt (USA). Cambridge University Press, pp 395-448.

Personne, E. 1998. Modélisation de la variabilité spatio-temporelle du continuum sol-plante-atmosphère : Cas de couverts éparés. Thèse de Doctorat. INA-PG. Paris.

Pearson, C.J., Jacobs, B.C., 1987. Yield components and nitrogen partitioning of maize in response to nitrogen before and after anthesis. *Aust. J. Agric. Res.* **38**. 1001-1009

Petersen, C.T., Jorgensen, U., Svendsen, H., Hansen, S., Jensen, H.E., and Nielsen, N.E, 1995. Parameter assessment for simulation of biomass production and N uptake in winter rapeseed. *Eur. J Agron.* **4**, pp. 77-89

Poethig, R.S., Sussex, IM. 1985. The cellular parameters of leaf development in tobacco: a clonal analysis. *Planta* **165**: 170–184.

Porter, J.R. 1993 – AFRCWHEAT2: a model of growth and development of wheat incorporating responses to water and nitrogen. *Eur. J. Agron* **2**, 69-82.

Ritchie, J.T., Otter, S. 1985 – Description and performance of CERES-Wheat yield model : a user oriented wheat yield model. In *ARS Wheat yield Project. ARS 38. Natl Tech. Info. Srev., Springfield, Missouri*, 159-175.

Ritchie, J.T., NeSmith, D.S. 1991. Temperature and crop development, In: Hanks J, Ritchie, eds. *modeling plant and soil systems*. Agronomy No. 31. Madison. WI: American Society of Agronomy. 5-29.

Robelin, M. 1962. Rapport entre augmentation du poids sec et transpiration en condition de sécheresse. *Cr. Acad. Sci.* 1962; 254, 4, 718-720.

Robertson, G.W. 1983. *Weather-based mathematical models for estimating development and ripening of crop*. World Meteorological Organisation. Agricultural Meteorology, CAgM, Rapport n15, 158 pp.

Robertson, T.B. 1908. On the normal rate of growth of an individual and its biochemical significance. –Arch. Entwicklungsmechanik der Organismen. 25:581-614.

Rollier, 1975. Etude des besoins en eau du tournesol, Bulletin du CETIOM. 45, 1-39.

Rosnoblet, J., 2002- Dynamique du bilan hydrique parcellaire au sein de l’espace rural- conséquence sur les transferts hydrologiques. Thèse de l’INA-PG. 145 p. +annexes.

- Saab, I.N., Sharp, R.E. 1989.** Non-hydraulic signals from maize roots in drying soil : inhibition of leaf elongation but not stomatal conductance. *Planta* : 466-474.
- Sadok, W., Naudin, P., Boussuge B., Muller, B., Welcker, C., Tardieu, F. 2007.** Leaf growth rate per unit thermal time flowers QTL dependent daily patterns in hundreds of maize lines under naturally fluctuating conditions. *Plant, Cell and environment*. **30**, 135-146.
- Salisbury, F.B., Ross, C.W. 1991.** *Plant Physiology. 4ed. Wadsworth Publishing Company, Belmont, California. A Division of Wadsworth, Inc. Chap 12, 249-265p.*
- Sandras, V.O., Echarte, L., Andrade, F. 2000.** Profile of leaf senescence during reproductive growth of sunflower and maize. *Ann. Bot.* **85**, 187-195
- Sandras, V.O., Villalobos., F., Fereres, E., Wolfe, D.W. 1993.** Leaf responses to soil water deficit: comparative sensitivity of leaf expansion and leaf conductance in field-growth sunflower. *Plant Soil* **153**, 189-194
- Sandras, V.O., Whitfield, D.M., Connor, D.J. 1991.** Regulation of evapotranspiration and its partitioning between transpiration and soil evaporation by sunflower crops: a comparison between hybrids of different stature. *Field Crops Res.* **28**, 17-37.
- Sarr, B., Lecoecur, J., Clouvel, P. 2004.** Irrigation scheduling of confectionery groundnut (*Arachis hypogaea* L.) in Senegal using a simple water balance model. *Agricultural water management*. **67**, 201-220.
- Scanlon, M.J. 1998.** Force fields and phyllotaxy: an old model comes to age. *Trends in Plant Science* **3**: 413–414.
- Schulze, E.D. 1982.** Plant life forms and their carbon, water and nutrient relations. In: Lange OL, Nobel PS, Osmond CB, Ziegler H, eds. *Encyclopedia of plant physiology, Vol. 12B*. Berlin: Springer, 616–667.
- Sexton, R., Woolhouse, H.W. 1984.** Senescence and abscission, in: Wilkins M.B. (Ed.) *Advanced Plant Physiology*, Longman Scientific and Technical, USA NY, pp. 469-497.
- Sharp, R.E. 2002.** Interaction with ethylene: changing views on the role of abscisic acid in root and shoot growth responses to water stress. *Plant, Cell & Environment* **25**: 211-222
- Sinclair, T.R. 2005.** Theoretical analysis of soil and plant traits influencing daily plant water flux on drying soils. *Agron, J.* **97**, 125-141
- Sinclair, T.R., Ludlow, M.M. 1986.** Influence of soil water supply on the plant water balance of four tropical grain legumes. *Aust. J. Plant Physiol.* **13**, 329-341.
- Sinclair, T.R. 1986.** Water and nitrogen limitation in soybean grain production: I. Model development. *Field Crop Res.* **15**, 125-141
- Singh, U., Thornton, P.K. 1992.** Using Crop Models for Sustainability and Environmental Quality Assessment *Outlook on Agriculture* **21** 209-218
- Slafer, G.A., Miralles, D.J. 1992.** Green area duration during the grain filling period of an Argentine wheat cultivar as influenced by sowing date, temperature and sink strength. *J. Agron. Crop sci.* **168** (3) : 191-200.

Sonohat-Popa, G. 1997. Analyse des variations de structure aériennes de peuplements de maïs dans différentes conditions de compétition interspécifiques. Thèse de l'Université Paris XI, Orsay, France

Sonoike, K. 1995. Pant cell. *Physiology*. 36 (5), pp. 825-830.

Spollen, W.G., Noble, M.E., Samuels, T.D., Bernstein, N., Sharp, R.E. 2000. Abscisic acid accumulation maintains maize primary root elongation at low water potentials by restricting ethylene production. *Plant Physiology* **122**: 967-976

Stewart, D.W., Dwyer, L.M. 1994. A model of expansion and senescence of individual leaves of field-grown maize (*Zea mays* L.). *Can. J. Plant Sci.* **74** : 37-42.

Summerfield, R.J., Collison, S.T., Ellis, R.H., Roberts, E.H., Penning de Vries, F.W.T. 1992. Photothermal responses of flowering in rice (*Oryza sativa*). *Annals of Botany* **69**, 101-112.

Tardieu, F., Granier, C., Muller, B. 1999. Modelling leaf expansion in a fluctuating environment: are changes in specific leaf area a consequence of changes in expansion rate? *New Phytologist* **143** :33-43.

Tardieu, F., Raymond, M., Hamard, P., Granier, C., Muller, B. 2000. Spatial distributions of expansion rate, Cell division rate and cell size in maize leaves: a synthesis of the effects of soil water status, evaporative demande and temperature. *Journal of experimental botany* **51** :1505-1514.

Tardieu, N., Katerji, N., Bethenod, O. 1990. Relation entre état hydrique du sol, le potentiel hydrique de base et d'autres indicateurs de la contrainte hydrique chez le Maïs. *Agronomie* **10**, 617-626

Thimann, K.V. 1978. Senescence. *Bot. Mag. Tokyo*. Special issue **1**: 19-43

Thimann, K.V. 2000. Senescence in plants. CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida. 276pp

Tollenaar, M., Daynard, T.B. 1978. Leaf senescence in short-season maize hybrids. *Can. J. Plant Sci.* **58** : 869-874.

Truong, H.H., Duthion, C. 1993. Time of flowering in pea (*Pisum sativum* L) as a function of leaf appearance rate and note of first flower. *Ann. Bot.* **72**, 133-142.

Turc, O., Lecoœur, J. 1997. Rates of leaf primordial initiation and expended leaves appearance are synchronized and related to air temperature in pea (*Pisum sativum* L). *Ann. Bot.* **80**, 265-273.

Turner, N.C., Kramer, P.J. 1980. Adaptation of Plants to Water and Hight Temperature Stress. New York: Wiley. Eds 1980.

Tuzet, A., Perrier, A., Massad, C. 1992 – Crop Water Budget Estimation of Irrigation Requirement. ICID Bulletin. 1992, Vol 41, No2.

- Tuzet, A., Perrier, A, 1998.** III. Les besoins en eau des cultures : analyse et application. I. Bases conceptuelles de l'analyse des besoins. Dans *Traité d'irrigation*. Tiercelin J.R. a Lavoisier. Paris. 147-162p.
- Van Ittersum, M.K., Leffelaar, P.A., Van Keulen, H., Kropff, M.J., Bastiaans, L., Goudriaan, J. 2002.** On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomie* 18, 201-234.
- Van Keulen, H., Seligman, N.G., 1987** – Simulation of water use nitrogen nutrition and growth of a spring wheat crop. *Simulation Monograph Pudoc Wageningen*.
- Varlet-Granchier, C., Bonhomme, R., Chartier, M., Artis, P., 1982-** Efficience de la conversion de l'énergie solaire par un couvert végétal. *Oecol. Plant* ;3, 3-26.
- Varlet-Grancher, C., Gosse, G., Chartier, M., Sinoquet, H., Bonhomme, R., Allirand, J.M. 1989.** Mise au point: rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal, *Agronomie*, 9, 419-439.
- Wagenvoort, W.A., Bierhuizen, J.F. 1977.** Some aspects of seed germination in vegetables. II. The effect of temperature fluctuation, depth of sowing, seed size and cultivar on heat sum and minimum temperature for germination. *Scientia Horticulturae* 6, 259-270.
- Walter, A., Schurr, U. 1999.** The modular character of growth in *Nicotiana tabacum* plants under steady state nutrition. *Journal of Experimental Botany* 50: 1169–1177.
- Weaver, S.E. 1996** – Simulation of crop-weed competition: Model and their applications. *Phytoprotection* 77, 3-11.
- Weir, A., Bragg, P., Porter, J., Rayner, J. 1984** – A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations. *J. Agric Sci Cambridge*. 102: 371-382.
- Whisler, JR., Acock, B., Baker, D.N., Fye, R.E., Hodges, H.F., Lambert, J.R., Lemmon, H.E., McKinion, J.M., Reddy, V.R. 1986.** Crop simulation models in agronomic systems. *Advances in Agronomy* 40, 141-208
- Wit, C.T. 1978.** Simulation of assimilation respiration of transpiration of crops. *Simulation Monographs*. Pudoc, Wageningen. 1978.
- Wit, C.T., Goudriaan, J. 1974.** Simulation of ecological processes. *Simulation Monographs*. Pudoc, Wageningen.
- Wolfe, D.W., Henderson, D.W., Hsiao, T.C., Alvino.1988.** A. Interactive water and nitrogen effects on senescence of maize. I. Leaf area duration, nitrogen distribution, and yield. *Agronomy Journal*, 80: 859-864. Nov-Dec.
- Yang, J., Zhang, J., Wang, Z., Zhu, Q., Liu, L. 2002.** Abscisic acid and cytokinins in the root exudates and leaves their relations with senescence and remobilization of carbon reserves in rice subjected to water stress during grain filling. *Planta* 215: 645-652
- Yang, J., Zhang, J., Wang, Z., Zhu, Q., Liu, L. 2003.** Involvement of Abscisic acid and cytokinins in the senescence and remobilization of carbon reserves in wheat subjected to water stress during grain filling. *Plant Cell & Environment* 26: 1621-1631

