



HAL
open science

Mountainous river flood medelling for integrated flood risk management. Application to the Thur river (France)

Nicolas Kreis

► **To cite this version:**

Nicolas Kreis. Mountainous river flood medelling for integrated flood risk management. Application to the Thur river (France). Sciences of the Universe [physics]. ENGREF (AgroParisTech), 2004. English. NNT: . pastel-00001251

HAL Id: pastel-00001251

<https://pastel.hal.science/pastel-00001251v1>

Submitted on 1 Jun 2005

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

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



Conseil Général



Haut-Rhin



N° attribué par la bibliothèque

//_/_/_/_/_/_/_/_/_/

THESE

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'ENGREF

Spécialité : Sciences de l'Eau

Présentée et soutenue publiquement le 24 novembre 2004 par

Nicolas KREIS

à l'Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg

TITRE :

**MODELISATION DES CRUES DES RIVIERES DE MOYENNE
MONTAGNE POUR LA GESTION INTEGREE DU RISQUE
D'INONDATION**

APPLICATION A LA VALLEE DE LA THUR (Haut-Rhin)

Devant le jury suivant :

W. H. GRAF	Professeur, EPFL, Suisse	Rapporteur
J.-P. BRAVARD	Professeur, LRGE, Lyon II	Rapporteur
T. LEVIANDIER	Directeur de la Recherche, ENGEES	Directeur de thèse
G. DEGOUTTE	IGGREF, Représentant de l'ENGREF	Examineur
G. WALTER	Directeur du Pôle Environnement, CG68	Examineur
M. TREMOLIERES	Professeur de l'ULP, Strasbourg	Examineur

Thèse préparée au

Centre d'Ecologie Végétale et d'Hydrologie – ENGEES / Université Louis Pasteur

Remerciements

Cette thèse a été pour moi l'occasion de découvrir le monde de la recherche et après trois années de travail j'estime qu'il n'y a rien de plus exaltant pour moi que le travail en équipe. Je tiens donc à remercier chaleureusement celles et ceux qui ont participé au projet de thèse dont vous pouvez lire aujourd'hui les résultats.

Tout d'abord je tiens à remercier Thierry LEVIANDIER, mon directeur de thèse, pour sa disponibilité, ses compétences et sa grande ouverture d'esprit. Il m'a offert une grande liberté de recherche tout en soulevant des questions clés pour la qualité scientifique du travail.

Je remercie vivement MM. GRAF et BRAVARD de me faire l'honneur d'être rapporteurs de mon travail. Je remercie également Mme TREMOLIERES et MM. DEGOUTTE et WALTER pour leur participation au jury de thèse.

Je n'oublie pas la Banque Hydro et Météo France qui ont contribué à la thèse par le biais de conventions d'échange de données. Je remercie aussi le Conseil Général du Haut-Rhin et le Syndicat Mixte de la Moyenne Thur pour l'acquisition des données topographiques indispensables au travail, ainsi que la reproduction du mémoire de thèse.

Le travail a été beaucoup enrichi par les réflexions du comité de pilotage de thèse, je remercie Michèle TREMOLIERES, Paul PAUGAM, Hervé PIEGAY et Georges WALTER pour leur participation. Je remercie tout particulièrement Flavie CERNESSON qui a participé à la relecture du manuscrit.

Merci à Alice NERON pour son excellent travail de DEA qui a permis de produire des résultats opérationnels intéressants.

Je réserve une place particulière dans mes remerciements à Patrick ARNAUD et Georges WALTER qui m'ont apporté beaucoup de leurs connaissances, chacun dans leur domaine, j'ai beaucoup appris à leur contact.

Merci à mes proches de m'avoir épargné les sempiternelles questions sur l'avancement de la thèse, j'espère que ce travail les honorera.

Enfin, merci du fond du cœur à ma petite femme pour son soutien de tous les instants et pour le gros travail de relecture final. Je te dédie ce mémoire.