Yang, J., Zhand, J. 2006. Grain filling of cereals under soil drying. *New Phytologist* **169**: 223-236

ANNEXES

ANNEXE I

Tableau 1: Liste des principaux paramètres et données d'entrées du modèle Bilhyna (Les paramètres spécifiques liés aux lois de développement-croissance sont résumés dans le tableau 2 suivant de la même annexe :

Données de forçages (données mesurées ou calculées)

P		Précipitation	mm
T		Température moyenne journalière	$^{\circ}C$
	ou	Tr Température du point de rosé	$^{\circ}C$
	ou	$P(Tr)$ Pression saturante de vapeur	Pa
		Et $P'(Tr)$ sa dérivée	Pa
Hum		Humidité relative de l'air	%
V		Vent	$m.s^{-1}$
n		Durée d'insolation	h
	ou	Rg Rayonnement global	$W.m^{-2}$
	ou	Rn Rayonnement net	$W.m^{-2}$
H_i		Humidité du sol au premier jour de la simulation (de n couches)	kg_{eau} / kg_{sol}

Paramètres des sols (donnés par analyse et mesures pédologique):

H_{sat}		Humidité du sol à saturation	kg_{eau} / kg_{sol}
H_{cc}		Humidité du sol sec en équilibre avec l'air	kg_{eau} / kg_{sol}
H_a		Humidité du sol à saturation	kg_{eau} / kg_{sol}
$Nbr_{horizon}$		Nombre d'horizon du sol	
$Nbr_{Couche / horizon}$		Nombre de couche par horizon de sol	
e_{couche}		Épaisseur d'une couche de sol	m
da		Densité apparente	kg / m^3
α_{VG}		Paramètre de Van Genuchten	m^{-1}
n_{VG}		Paramètre de Van Genuchten	sans unité
nk_{VG}		Paramètre de Van Genuchten pour la conductivité	sans unité
K_s		Conductivité hydraulique à saturation	$m.s^{-1}$
$turt$		Coefficient de tortuosité du sol (estimée par la bibliographie)	

Paramètres des couverts (donnés généralement par la bibliographie ou mesurés pour des conditions particulières : climats, sols et surtout variétés):

H_{max}		Humidité en eau maximale du sol (pondérale)	$kg.kg^{-1}$
H_{min}		Humidité en eau minimale du sol (pondérale)	$kg.kg^{-1}$
LAI_{max}		Indice de surface maximale des feuilles	$m^2.m^{-2}$
Z_h		Hauteur maximale du couvert	m
Z_r		Profondeur maximale des racines d'un couvert	m

$r_{s_{\min}}$	Résistance stomatique minimale	$s.m^{-1}$
$r_{0_{\max}}$	Résistance interne maximale du couvert	$s.m^{-1}$
$D \cong 2A$	Somme des degrés jour nécessaire pour réaliser l'ensemble du développement de la plante (du semis à la sénescence)	C
A	Somme des degrés jour nécessaire à la réalisation du 1/2 cycle de développement total de la plante (du semis à la fin de la phase de développement foliaire ou bien du début de la phase plateau à la fin de la phase de sénescence)	C

Paramètres géographiques :

<i>Alb</i>	Albédo de la surface	
<i>Lat</i>	Latitude géographique du lieu de la simulation	<i>radian</i>

Paramètres techniques :

Dates du labour (si renseignées au modèle)
 Dates du semis (si renseignées au modèle)
 Profondeurs de labour
 Profondeurs de semis

Tableau 2 : Liste des paramètres d'entrées du modèle Biophysique

* Données biophysiques liées aux couverts

T_f	Température journalière létale du couvert	$^{\circ}C$
T_0	Température journalière représentant le zéro végétatif de la plante obtenue par linéarisation expérimentale	$^{\circ}C$
T_{opt}	Température journalière optimale de développement fixée par sa valeur adimensionnée X_{max}	$^{\circ}C$
T_{moy}	Température journalière moyenne climatique de la région du lieu d'origine de la culture où la loi de l'action de la température a été établie	$^{\circ}C$
a	Coefficient fixant la durée du plateau en degré jour par rapport à $D/2$	%
α	Coefficient de sensibilité au stress hydrique d'un couvert végétal	sans unité
$Coeff_{tall}$	Coefficient fixant la durée de la phase installation pour les cultures avec tallage (varie de 0 à 1)	sans unité
PAR_{max}	Rayonnement photosynthétiquement actif	$W.m^{-2}$
y_0	Valeur du critère de croissance analysé, valant une proportion de la valeur maximale du critère considéré (1/100 dans la plupart des cas)	$^{\circ}C$

Paramètres du couvert

$Ceff_{LAI_{mort}}$	Part du LAImort par rapport au LAIvert dans les échanges (varie de 0 à 1)	sans unité
Z_{Chaume}	Hauteur de chaume après récolte	m

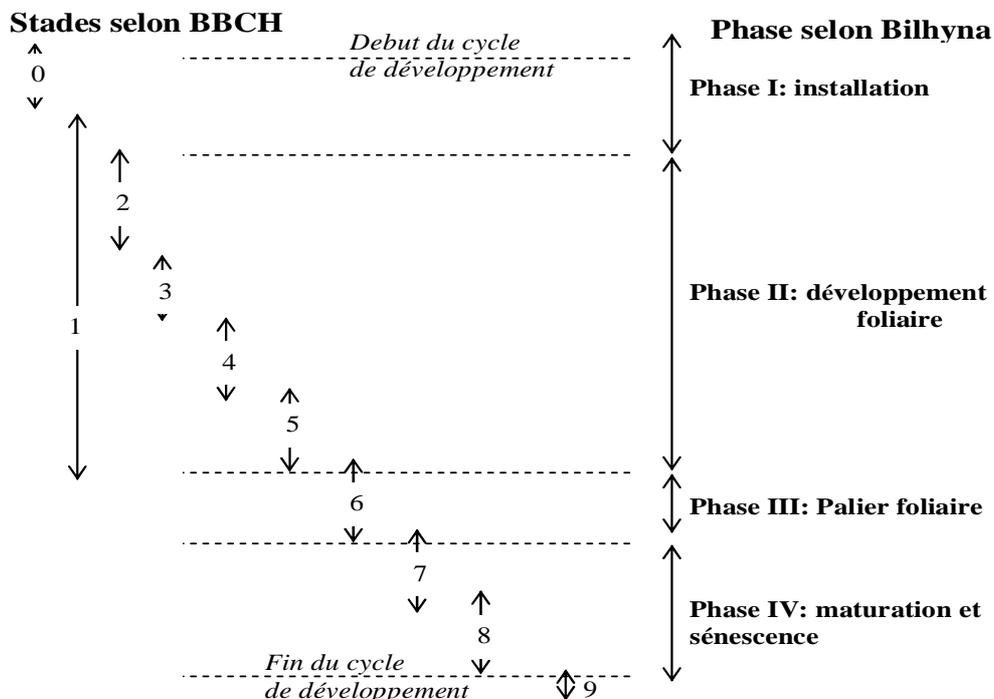
ANNEXE II

ANNEXE II.1. Echelle de représentation des stades de développement

a) Tableau récapitulatif des stades de développement des mono et dicotylédones selon l'échelle de classification améliorée de BBCH (*Biologische Bundesanstalt, Boundessortenamt et Chemische Industrie*) d'après Uwe Meier, 2001.

Description des stades	Code des stades
	Principaux/amélioré
Germination/levée/ développement des bourgeons	0.0 / 0.0 à 0.9
Développement des feuilles (tiges principale)	1.0 / 1.0 à 1.9
Formation des pousses secondaire/tallage	2.0 / 2.0 à 2.9
Elongation de la tige/formation de la rosette/Développement des pousses	3.0 / 3.0 à 3.9
Développement des parties végétatives de récoltes ou des organes de multiplications végétatives/Développement des organes de reproductions sexuée, gonflement de l'épi ou de la panicule (tige principale)	4.0 / 4.0 à 4.9
Apparition de l'inflorescence (tige principale)/épiaison	5.0 / 5.0 à 5.9
Floraison (tige principale)	6.0 / 6.0 à 6.9
Développement du fruit	7.0 / 7.0 à 7.9
Maturation du fruits, grains	8.0 / 8.0 à 8.9
Sénescence et mort ou début de la période de dormance	9

b) Schéma général du déroulement des principaux stades de développement et succession de leurs déroulements selon la classification BBCH (gauche) et des quatre phases de développement, tel les que prises en compte dans Bilhyna (droite).



ANNEXE II.2.

Les trois conditions définissant les trois paramètres dans l'expression de la vitesse de développement d'un couvert, telles que prises en compte dans le modèle de loi de vitesse de développement proposé dans le modèle Bilhyna B

On a trois conditions :

I) T_{opt} donc X_{opt} on a $\frac{dV_d}{dX} = 0$

Calcul de la dérivée

$$\begin{aligned} \frac{dV_d}{dX} &= B \cdot \left[\exp\left(\eta X + \frac{\tau}{4}\right) \left(\exp(\tau X(X-1)) (-\eta - \tau(2X-1)) + \eta \exp\left(\eta X + \frac{\tau}{4}\right) \right) \right] \\ \Leftrightarrow 0 &= B \cdot \left[\exp\left(\eta X_{opt} + \frac{\tau}{4}\right) \left(\exp(\tau X_{opt}(X_{opt}-1)) (-\eta - \tau(2X_{opt}-1)) + \eta \exp\left(\eta X_{opt} + \frac{\tau}{4}\right) \right) \right] \\ \Leftrightarrow \eta &= \frac{\tau(2X_{opt}-1)}{\exp(-\tau X_{opt}(X_{opt}-1)) - 1} \end{aligned}$$

II) à T_{moy} donc X_{moy} on a $V_{dmoy} = \frac{T_{moy} - T_0}{A_{max}}$

$$\begin{aligned} V_{dmoy} &= \frac{T_{moy} - T_0}{A_{max}} = B \cdot \exp\left(\eta X_{moy} + \frac{\tau}{4}\right) \left(1 - \exp(\tau X_{moy}(X_{moy}-1))\right) \\ \Leftrightarrow B &= \frac{(T_{moy} - T_0) / A_{max}}{\exp\left(\eta X_{moy} + \frac{\tau}{4}\right) \left(1 - \exp(\tau X_{moy}(X_{moy}-1))\right)} \end{aligned}$$

III) à T_{moy} donc X_{moy} on a $\frac{dV_d}{dX} = \frac{T_{max} - T_{min}}{A_{max}}$