Résumé

Les dommages dus aux inondations sont en constante augmentation malgré la réglementation de l'urbanisation. La politique traditionnelle de lutte contre les crues ne donne pas satisfaction, tant du point de vue de la sécurité que des impacts sur les milieux naturels. La gestion du risque d'inondation doit s'inscrire à l'échelle du bassin versant et respecter le fonctionnement naturel des rivières. Il est nécessaire de développer des outils techniques nouveaux pour l'aide à la décision. Nous proposons une méthodologie de modélisation opérationnelle pour la gestion intégrée du risque d'inondation dans le contexte des rivières de moyenne montagne.

La recherche de solutions techniques adaptées à chaque rivière peut s'appuyer sur un diagnostic complet du risque et l'exploration de scénarios de prospective. Pour permettre une approche à grande échelle, nous proposons une méthode de production et de sélection d'événements de référence conservant la même fréquence en tout point du bassin versant. Ces événements sont utilisés en simulation pour produire une cartographie précise de l'aléa en intensité et en fréquence.

Le diagnostic du risque d'inondation permet d'identifier les enjeux à protéger et les hydrosystèmes à réhabiliter. Pour répondre à ces attentes, nous avons testé en prospective une renaturation de la rivière. L'application à la vallée de la Thur (68) et la simulation à l'aide d'une rivière virtuelle montrent que ce type de projet ne permet pas de réduire sensiblement l'aléa pour les rivières à pente forte. La pertinence des événements de référence choisis fait l'objet d'une discussion. Nous avons par ailleurs montré que les endiguements ne constituent pas une protection durable contre les crues. L'étude de scénarios de changement climatique annonce une aggravation des crues à moyen terme. Ainsi, nous intégrons dans la méthodologie l'étude de stratégies de résilience, encore peu explorées en France. La société doit réapprendre à vivre avec les crues pour concilier développement économique et équilibre des milieux naturels.

Abstract

Floods are the major natural risk in France and, in spite of a better control of urbanisation, flood damages become more and more expensive. The traditional flood management fails to protect people from floods and threatens the functionality of alluvial ecosystems. Flood risk management should be projected at a large scale and integrate the natural functionality of rivers. New engineering tools should be developed to build a decision support system. We propose an operational methodology to improve flood risk management applied to mountainous rivers.

In order to find new technical solution for each case study, we set a complete diagnostic of flood risk, then we explore foresight scenarios. Production and selection of reference flood events which keep the same frequency everywhere along the river is presented. These events enable to perform unsteady flow simulations and to draw maps of flood hazard intensity and frequency.

Flood risk diagnostic highlights the needs for protection and the ecosystems which should be restored. A foresight simulation of natural flooding restoration has been tested on the Thur river and on a “virtual” mountainous river. Both simulations show that this kind of project does not improve a better flood mitigation for strong slope rivers. Selection and validity of reference flood events is discussed. We also have shown that embankments are not a sustainable flood management. Climatic change scenarios applied to the Thur river forecast an aggravation of floods for the 21st century. That’s why we propose a new flood management based on resilience strategies. Society should learn to live with floods and to reconcile economical development and functional ecosystems.

Table des matières

RESUME	5
ABSTRACT	7
TABLE DES MATIERES	9
LISTE DES FIGURES	13
LISTE DES TABLEAUX	18
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	19
INTRODUCTION	23
1) ENJEUX, CONTEXTE ET OBJECTIFS DE LA THESE	27
1.1 ENJEUX ET METHODES DE LUTTE CONTRE LES CRUES	27
1.1.1 IMPACT DES INONDATIONS ET EVOLUTION DU RISQUE	27
1.1.1.1 Historique des inondations les plus récentes	27
1.1.1.2 Evolution du risque d'inondation en France	30
1.1.1.3 Indemnisation et protection des riverains	32
1.1.2 LES PLANS DE PREVENTION DES RISQUES	34
1.1.2.1 Réglementation de l'urbanisation	34
1.1.2.2 Information de la population	36
1.1.2.3 Mesures applicables aux constructions existantes	40
1.1.3 MOYENS DE LUTTE CONTRE LES INONDATIONS	41
1.1.3.1 Historique de la lutte contre les inondations	41
1.1.3.2 Ouvrages de protection : digues et murs	44
1.1.3.3 Ouvrages de rétention des crues	48
1.2 GESTION INTEGREE DES CRUES ET PROBLEMATIQUES SCIENTIFIQUES INDUITES	51
1.2.1 PRINCIPES DE LA GESTION INTEGREE ET TEXTES DE LOI	51
1.2.1.1 Loi sur l'eau du 3 janvier 1992	51
1.2.1.2 Directive cadre européenne sur l'eau	53
1.2.1.3 Loi du 30 juillet 2003	55
1.2.2 LES ASPECTS BENEFIQUES DES INONDATIONS	56
1.2.2.1 Dynamique fluviale et laminage des crues	57
1.2.2.2 Dynamique des hydrosystèmes et biodiversité	59
1.2.2.3 Flood-pulse et protection de la ressource en eau	61
1.2.3 LES PROBLEMATIQUES SCIENTIFIQUES INDUITES PAR LA GESTION INTEGREE	63
1.2.3.1 Attribution d'une fréquence à une crue	64
1.2.3.2 Des approches aux échelles variées	67
1.2.3.3 Recherche et validation de solutions techniques	69
1.2.3.4 Modèle générique de rivière	70

1.3	CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET OBJECTIFS DE LA METHODOLOGIE	71
1.3.1	CONTEXTE PARTICULIER DES RIVIERES DE MOYENNE MONTAGNE, EXEMPLE DE LA THUR	71
1.3.1.1	Situation géographique et enjeux de la vallée	71
1.3.1.2	Particularités des rivières de moyenne montagne	73
1.3.1.3	L'aménagement hydraulique de la Thur	76
1.3.2	OBJECTIF N°1 : DEVELOPPER UNE METHODOLOGIE COHERENTE ET OPERATIONNELLE	79
1.3.2.1	Assurer la cohérence de la méthodologie	79
1.3.2.2	Utiliser des outils éprouvés et simples	81
1.3.2.3	Maîtriser les coûts des études	83
1.3.3	OBJECTIF N°2 : PROPOSER UNE AIDE A LA DECISION	86
1.3.3.1	La modélisation comme support pédagogique	86
1.3.3.2	Une approche prospective	87
1.3.3.3	Une modélisation plus souple	89

2) METHODOLOGIE ET MODELES 93

2.1	ARCHITECTURE DE LA METHODOLOGIE	93
2.1.1	OBJECTIFS DE LA MODELISATION	93
2.1.1.1	Approche spatialisée	93
2.1.1.2	Fréquence d'une crue et crues de fréquence rare	96
2.1.1.3	Intégration des scénarios de prospective	99
2.1.2	PROCESSUS ET MODELES ASSOCIES	101
2.1.2.1	La pluie et sa modélisation	101
2.1.2.2	La transformation de la pluie en débit	104
2.1.2.3	Ecoulement en rivière	106
2.1.2.4	Inondations et modèles numériques de terrain	108
2.1.3	ORGANISATION DES MODELES	109
2.1.3.1	Echanges de données entre modèles	110
2.1.3.2	Le chaînage des modèles	112
2.1.3.3	Intégration spatiale des modèles	114
2.2	APPROCHE EVENEMENTIELLE SPATIALISEE DES CRUES	117
2.2.1	CHOIX DU MODELE PLUIE-DEBIT	117
2.2.1.1	Approche événementielle	117
2.2.1.2	Approche spatialisée	119
2.2.1.3	Présentation du modèle GR3	120
2.2.2	LA METHODE SHYPRE	125
2.2.2.1	Principe de fonctionnement de SHYPRE	125
2.2.2.2	Générateur de pluie horaire	127
2.2.2.3	Application à la vallée de la Thur	129
2.2.3	SELECTION DES EVENEMENTS DE REFERENCE	135
2.2.3.1	Variable représentative de la crue	136
2.2.3.2	Méthode de sélection des événements de référence	138
2.2.3.3	Evénements de référence retenus pour la Thur	140