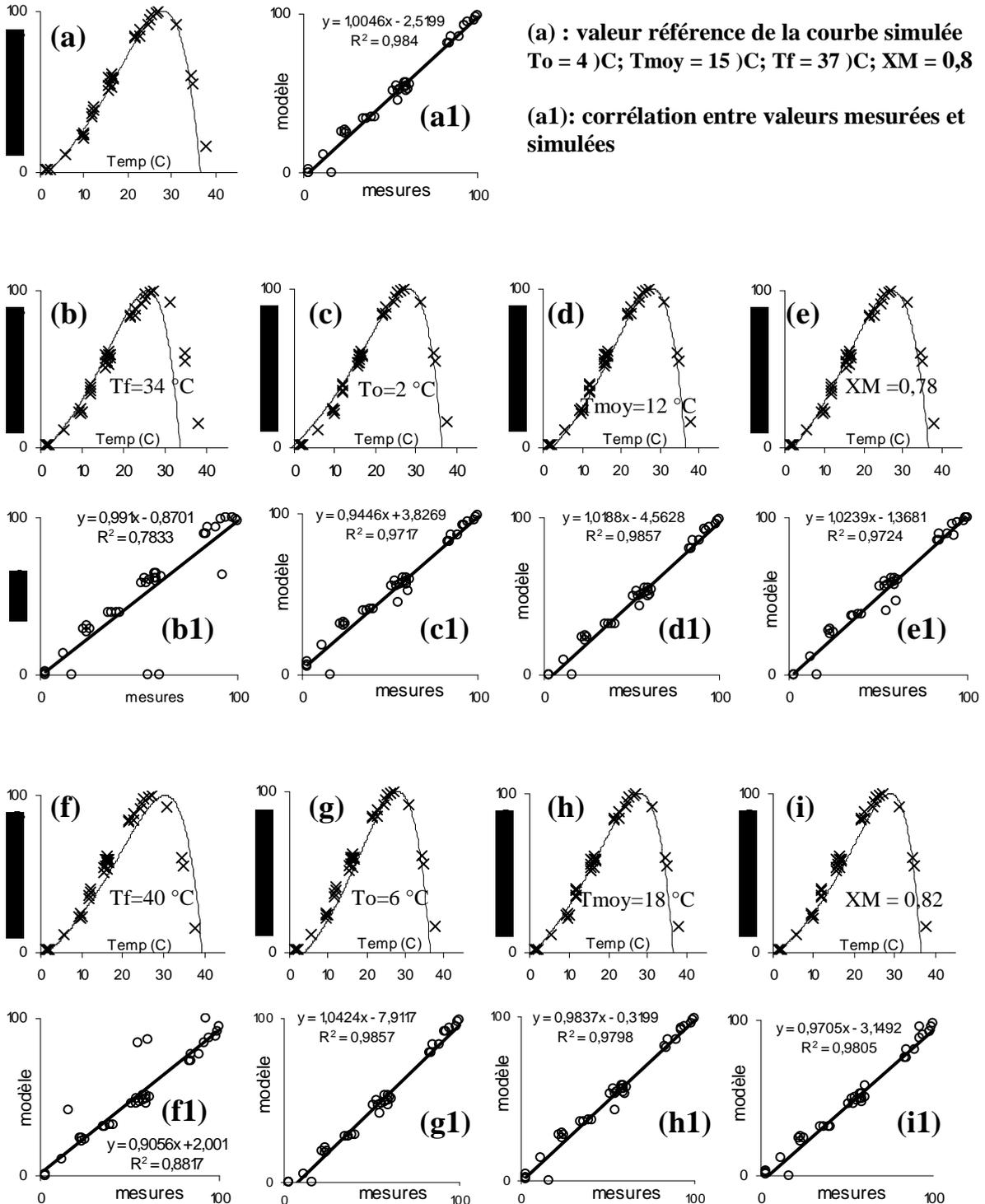
$$\frac{T_{max} - T_{min}}{A_{max}} = B \cdot \left[\eta \cdot \exp\left(\eta X_{moy} + \frac{\tau}{4}\right) \left(\exp(\tau X_{moy}(X_{moy}-1)) \left(-1 - \frac{\tau}{\eta}(2X_{moy}-1)\right) + 1 \right) \right]$$

et $V_{dmoy} = \frac{T_{moy} - T_0}{A_{max}} = B \cdot \exp\left(\eta X_{moy} + \frac{\tau}{4}\right) \left(1 - \exp(\tau X_{moy}(X_{moy}-1))\right)$

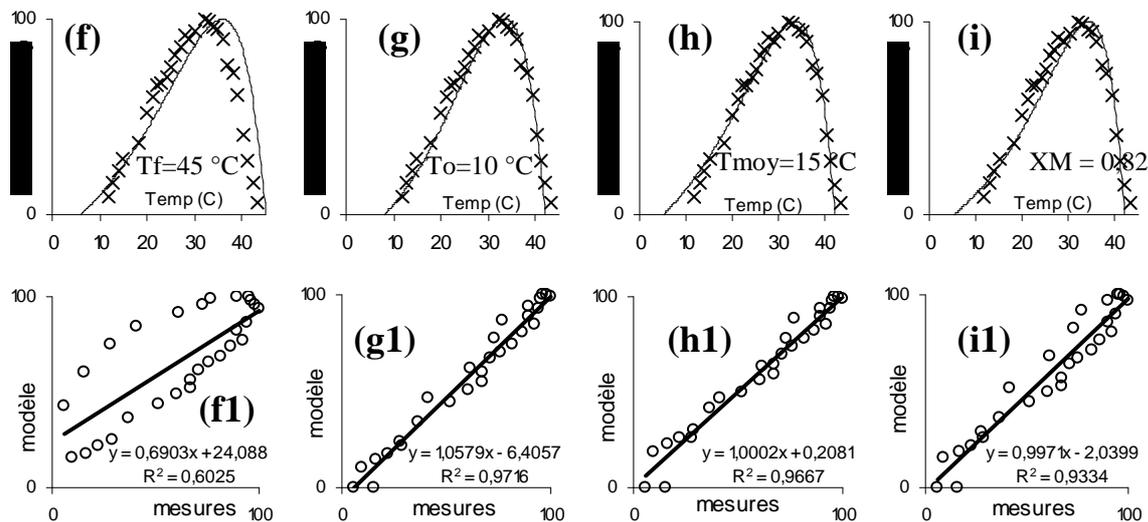
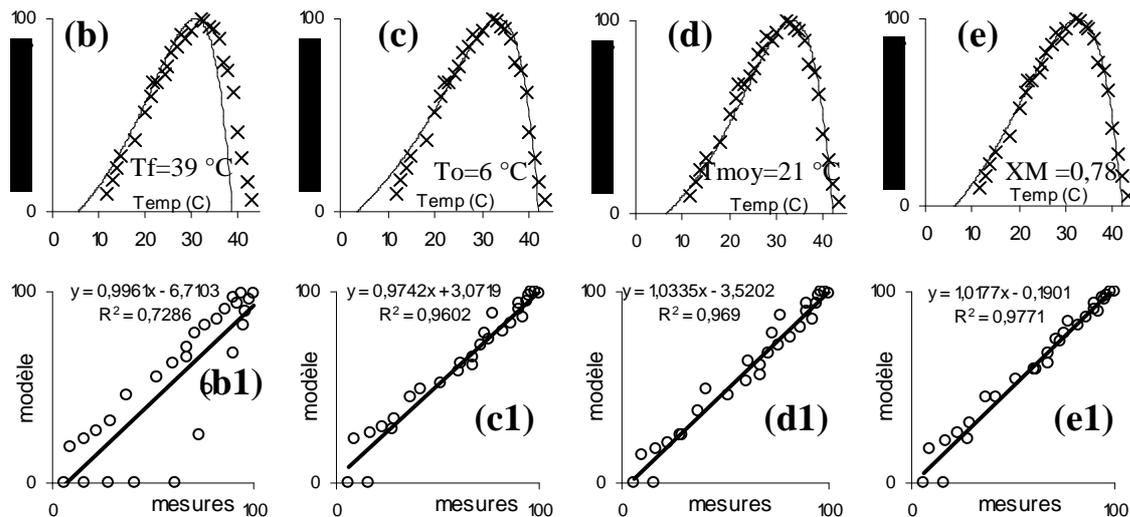
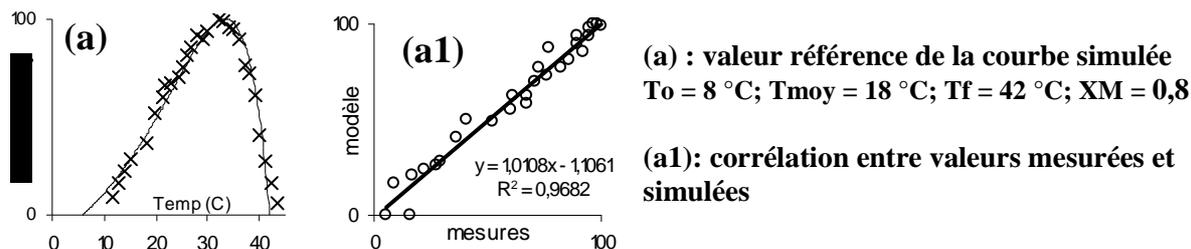
$$\Leftrightarrow \frac{T_{max} - T_{0min}}{T_{moy} - T_0} = \frac{\tau(2X_{opt}-1)}{\exp(-\tau X_{opt}(X_{opt}-1)) - 1} - \frac{\tau(2X_{moy}-1)}{\exp(-\tau X_{moy}(X_{moy}-1)) - 1}$$

ANNEXE II.3. Figure 1 : Sensibilité du modèle de la loi d'action des températures sur la vitesse de développement selon l'erreur minimale pour (b), (c), (d), (e), et maximale pour (f), (g), (h), (i), correspondant à l'ordre de grandeur des erreurs pouvant être commises par l'utilisateur par rapport à la référence (a) et confrontation entre ces valeurs simulées par le modèle et celles mesurées expérimentalement par plusieurs auteurs et tirées de la bibliographie.

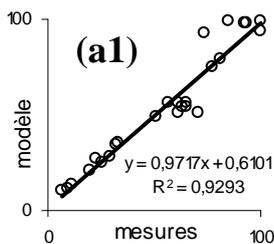
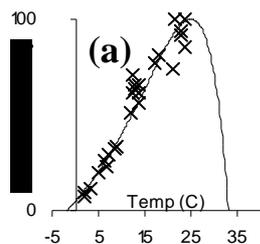
Culture de Lin : mesures expérimentales (x) d'après Durant et al. ;1967, comparées au valeurs de vitesse de développement simulées par le modèle proposé (trait plein).