2.3	CARTOGRAPHIE DE L’ALEA A GRANDE ECHELLE	144
2.3.1	CONTRAINTES DE MODELISATION ET CHOIX DU MODELE	144
2.3.1.1	Représentation des écoulements	144
2.3.1.2	Prise en compte des régimes transitoires	146
2.3.1.3	Recherche d’un logiciel simple et efficace	149
2.3.2	ACQUISITION DES DONNEES TOPOGRAPHIQUES	152
2.3.2.1	Besoins en données topographiques	152
2.3.2.2	Choix d’une technique de lever adaptée	156
2.3.2.3	Exploitation des données topographiques	159
2.3.3	MODELISATION DE L’ALEA ET CARTOGRAPHIE	170
2.3.3.1	Hypothèses et simplifications	170
2.3.3.2	Calage et validation du modèle hydraulique	175
2.3.3.3	Simulation hydraulique et cartographie	178
3) DU DIAGNOSTIC INTEGRE A LA PROSPECTIVE		187
3.1	DIAGNOSTIC INTEGRE DU RISQUE D’INONDATION	187
3.1.1	DEFINITION DU RISQUE ET METHODES D’ANALYSE	187
3.1.1.1	Définition du risque	188
3.1.1.2	Méthodes d’analyse du risque	189
3.1.1.3	Concertation des acteurs	192
3.1.2	EVALUATION DU RISQUE A GRANDE ECHELLE	194
3.1.2.1	Approche qualitative	194
3.1.2.2	Approche semi-quantitative	197
3.1.2.3	Approche quantitative	200
3.1.3	DIAGNOSTIC INTEGRE DU RISQUE	202
3.1.3.1	Variabilité spatiale	202
3.1.3.2	Effets de seuil	205
3.1.3.3	Fonctionnalité des zones inondables	208
3.2	RENATURATION DES COURS D’EAU	210
3.2.1	PROSPECTIVE DE RENATURATION DE LA THUR	210
3.2.1.1	Objectifs de la renaturation	210
3.2.1.2	Méthode de simulation prospective	211
3.2.1.3	Résultats de la prospective sur la vallée de la Thur	213
3.2.2	RIVIERE « VIRTUELLE » POUR LA GENERALISATION	215
3.2.2.1	Objectifs d’une approche générique simplifiée	215
3.2.2.2	Principes de construction de la rivière virtuelle	216
3.2.2.3	Généralisation de la prospective de renaturation	219
3.2.3	LIMITES ET PERSPECTIVES	221
3.2.3.1	Fréquence des événements simulés en prospective	221
3.2.3.2	Evolution de l’occupation du sol	224
3.2.3.3	Equilibre géomorphologique de la rivière	226

3.3	VERS UNE PROTECTION DURABLE CONTRE LES CRUES	230
3.3.1	ENDIGUEMENT GENERALISE D'UNE VALLEE	230
3.3.1.1	Objectif des endiguements	230
3.3.1.2	Prospective d'endiguement généralisé	233
3.3.1.3	Les limites des endiguements	235
3.3.2	PROSPECTIVE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE	237
3.3.2.1	Scénarios de changement climatique	238
3.3.2.2	Prospective appliquée à la Thur	240
3.3.2.3	Apports et limites de la prospective	244
3.3.3	UNE NOUVELLE GESTION DU RISQUE : LA RESILIENCE	247
3.3.3.1	Définition et objectifs de la résilience	247
3.3.3.2	Prospective de résilience appliquée à la Thur	250
3.3.3.3	Atouts et limites des stratégies de résilience	252
	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	255
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	259
	ANNEXE 1 : DISTRIBUTIONS DES LAMES SIMULEES POUR DIFFERENTES DUREES	271
	ANNEXE 2 : PROFIL EN LONG - LIGNE D'EAU CENTENNALE	277
	ANNEXE 3 : CARTES DE LA CRUE CENTENNALE	291
	ANNEXE 4 : CARTES DES INONDATIONS DE DIFFERENTES PERIODES DE RETOUR	299
	ANNEXE 5 : CARTES D'ANALYSE QUALITATIVE DU RISQUE	307
	ANNEXE 6 : CARTES D'ANALYSE QUANTITATIVE DU RISQUE	315
	ANNEXE 7 : CALCUL DU COUT MOYEN ANNUEL	323
	ANNEXE 8 : CARTES D'ANALYSE QUALITATIVE APRES CHANGEMENT CLIMATIQUE	333
	ANNEXE 9 : CARTES D'ANALYSE QUALITATIVE APRES AMELIORATION DE LA RESILIENCE	341

Liste des figures

Figure 1 : carte des inondations en Europe, de 1985 à 2002 (<i>source ESPON</i>).....	28
Figure 2 : coût mondial des inondations 85-03 (<i>source Dartmouth Flood Observatory</i>).....	29
Figure 3 : nb. de morts/an dans le monde 85/03 (<i>source Dartmouth Flood Observatory</i>)	30
Figure 4 : nb. de crues/an dans le monde 85/03 (<i>source Dartmouth Flood Observatory</i>).....	31
Figure 5 : carte d'aléa et carte des enjeux, exemple de la ville d'Angoulême	35
Figure 6 : carte de zonage réglementaire, exemple de la ville d'Angoulême.....	36
Figure 7 : exemple de représentation « hydraulique » du risque (<i>source PPRI Paris</i>).....	37
Figure 8 : carte du PPRI de Paris (<i>source PPRI Paris</i>).....	38
Figure 9 : visualisation concrète des hauteurs d'eau (<i>source PPRI Paris</i>)	38
Figure 10 : classes de risque selon Nicolas GENDREAU et al. (<i>Ingénieries EAT</i>)	39
Figure 11 : mesures simples pour diminuer la vulnérabilité (<i>source PPR Val de Marne</i>).....	40
Figure 12 : tracé du nouveau lit mineur par Tulla (<i>source Au Fil du Rhin</i>)	42
Figure 13 : le Rhin naturel à tresses et le Rhin « corrigé » par Tulla (<i>source Rhin Vivant</i>).....	42
Figure 14 : plan des épis sur un tronçon du Rhin corrigé (<i>source Au Fil du Rhin</i>)	43
Figure 15 : trois aménagements de type canalisation (<i>source Au Fil du Rhin</i>)	44
Figure 16 : apparition d'inondations malgré la protection (<i>source Ingénieries EAT</i>).....	45
Figure 17 : hauteur d'eau pour une même crue dépassant le niveau de protection	46
Figure 18 : illustration du laminage des crues (<i>source Conseil Général du Haut-Rhin</i>)	46
Figure 19 : laminage des crues, comparaison d'hydrogrammes.....	47
Figure 20 : schéma du polder d'Erstein et prise d'eau (<i>source Au Fil du Rhin</i>).....	48
Figure 21 : exemple de dispositif de ralentissement dynamique (<i>source Préfecture IdF</i>).....	49
Figure 22 : dynamique fluviale et échanges avec la plaine inondable.....	57
Figure 23 : bases de comparaison pour estimer le laminage d'une crue.....	59
Figure 24 : échanges dans l'hydrosystème pendant une crue.....	60
Figure 25 : concept de flood-pulse (<i>d'après Junk et al. 1989</i>).....	62
Figure 26 : exemple de caractérisation d'un hydrogramme	65
Figure 27 : deux hydrogrammes d'une même crue observée à l'amont et à l'aval.....	66
Figure 28 : exemples de projets d'aménagement (<i>source Room for the Rhine</i>).....	69
Figure 29 : situation géographique du département du Haut-Rhin (68).....	72
Figure 30 : situation géographique de la vallée de la Thur, vue en 3D.....	72
Figure 31 : illustration de l'étroitesse de la vallée à Thann, vue en 3D	74