Culture de Maïs : mesures expérimentales (x) d'après Tollenaar et al 1979, comparées aux valeurs de vitesse de développement simulées par le modèle proposé (trait plein)

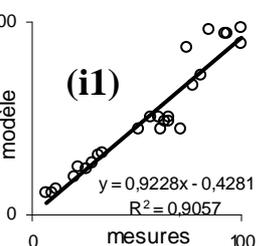
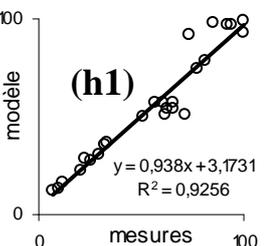
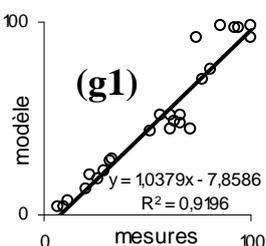
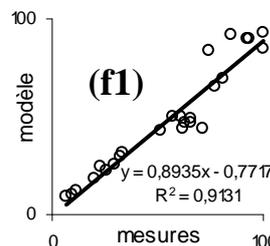
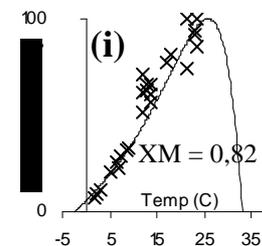
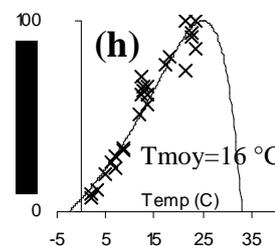
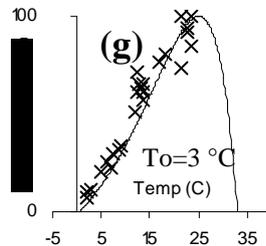
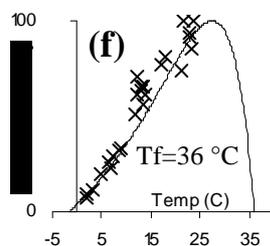
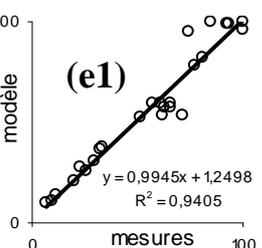
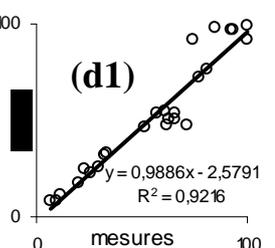
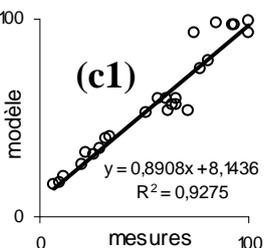
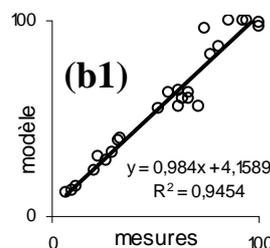
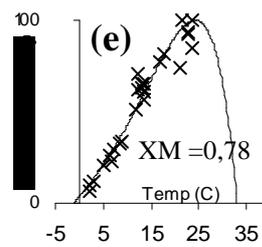
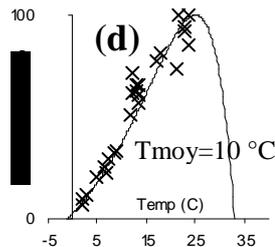
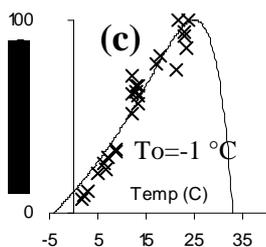
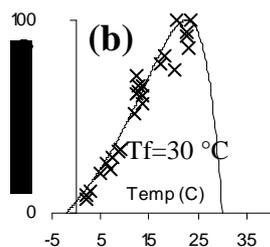


Culture de Blé : mesures expérimentales (x) d'après Geslin,1944, comparées aux valeurs de vitesse de développement simulées par le modèle proposé (—)



(a) : valeur référence de la courbe simulée
To = 1 °C; Tmoy = 13 °C; Tf = 33 °C; XM = 0,8

(a1): corrélation entre valeurs mesurées et simulées



ANNEXE II.4.

Tableau 1. Listes des paramètres analysés dans l'étude de la sensibilité du modèle Bilhyna (développement-croissance)

a- Paramètres sol

- * H_{\min} : humidité minimale du sol
- * H_{\max} : humidité maximale du sol
- * H_{cc} : humidité à la capacité au champ d'un sol
- * H_{sat} : humidité à saturation d'un sol
- * da : densité apparente du sol.

b- Paramètres physiologiques et de couverts

- * LAI_{\max} : indice foliaire maximum du couvert produit en conditions non limitantes de production.
- * Zh_{\max} : hauteur maximale atteinte par la culture en conditions de production non limitantes.
- * Zr_{\max} : profondeur maximale d'enracinement atteint en conditions d'alimentations hydriques non limitantes.
- * Ky_0 : proportion du critère de croissance maximum ($Laimax$, $Zhmax$, $Zrmax$) définissant la valeur initiale du critère de croissance analysé.
- * $R_{s_{\max}}$: résistance stomatique minimale du couvert qui fixe la valeur de l'ETM par rapport à la demande climatique EP.
- * r_0 : résistance de structure du couvert.
- * $Taux_Mort_LAI$ (ou TFLAI) : représente la proportion du Laimort prise en compte dans l'évapotranspiration du couvert.

c- Paramètres biophysiques

- * D : Somme des températures journalières (degrés jour), comptée à partir du seuil de température végétative (seuil expérimental), depuis le semis jusqu'à la récolte.
- * a : Coefficient qui définit la durée du stade reproduction (palier du LAI) et qui vaut une proportion de la somme des degrés jours (D), caractérisant la période allant de la phase de fin reproduction à la fin de la sénescence, soit $a \cdot (\frac{D}{2})$.
- * T_f : température finale pour laquelle la plupart des processus biologiques d'une plante s'arrêtent.
- * T_{moy} : température moyenne du lieu de production, traduisant les potentialités de croissance du climat de production en question.
- * Coef Instal (ou Coef T): Coefficient d'installation de la culture (ou coefficient de tallage pour les plantes qui talle) qui définit la durée de la phase installation de la culture ; phase précédent celle du développement foliaire.
- * α : coefficient de la contrainte hydrique de la fonction de sécheresse $f(eau)$.
- * PAR_{\max} : rayonnement photosynthétiquement actif, correspondant à une croissance optimale du couvert.

ANNEXE III

ANNEXE III.1. Dates et doses d'irrigations durant les cinq expérimentations

Tableau 1 : Dates des doses d'irrigations pour chacun des traitements (sorgho 1999)

Dates (et jours après semis)	ETM (mm)	ETR2 (mm)	ETR1 (mm)	Pluv (mm)
10-juil (6 j.a.s)	17.8	16.5	17.5	17.5
13-juil (9 j.a.s)	28	28	28	26.5
15-juil (11 j.a.s)	26.8	26,5	26	27
18-juil (14 j.a.s)	23.8	23	23.5	24.5
26-juil (22 j.a.s)	27	23	0	0
31-juil (27 j.a.s)	25	24.5	0	0
03-aout (30 j.a.s)	30	30	0	0
06-aout (33 j.a.s)	29	29	29	0
11-aout (38 j.a.s)	21.6	20	20	0
15-aout (42 j.a.s)	20	0	20	0
18-aout (45 j.a.s)	20	0	20	0
26-aout (53 j.a.s)	22	0	0	0
31-aout (58 j.a.s)	20	20	0	0
05-sept (63 j.a.s)	17	17	0	0
07-sept (65 j.a.s)	15	15	15	0
11-sept (69 j.a.s)	20	20	20	0
14-sept (72 j.a.s)	17	17	17	0
17-sept (75 j.a.s)	20	20	20	0
19-sept (77 j.a.s)	20	20	20	0
Total (mm)	400	349.5	276	95.5

Tableau 2 : Dates des doses d'irrigation pour chacun des traitements (blé 2000)

Dates	20- fev	07- mar	22- mar	28- mar	29- mar	08- avr	15- avr	22- avr	30- avr	06- mai	13- mai	Total	
Dose (mm)	ETM	27	11	15		17	26	17	36	35	29	25	238
	ETR2	27	47						40				114
	ETR1	27			40								67
	SEC	27											27

Tableau 3 : Dates des doses d'irrigation pour chacun des traitements (blé 2001)

Dates	10-mars	20-mars	30-mars	10-avril	21-avril	Total
Dose (mm)	ETM	23	17	25	30	142
	ETR2			55		55
	ETR1				85	85
	Pluv					0

Tableau 4 : Dates des doses d'irrigation pour chacun des traitements (blé 2002)

Dates	23- mars	01- avril	10- avril	17- avril	19- avril	28- avril	29- avril	10- mai	11- mai	total
Dose (mm)	ETM	16	18	18,1		11	45		20	128,1
	ETR2				50		45		20	105
	ETR1							45	20	65
	Pluv									0

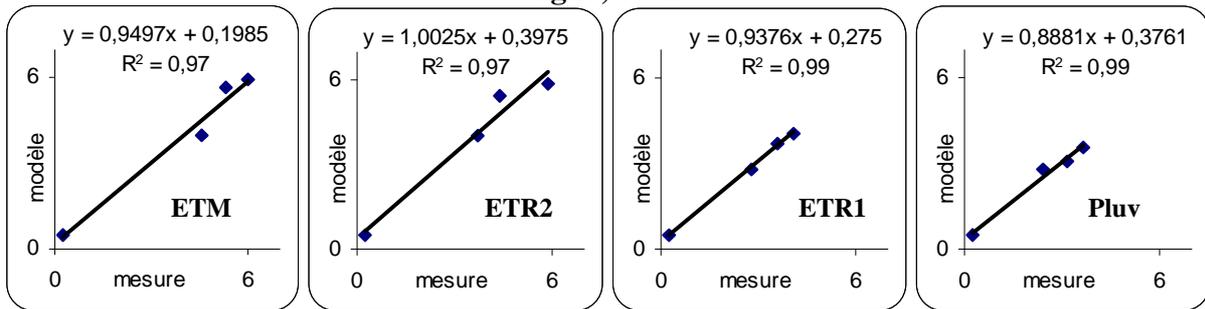
ANNEXE III.2.

Tableau 1 : Principaux paramètres liés au sol, à la plante et au climat, tels que pris en compte dans le modèle Bilhyna pour la validation.