Figure 32 : répartition de la pluviométrie annuelle (méthode AURELHY Météo France).....	75
Figure 33 : effet de fœhn sur un massif montagneux.....	75
Figure 34 : photos de la crue de février 1990 dans la vallée de la Thur (<i>source L'Alsace</i>)	77
Figure 35 : les aménagements de la Thur (<i>source Conseil Général du Haut-Rhin</i>).....	78
Figure 36 : comparaison des deux niveaux de spatialisation des débits par les modèles.....	81
Figure 37 : les différentes phases d'une crue décrite par un hydrogramme	94
Figure 38 : carte de localisation des stations de mesure	95
Figure 39 : influence de la structure de la pluie sur la fréquence d'une crue	97
Figure 40 : ajustement d'une loi de Gumbel à l'échantillon de crues de Willer/Thur	98
Figure 41 : exemple schématique de courbes IdF (intensité, durée, fréquence).....	102
Figure 42 : inversion d'une loi de probabilité	103
Figure 43 : processus physique de la transformation pluie-débit (<i>source AMBROISE</i>)	105
Figure 44 : délimitation de l'inondation à partir de modèles numériques de surface	109
Figure 45 : schéma des échanges de données entre modèles.....	110
Figure 46 : exemple de MNT de haute résolution en vue ombrée.....	111
Figure 47 : délimitation automatique d'un bassin versant à l'aide d'un MNT raster	112
Figure 48 : schématisation du chaînage des modèles.....	113
Figure 49 : intégration spatiale des différents modèles.....	114
Figure 50 : les sous-bassins versants délimités pour la Thur	114
Figure 51 : géologie de la vallée de la Thur (<i>d'après BRGM</i>)	115
Figure 52 : les deux bassins versants de contrôle pour la Thur	116
Figure 53 : hydrogramme de la crue de 1990 à Willer/Thur	118
Figure 54 : schéma de l'architecture de GR3 (<i>d'après ARNAUD P., 1997</i>)	121
Figure 55 : test de sensibilité à la valeur du paramètre A (<i>par J.-L. Payan</i>).....	122
Figure 56 : test de sensibilité à la valeur du paramètre B (<i>par J.-L. Payan</i>)	123
Figure 57 : test de sensibilité à la valeur du paramètre C (<i>par J.-L. Payan</i>)	123
Figure 58 : test de sensibilité à la valeur de S_0/A (<i>par J.-L. Payan</i>).....	124
Figure 59 : schéma de fonctionnement de la méthode SHYPRE (<i>ARNAUD et LAVABRE, 2001</i>)	126
Figure 60 : stabilité par rapport à l'échantillonnage, bassin du Bevinco (<i>ARNAUD et al., 2001</i>).....	127
Figure 61 : distributions observées et simulées de la pluie maximale en 1 h, 6 h et 24 h.....	129
Figure 62 : carte permettant le calcul de la pluie moyenne annuelle pour les sous bassins	130
Figure 63 : contrôle du calage du modèle par visualisation des événements	131
Figure 64 : distributions observée et simulée pour le Wissbach.....	133
Figure 65 : distributions observées et simulées à Willer/Thur	134
Figure 66 : distributions observées et simulées à Staffelfelden.....	134
Figure 67 : lames ruissellées en 1 heure, 6 heures et 24 heures à Willer/Thur.....	135
Figure 68 : hystérésis d'une crue (<i>CETMEF, 2002</i>)	137
Figure 69 : une crue observée et une crue simulée sur les trois bassins versants	137

Figure 70 : distribution des quantiles pour les cinq classes de bassins versants.....	141
Figure 71 : hyètoigrammes et hydrogrammes des 8 événements de référence.....	143
Figure 72 : fenêtre principale de HEC-RAS.....	149
Figure 73 : schéma du lit mineur et du lit majeur naturels (<i>source WRRC</i>).....	152
Figure 74 : schéma d'un recalibrage du lit mineur (<i>source WRRC</i>).....	153
Figure 75 : exemple d'infrastructures en lit majeur à Willer/Thur (<i>SCAN25 IGN</i>).....	153
Figure 76 : vue en 3D de la vallée de la Thur (MNT IGN 50m).....	154
Figure 77 : carte de l'extension des levers topographiques (<i>SCAN25 IGN</i>).....	154
Figure 78 : deux types de levers topographiques : semis de points et profils en travers.....	155
Figure 79 : principe de la stéréoscopie.....	157
Figure 80 : principe de la mesure laser aéroportée (<i>TOPOSYS</i>).....	158
Figure 81 : mesures laser sous une ligne haute tension et sous la végétation (<i>TOPOSYS</i>).....	158
Figure 82 : MNT avant et après suppression du sur-sol (<i>TOPOSYS</i>).....	160
Figure 83 : MNT généré à partir des points de lever topographique : 1 pixel = 1 point.....	161
Figure 84 : exemple de structure TIN à partir d'un semis de points de géomètre.....	161
Figure 85 : visualisation de MNT raster en dégradé de couleurs et en ombrage.....	162
Figure 86 : MNT original de résolution 1m.....	163
Figure 87 : MNT simplifié de résolution 2m.....	163
Figure 88 : erreur absolue sur l'altitude entre les deux MNT de résolutions différentes.....	163
Figure 89 : comparaison de profils en travers pour deux MNT de résolutions différentes.....	164
Figure 90 : exemple de courbes de niveaux espacées de 20 cm.....	165
Figure 91 : lignes définissant la structure longitudinale du modèle.....	166
Figure 92 : tracé des profils en travers par rapport aux lignes de courant.....	166
Figure 93 : extension maximale des profils en travers pour bien décrire le lit majeur.....	167
Figure 94 : deux profils en travers encadrant un seuil pour bien décrire le profil en long.....	167
Figure 95 : profil en travers placé au plus près et à l'amont d'un pont.....	168
Figure 96 : prise en compte de l'élargissement et du rétrécissement du lit majeur.....	168
Figure 97 : choix des profils en travers dans un cas complexe.....	169
Figure 98 : simplification d'un profil en travers conservant les points caractéristiques.....	169
Figure 99 : hydrogramme et limnigramme, crue « volumineuse » et crue « pointue ».....	171
Figure 100 : courbes de tarage pour les deux types de crues dans des contextes différents.....	171
Figure 101 : photo d'un seuil à cuvette et profil en long correspondant issu de HEC-RAS.....	172
Figure 102 : photo d'un pont et profil en travers correspondant issu de HEC-RAS.....	173
Figure 103 : profil en travers avec points de levées et zone d'écoulement ineffectif.....	174
Figure 104 : comparaison des lignes d'eau en présence ou en absence d'un pont.....	174
Figure 105 : lignes d'eau et routage d'un hydrogramme pour trois rugosités différentes.....	175
Figure 106 : hydrogrammes de crue centennale (T100) et décennale (T10).....	178
Figure 107 : profil en long des lignes d'eau maximales des 8 événements de référence.....	180

Figure 108 : délimitation de l'inondation à partir de modèles numériques de surface	180
Figure 109 : carte du contour brut de la crue centennale	181
Figure 110 : carte des hauteurs d'eau simulées pour la crue centennale.....	181
Figure 111 : contour de la crue centennale corrigé manuellement	182
Figure 112 : cartographie multi-fréquence de l'aléa	182
Figure 113 : définition du risque par la comparaison de l'aléa et de la vulnérabilité	188
Figure 114 : exemple d'analyse du risque par la méthode Inondabilité (<i>source Cemagref</i>)	190
Figure 115 : cartographie de l'occupation du sol dans la vallée de la Thur (<i>source PRATIS</i>)	195
Figure 116 : cartographie du risque à grande échelle	196
Figure 117 : cartographie fine de la vulnérabilité en habitat dispersé	197
Figure 118 : cartographie fine de la vulnérabilité en milieu urbain.....	198
Figure 119 : approche semi-quantitative du risque.....	198
Figure 120 : risque d'inondation localisé à Bitschwiller-lès-Thann et Thann.....	203
Figure 121 : risque diffus dans les communes de Saint-Amarin et Moosch	204
Figure 122 : contraste amont (Oderen) aval (Thann) dans la répartition du risque	205
Figure 123 : profil en long et profil en travers au niveau d'un seuil.....	206
Figure 124 : superficies inondées selon la vulnérabilité et la période de retour.....	207
Figure 125 : illustration de la renaturation par suppression des ouvrages de protection.....	212
Figure 126 : illustration de la renaturation par création de casiers	213
Figure 127 : comparaison du laminage des crues pour les deux options de renaturation	214
Figure 128 : profil en long de la rivière virtuelle de moyenne montagne	217
Figure 129 : profil en travers de la rivière virtuelle de moyenne montagne.....	218
Figure 130 : dimensionnement des digues pour la crue cinquennale	218
Figure 131 : résultats de la prospective de renaturation pour la rivière virtuelle.....	219
Figure 132 : distributions de probabilité du débit de pointe selon l'option d'aménagement	222
Figure 133 : caractéristiques de la rivière virtuelle de plaine.....	222
Figure 134 : impact de la renaturation sur la rivière virtuelle de plaine.....	223
Figure 135 : distributions de probabilité du débit de pointe pour une rivière de plaine.....	223
Figure 136 : impact des boisements sur le laminage des crues (RENATURE).....	225
Figure 137 : efficacité du laminage en fonction de la longueur de rivière renaturée.....	226
Figure 138 : géométrie de la rivière virtuelle après ajustement morphologique	227
Figure 139 : conséquence d'un ajustement morphologique sur le laminage des crues.....	228
Figure 140 : exemple de protection rapprochée et de protection d'une zone urbanisable	232
Figure 141 : variation du CMA des dommages sur la Thur selon l'objectif de protection	232
Figure 142 : exemple de profil en travers avant et après endiguement (crue centennale).....	233
Figure 143 : extension de la crue bicentennale avant et après endiguement	234
Figure 144 : comparaison du laminage obtenu avant et après endiguement	235
Figure 145 : contribution des crues de référence au coût moyen annuel des dommages	237