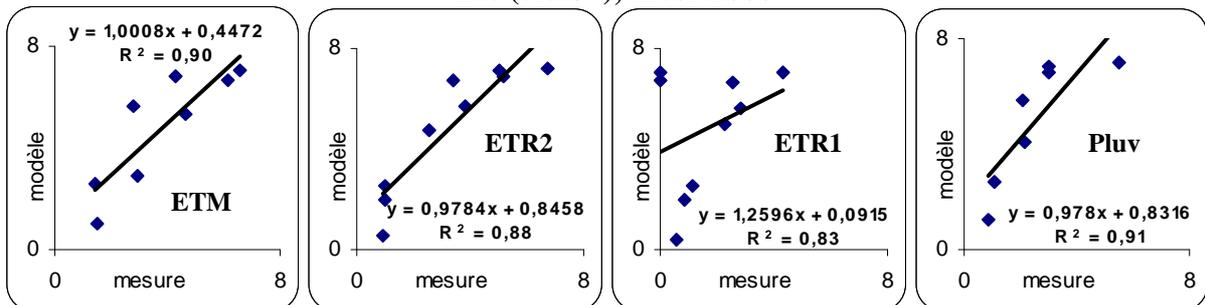
Paramètres	Sorgho	Blé	
	Sorgho	Vitron	Sémito
Hum du sol en équilibre avec l'air (Ha) %penderale	0,06	0,06	0,06
Hum min du sol (seuil plante) (Hmin) en %penderale	0,075	0,08	0,08
Hum max du sol (début de régulation stomatique) (Hmax) en %penderale	0,17	0,19	0,19
Hum du sol a la capacité-champ (Hcc)en %penderale	0,27	0,27	0,27
Humidité du sol a saturation (Hsat) en %penderale	0,3	0,3	0,3
Densité apparente (kg/m ³)	1,5	1,5	1,5
Température de base (To°C)	8,5	1	1
Température moyenne (Tmoy°C)	26	13,5	13,5
Température optimale (Topt°C)	0,8 Tf	0,8 Tf	0,8 Tf
Température létale (Tf°C)	44	35	35
LAI maximum du couvert (LAI _{max}) m ² /m ²	6,5	7,5	6,5
Hauteur maximale du couvert (Zh _{max}) Cm	1,3	0,7	0,8
Profondeur maximale des racines (Zr _{max}) cm	1,2	0,8	0,8
Valeur initiale du critère de croissance Yo	0,01 Y _{max}	0,01 Y _{max}	0,01 Y _{max}
Durée totale du cycle en degré jour (°C)	1750	1800	2200
Coefficient du plateau (a)	0,1	0,01	0,01
Coefficient tallage (coef.Tall)	1	0,05	0,01
Coefficient de contrainte hydrique (alpha)	0,4	0,5	0,5
Rayonnement photosynthetiquement actif maximum (PAR) en W.m ⁻²	50	30	30
Proportion du LAImort dans l'évo transpiration TF-LAI	0,5	0,5	0,5

ANNEXE III.2.

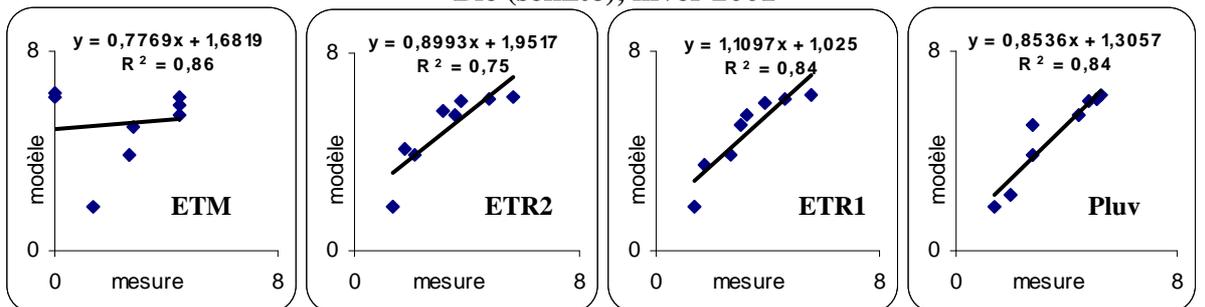
Sorgho, été 1999



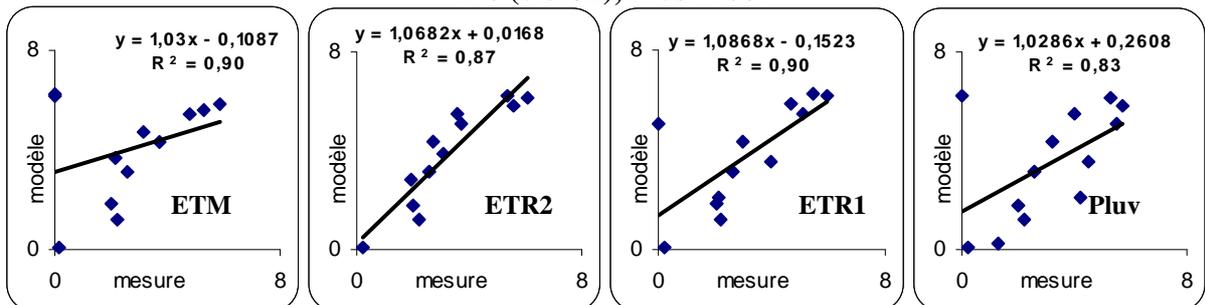
Blé (vitron), hiver 2000



Blé (sémito), hiver 2001



Blé (vitron), hiver 2002



Blé (sémito), hiver 2004

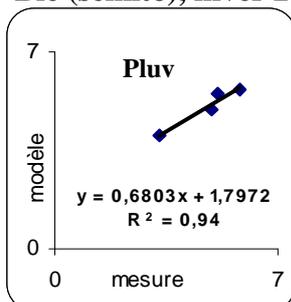
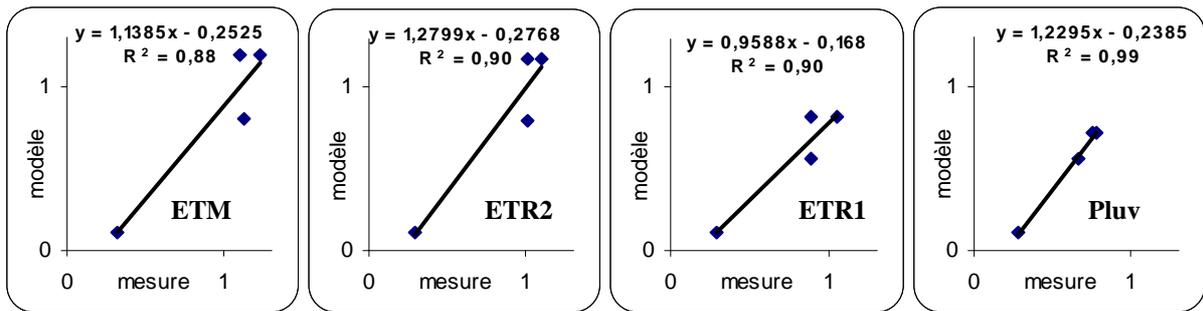
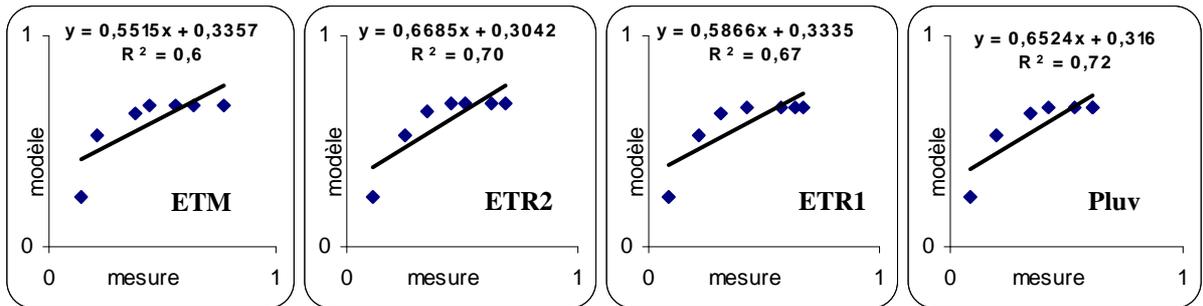


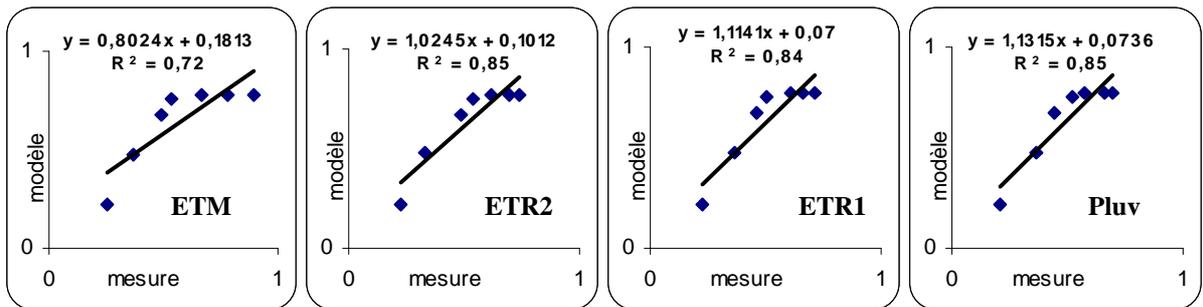
Figure 1A. Confrontation des simulations du modèle aux mesures expérimentales du LAIvert sur les cultures de sorgho et du blé et pour tous les traitements hydriques imposés chaque année



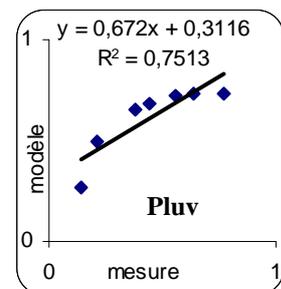
Sorgho, été 1999



Blé (vitron), hiver 2000



Blé (sémito), hiver 2001



Blé (sémito), hiver 2004

Figure 1B. Confrontation des simulations du modèle aux mesures expérimentales de la hauteur du couvert Z_h sur les cultures de sorgho et du blé, pour tous les traitements hydriques

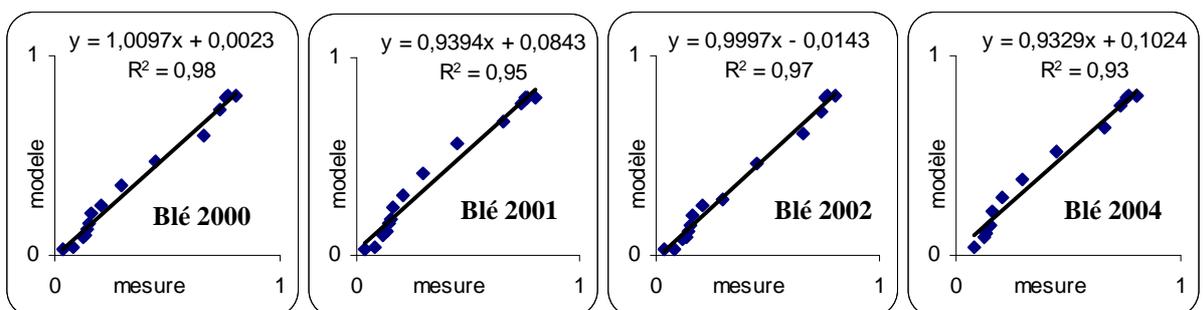


Figure 1C. Confrontation des simulations modèle/courbe ITGC de la croissance des racines en profondeur Z_r pour le blé en l'absence de tout stress hydrique

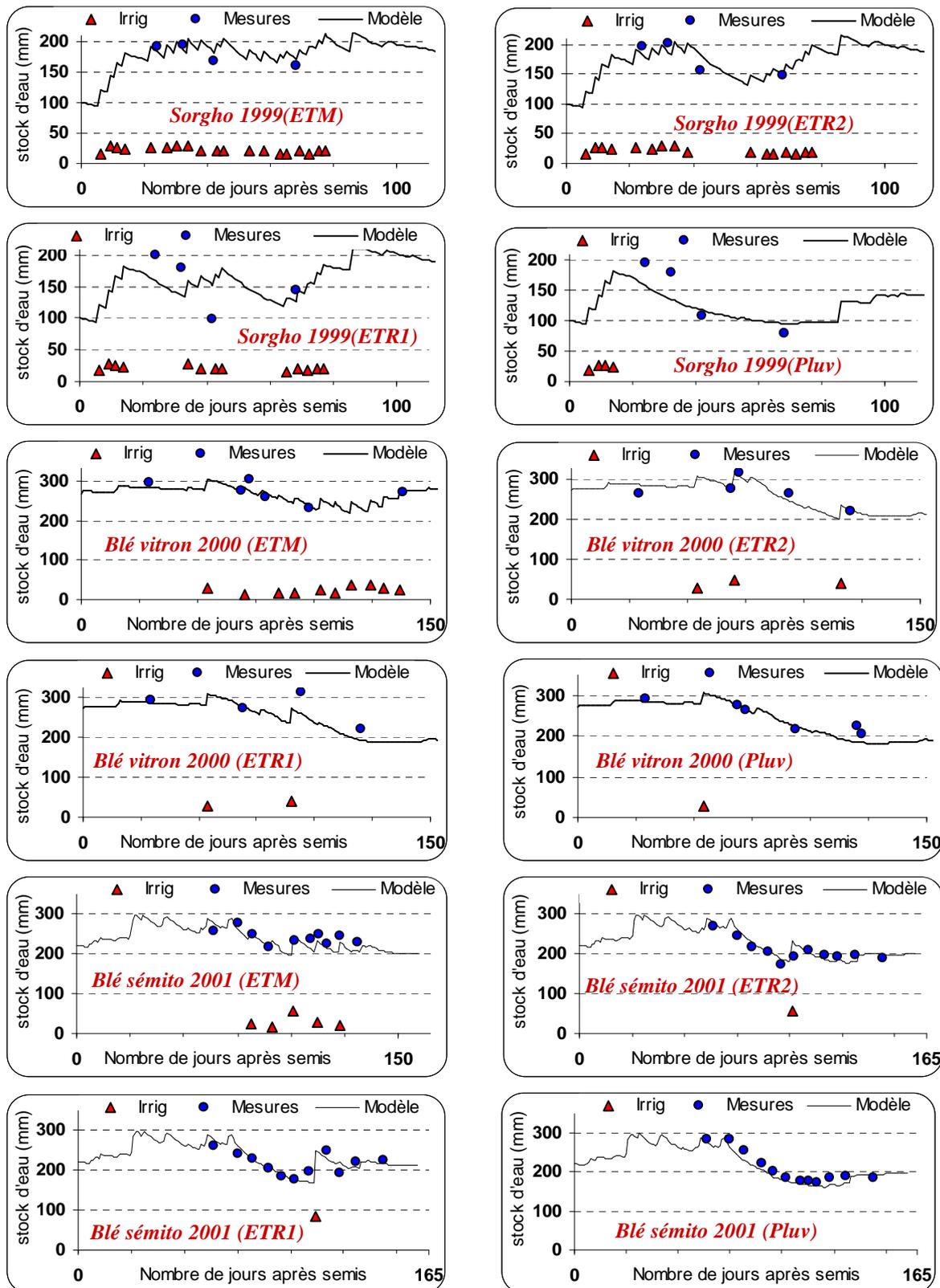


Figure 2A. Evolution des stocks d'eau du sol sur chacun des traitements hydrique imposés pour le sorgho (été 1999) et le blé (variétés vitron 2000 et sémito 2001) : (i) stocks mesurés expérimentalement et (ii) stocks modélisés par le modèle Bilhyna pour les mêmes conditions expérimentales.

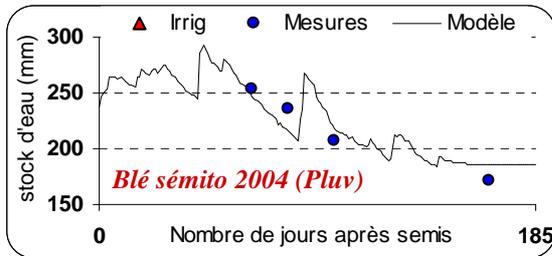
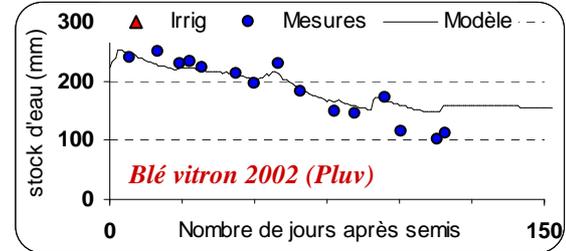
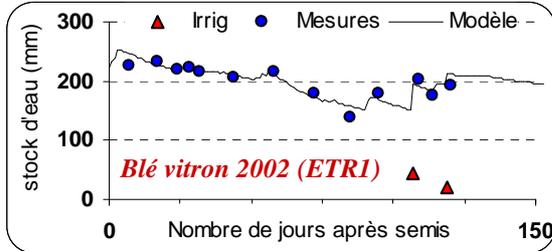
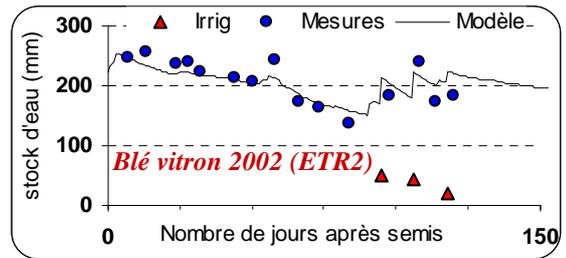
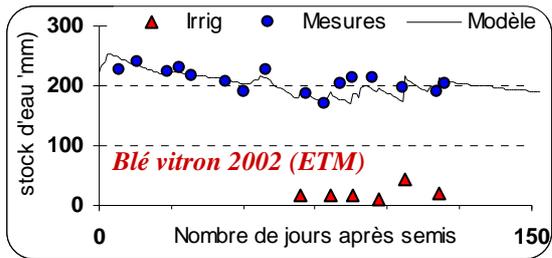


Figure 2B. Evolution des stocks d'eau du sol sur chacun des traitements hydrique imposés pour le blé (variétés vitron 2002 et sémito 2004) : (i) stocks mesurés expérimentalement et (ii) stocks modélisés par le modèle Bilhyna pour les mêmes conditions expérimentales.

ANNEXE IV

Exemple de paramètres et valeurs d'entrées dans le modèle Bilhyna pour la simulation des dates de labour et de semis

Pour cet essai, les dates de simulations commencent le 15 septembre pour le labour et le 15 octobre pour le semis et se terminent le 10 janvier pour les deux interventions. Les humidités d'entrées du modèle sont données dans le tableau ci-dessous. Pour une satisfaction probable d'une année sur deux des conditions souhaitables pour le semis, les besoins (ou consommation) sont données par l'équation exponentielle $\sum_{j=0}^{fin\ period\ semis} ET_{sys} = 87,704e^{-0,0425}$, avec $R^2 = 0,9698$ (figure 1, courbe exponentielle du milieu en bleue). La droite Zr_{fin} est donnée par l'équation de la droite des profondeurs, soit $Zr_{fin} = 1,3333x - 81,333$, avec $R^2 = 0,9091$ qui permet de déduire à son tour la réserve de sécurité R_{secur} .

Tableau des valeurs d'humidités utilisées dans le modèle Bilhyna pour simuler les dates de labours et de semis

	<i>Hsat</i>	<i>Hcc</i>	<i>H max</i>	<i>H min</i>	<i>Ha</i>	<i>H_{secur}</i>	<i>H_{lis_semenceu}</i>
Humidité Du sol en % volumique	46,5	40	35	20	10	25	35

La figure 1 montre l'évolution du stock d'eau donnée par Bilhyna en conditions réelles pour la période simulée (courbe en rouge) et des besoins (ou des consommations) probable définis par cinq niveaux de probabilités. On constate bien que pour un semis très tôt, soit pour le 2 novembre (intersection de la courbe du bilan réel donné par le modèle, en trait gras rouge, avec la courbe exponentielle Q5, en trait fin marron), les besoins de consommations depuis cette date jusqu'au début de la période humide sont sous-estimés, soit un risque probable admis de non satisfaction des ces besoins très est élevé. Pour un risque probable assez faible de non satisfaction des besoins de consommation jusqu'à la période humide, la date de semis est retardée pour le 20 novembre (intersection de la courbe du bilan réel donné par le modèle, en trait gras rouge, avec la courbe exponentielle Q1, en trait fin vert), augmentant ainsi les chances de réussite du semis. Pour un risque moyen de non satisfaction des conditions de réussite du semis jusqu'à la période humide (risque de deux années sur cinq), la première date proposée par le modèle est donnée par l'intersection de la courbe du bilan réel donné par le modèle, en trait gras rouge, avec la courbe exponentielle Q3, en trait fin bleue.

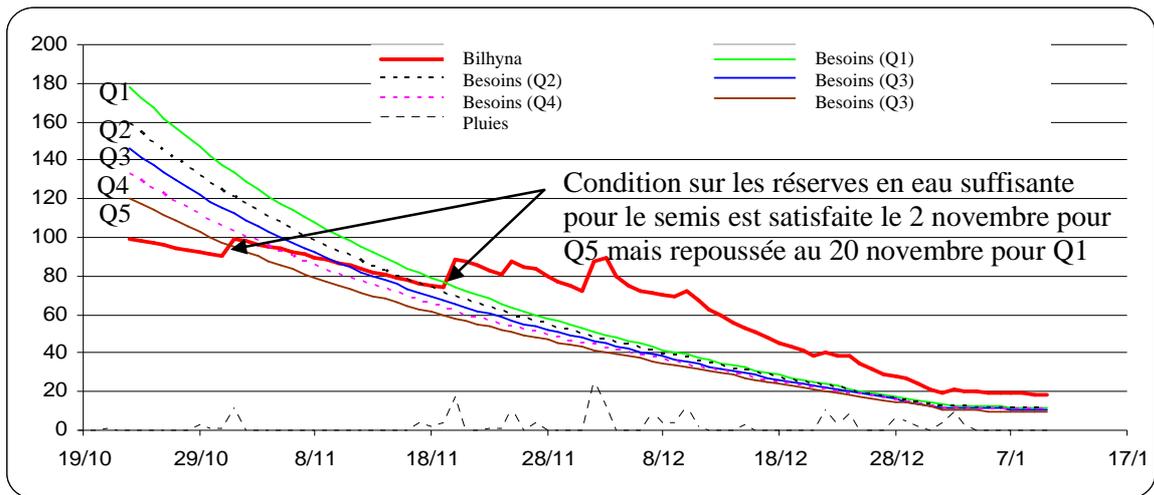
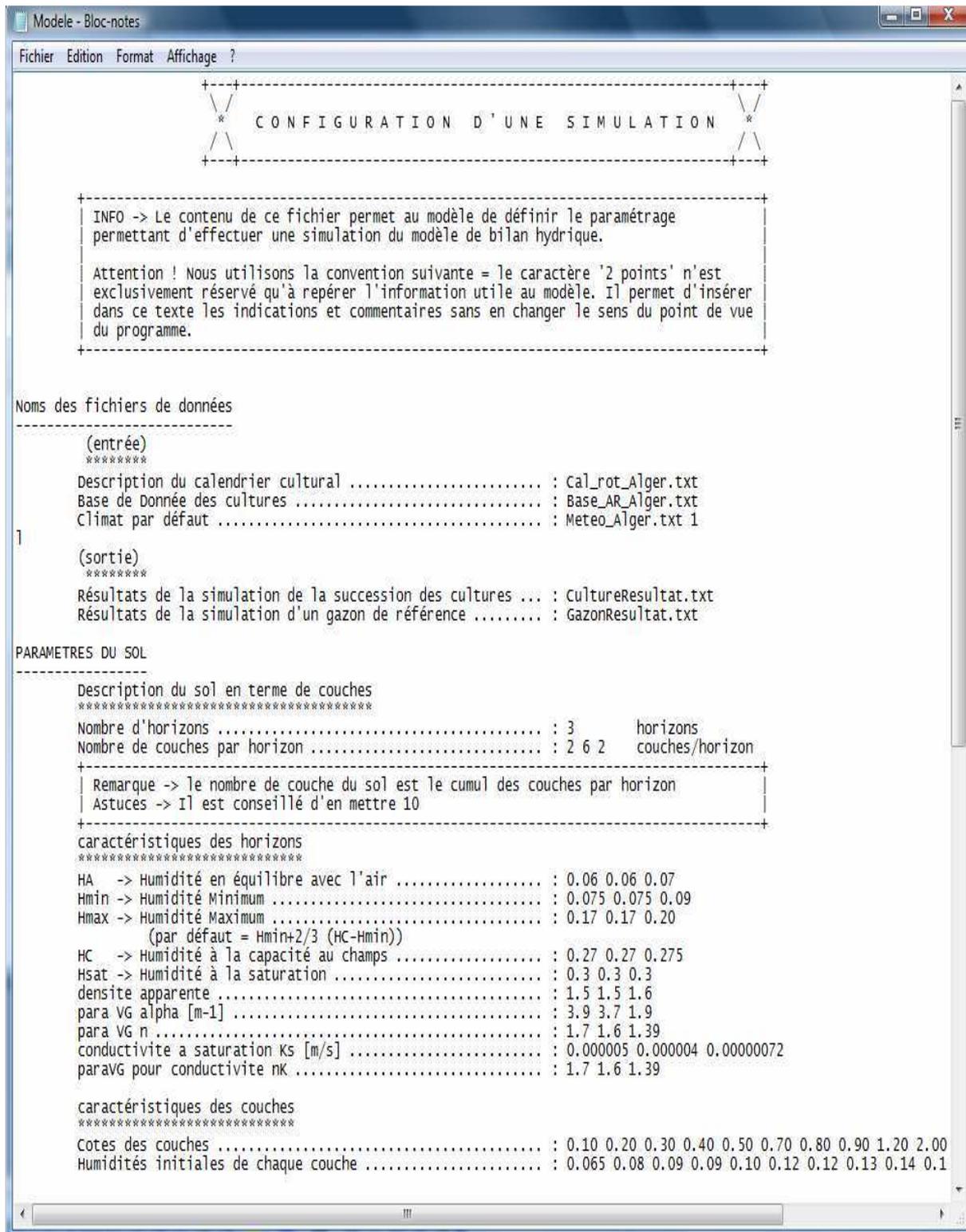


Figure 1. Evolution des besoins en eau (ou de consommation) établie sur une culture du blé (pour un niveau de confort supérieure ou égale à 75% R_{max}) simulées par le modèle Bilhyna sur la période d'étude statistique allant du 15 octobre à la mi-janvier) : cinq niveaux de probabilités du risque sont données allant du plus intense, pour lequel un risque élevé d'une tarification de l'eau de la réserve du sol est possible avant le début de la période humide (courbe Q5 en couleur marron), au plus faible pour lequel ce risque de tarification de la réserve en eau du sol est très faible (courbe Q1 en couleur verte).

ANNEXE V

Exemple de fichiers de paramètres d'entrées du modèle Bilhyna

Fichier → Modèle



```
Modele - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?

+-----+
| *      | CONFIGURATION D'UNE SIMULATION      | *      |
| *      |                                     | *      |
+-----+

+-----+
| INFO -> Le contenu de ce fichier permet au modèle de définir le paramétrage |
| permettant d'effectuer une simulation du modèle de bilan hydrique.          |
|                                     |
| Attention ! Nous utilisons la convention suivante = le caractère '2 points' n'est |
| exclusivement réservé qu'à repérer l'information utile au modèle. Il permet d'insérer |
| dans ce texte les indications et commentaires sans en changer le sens du point de vue |
| du programme.                      |
+-----+

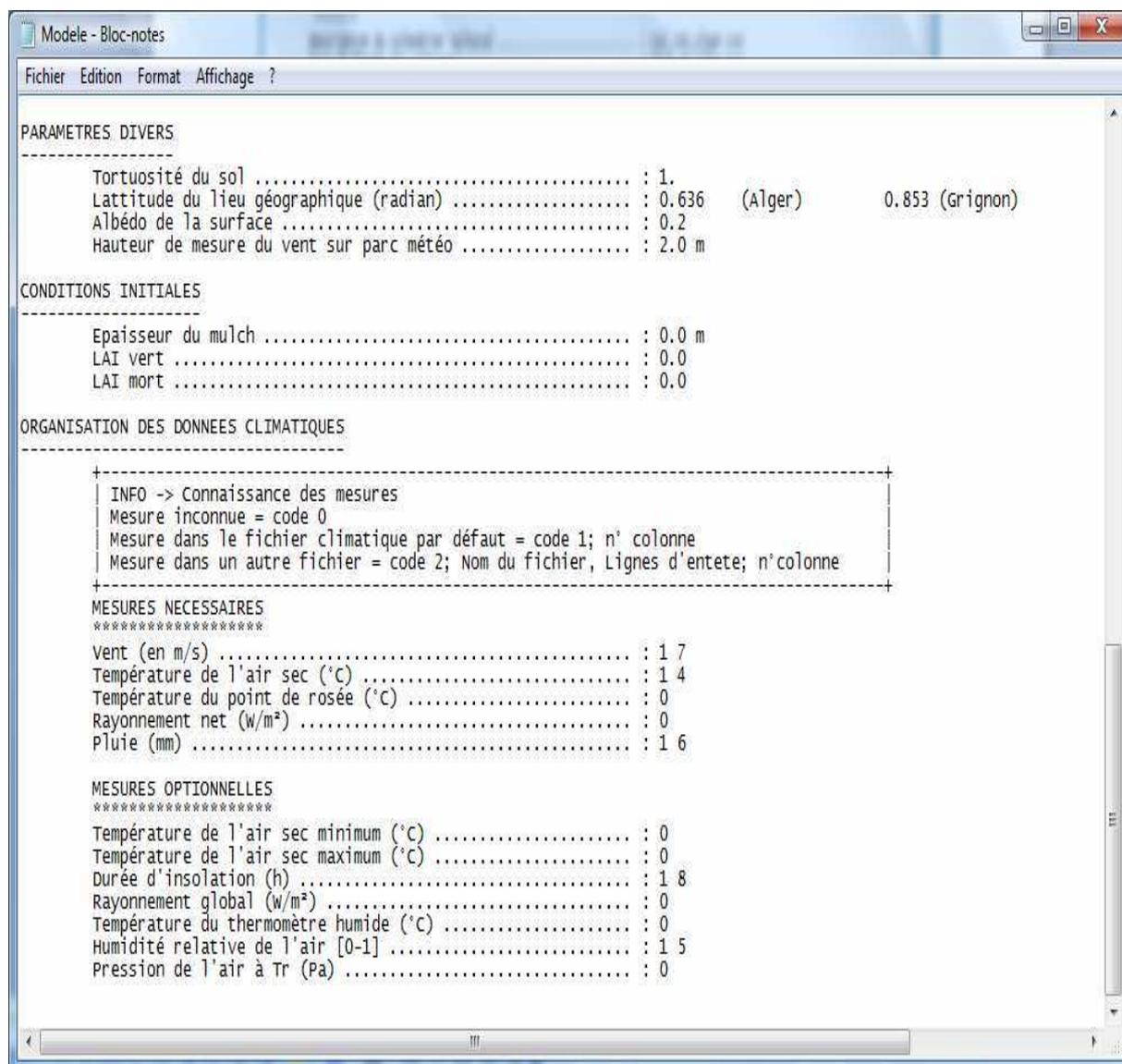
Noms des fichiers de données
-----
(entrée)
*****
Description du calendrier cultural ..... : Cal_rot_Alger.txt
Base de Donnée des cultures .....      : Base_AR_Alger.txt
Climat par défaut .....                 : Meteo_Alger.txt 1

1
(sortie)
*****
Résultats de la simulation de la succession des cultures ... : CultureResultat.txt
Résultats de la simulation d'un gazon de référence .....    : GazonResultat.txt

PARAMETRES DU SOL
-----
Description du sol en terme de couches
*****
Nombre d'horizons .....                 : 3      horizons
Nombre de couches par horizon .....     : 2 6 2  couches/horizon
+-----+
| Remarque -> le nombre de couche du sol est le cumul des couches par horizon |
| Astuces -> Il est conseillé d'en mettre 10                                |
+-----+
caractéristiques des horizons
*****
HA -> Humidité en équilibre avec l'air ..... : 0.06 0.06 0.07
Hmin -> Humidité Minimum .....             : 0.075 0.075 0.09
Hmax -> Humidité Maximum .....             : 0.17 0.17 0.20
      (par défaut = Hmin+2/3 (HC-Hmin))
HC -> Humidité à la capacité au champs ..... : 0.27 0.27 0.275
Hsat -> Humidité à la saturation .....      : 0.3 0.3 0.3
densité apparente .....                  : 1.5 1.5 1.6
para VG alpha [m-1] .....                : 3.9 3.7 1.9
para VG n .....                          : 1.7 1.6 1.39
conductivite a saturation Ks [m/s] .....  : 0.000005 0.000004 0.0000072
paraVG pour conductivite nK .....         : 1.7 1.6 1.39

caractéristiques des couches
*****
Cotes des couches .....                  : 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.70 0.80 0.90 1.20 2.00
Humidités initiales de chaque couche ..... : 0.065 0.08 0.09 0.09 0.10 0.12 0.12 0.13 0.14 0.1
```

Suite du fichier → Modèle



```
Modele - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?

PARAMETRES DIVERS
-----
Tortuosité du sol ..... : 1.
Latitude du lieu géographique (radian) ..... : 0.636 (Alger) 0.853 (Grignon)
Albédo de la surface ..... : 0.2
Hauteur de mesure du vent sur parc météo ..... : 2.0 m

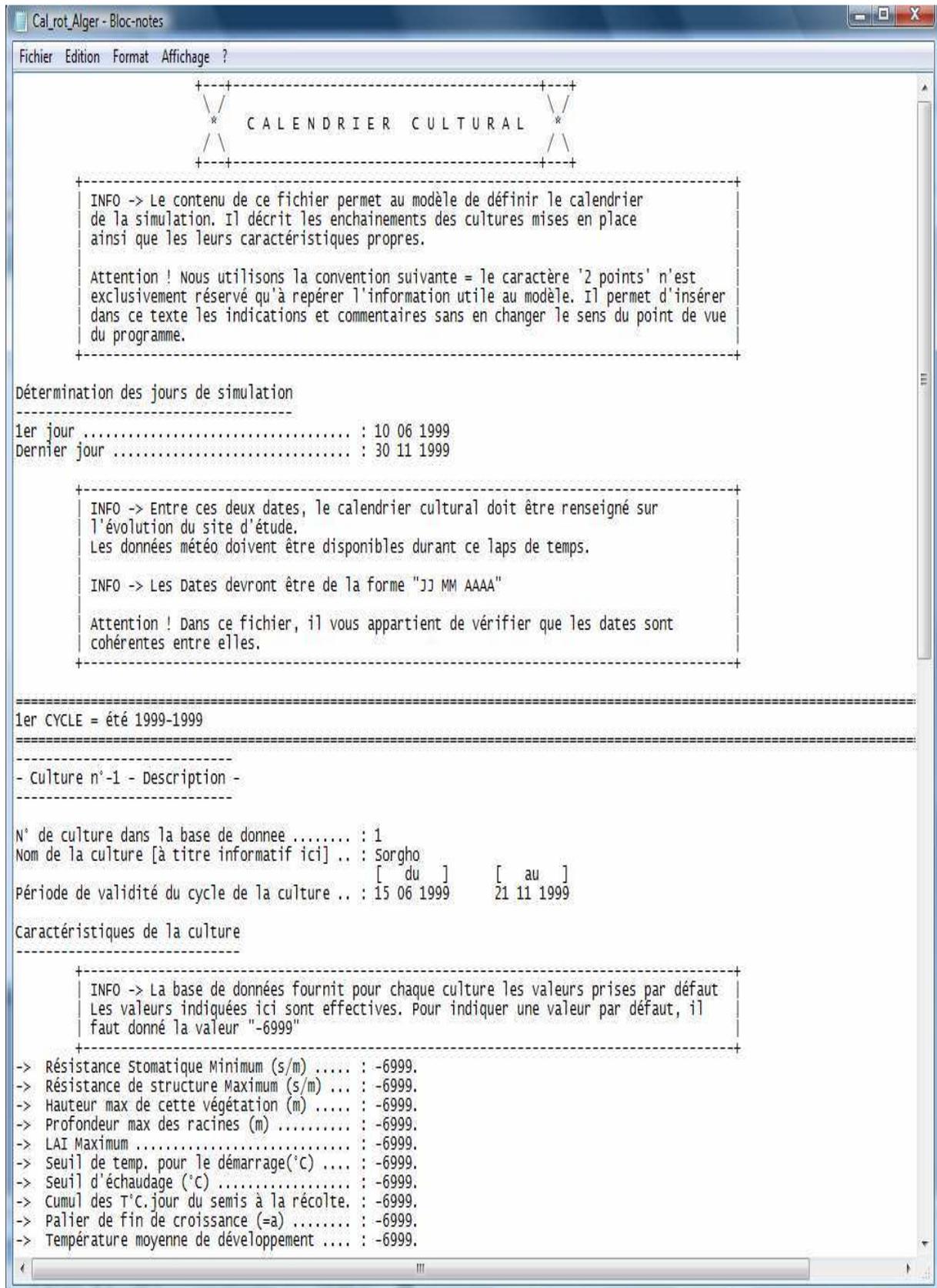
CONDITIONS INITIALES
-----
Epaisseur du mulch ..... : 0.0 m
LAI vert ..... : 0.0
LAI mort ..... : 0.0

ORGANISATION DES DONNEES CLIMATIQUES
-----
+-----+
| INFO -> Connaissance des mesures
| Mesure inconnue = code 0
| Mesure dans le fichier climatique par défaut = code 1; n° colonne
| Mesure dans un autre fichier = code 2; Nom du fichier, Lignes d'entete; n° colonne
+-----+

MESURES NECESSAIRES
*****
Vent (en m/s) ..... : 1 7
Température de l'air sec (°C) ..... : 1 4
Température du point de rosée (°C) ..... : 0
Rayonnement net (W/m²) ..... : 0
Pluie (mm) ..... : 1 6

MESURES OPTIONNELLES
*****
Température de l'air sec minimum (°C) ..... : 0
Température de l'air sec maximum (°C) ..... : 0
Durée d'insolation (h) ..... : 1 8
Rayonnement global (W/m²) ..... : 0
Température du thermomètre humide (°C) ..... : 0
Humidité relative de l'air [0-1] ..... : 1 5
Pression de l'air à Tr (Pa) ..... : 0
```

Fichier → Calendrier cultural



Suite du fichier → Calendrier culturel

```

Cal_rot_Alger - Bloc-notes
Fichier Edition Format Affichage ?
-> Température moyenne de développement .... : -6999.
-> Coef de contrainte hydrique ..... : -6999.
-> Taux de sénescence (%LAI mort à la récolte/LAI vert à la maturation)
..... : -6999.
-> PAR de développement optimal ..... : -6999.
-> Y0 de la croissance ..... : -6999.
-> Phase Emergence/Tallage (réduction du k0) : -6999.

Interventions Techniques
-----
-> Labour ..... : 1      20 06 1999      -6999.
+-----+
| INFO -> LABOUR
| -> Pas de labour = code 0
| -> labour = code 1; date; profondeur du labour (m)
+-----+

-> Lit de semence ..... : 1      01 07 1999      -6999.
+-----+
| INFO -> LIT DE SEMENCE
| -> Pas de lit de semence = code 0
| -> lit de semence fixée = code 1; date; profondeur du travail du sol (m)
+-----+

-> Semis ..... : 2      3      -6999.
+-----+
| INFO -> SEMIS
| -> Pas de semis = code 0
| -> semis fixé = code 1; date; profondeur de la graine (m)
| -> semis automatique = code 2; Nombre de jour après lit de semence (>0);
|         profondeur de la graine (m)
+-----+

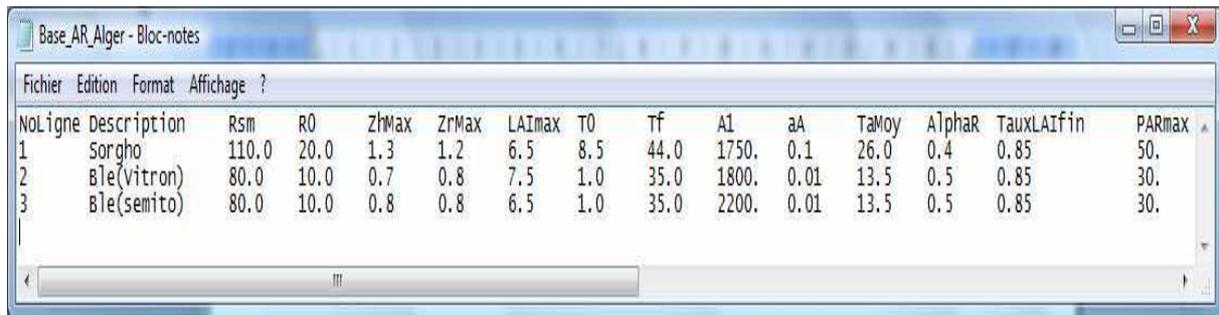
-> Récolte ..... : 2      -6999. -6999.
+-----+
| INFO -> RECOLTE
| -> Pas de récolte = code 0
| -> Récolte fixée = code 1; date; %Lai coupé reste au sol; hauteur du chaume (m)
| -> Récolte automatique = code 2; %Lai coupé reste au sol; hauteur du chaume (m)
+-----+

-> Travail de surface ..... : 0      00 00 0000      -6999.
+-----+
| INFO -> TRAVAIL DE SURFACE
| -> Pas de travail de surface = code 0
| -> travail de surface fixé = code 1; date; profondeur de travail du sol (m)
| -> travail du sol autonome = code 2 (prise des valeurs par défaut)
+-----+

-> Irrigation ..... : 0      01 00 0000      00 00 0000      0.00      0.00
+-----+
| INFO -> IRRIGATION
| -> Pas de d'irrigation = code 0
| -> Irrigations fixées = code 1; Nombre d'irrigation [N];
|         date [1]; Dose [1] (mm)
|         ...
|         date [i]; Dose [i] (mm)
|         ...
|         date [N]; Dose [N] (mm)
| -> Irrigations automatiques = code 2; période de validité [jj mm aaaa jj mm aaaa];
|         Indice de déclenchement, Indice de recharge
+-----+

```

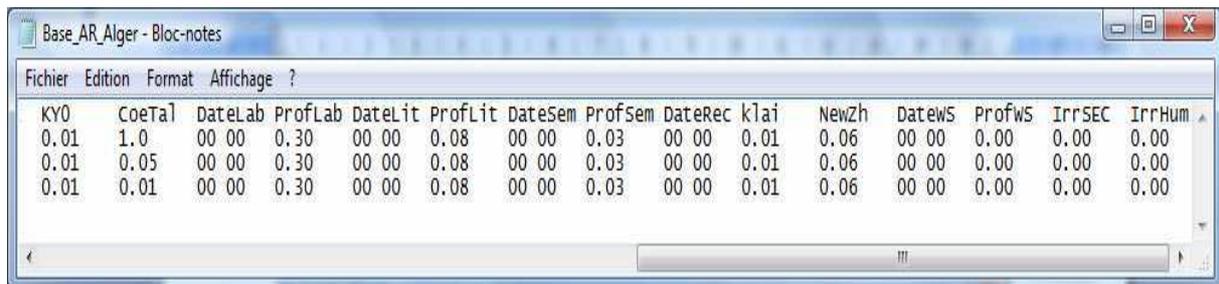
Fichier → Base



Base_AR_Alger - Bloc-notes

Fichier Edition Format Affichage ?

NOLigne	Description	Rsm	R0	ZhMax	ZrMax	LAImax	T0	Tf	A1	aA	TaMoy	AlphaR	TauxLAifin	PARmax
1	Sorgho	110.0	20.0	1.3	1.2	6.5	8.5	44.0	1750.	0.1	26.0	0.4	0.85	50.
2	Ble(vitron)	80.0	10.0	0.7	0.8	7.5	1.0	35.0	1800.	0.01	13.5	0.5	0.85	30.
3	Ble(semite)	80.0	10.0	0.8	0.8	6.5	1.0	35.0	2200.	0.01	13.5	0.5	0.85	30.



Base_AR_Alger - Bloc-notes

Fichier Edition Format Affichage ?

KY0	Coeta1	DateLab	ProfLab	DateLit	ProfLit	DateSem	ProfSem	DateRec	klai	NewZh	DateWS	ProfWS	IrrSEC	IrrHum
0.01	1.0	00 00	0.30	00 00	0.08	00 00	0.03	00 00	0.01	0.06	00 00	0.00	0.00	0.00
0.01	0.05	00 00	0.30	00 00	0.08	00 00	0.03	00 00	0.01	0.06	00 00	0.00	0.00	0.00
0.01	0.01	00 00	0.30	00 00	0.08	00 00	0.03	00 00	0.01	0.06	00 00	0.00	0.00	0.00