Figure 146 : distributions de probabilité du débit de pointe pour chaque scénario	241
Figure 147 : comparaison du glissement en fréquence selon le bassin versant considéré	242
Figure 148 : nouvelle carte du risque d'inondation (scénario « 2050 EH ou 2100 EC »).....	243
Figure 149 : carte du risque d'inondation actuel	243
Figure 150 : distributions de probabilité du débit de pointe selon le taux de saturation.....	246
Figure 151 : stratégies de résilience par élévation (<i>source FEMA</i>)	248
Figure 152 : deux stratégies de résilience pour l'urbanisation existante (<i>source FEMA</i>).....	248
Figure 153 : exemple de mise en place de batardeaux (<i>source Prim.net</i>).....	249
Figure 154 : principe d'étanchéité par emballage du mur (<i>source Prim.net</i>).....	249
Figure 155 : carte du risque d'inondation après amélioration de la résilience	251

Liste des tableaux

Tableau 1 : coût indicatif d'acquisition des données hydro-météorologiques.....	84
Tableau 2 : coût indicatif d'acquisition des données topographiques (<i>source CETMEF</i>)	84
Tableau 3 : variables descriptives de la pluie horaire et lois de probabilité associées.....	128
Tableau 4 : pluviométrie moyenne annuelle des différents bassins versants	130
Tableau 5 : performance du modèle au calage pour les trois bassins versants jaugés	131
Tableau 6 : jeux de paramètres retenus pour les trois bassins versants jaugés	132
Tableau 7 : variabilité spatiale de la fréquence du débit de pointe	138
Tableau 8 : paramètres du modèle pluie-débit utilisés pour la Thur.....	140
Tableau 9 : quantiles de débits prédéterminés avec la méthode SHYPRE	141
Tableau 10 : comparaison des techniques de levers destinés à la modélisation hydraulique	159
Tableau 11 : valeurs de coefficient de Manning retenues pour le test de sensibilité	175
Tableau 12 : débits de pointe des crues de 1990 et 1983	176
Tableau 13 : débits de pointe reconstitués des crues de 1983 et 1990.....	177
Tableau 14 : résultats du calage et de la validation pour la vallée de la Thur	177
Tableau 15 : validation des quantiles de débit obtenus par routage hydraulique	179
Tableau 16 : grille d'analyse du risque la plus simple	189
Tableau 17 : grille d'analyse du risque proposée par l'expert.....	193
Tableau 18 : nomenclature de la cartographie PRATIS.....	195
Tableau 19 : recensement des désordres potentiels dus aux inondations	199
Tableau 20 : superficies de prairies et de forêts alluviales inondées	199
Tableau 21 : recensement des dommages et calcul du coût moyen annuel.....	201
Tableau 22 : modifications des précipitations et de l'évapotranspiration selon les scénarios de changement climatique (<i>source KNMI</i>).....	239
Tableau 23 : calcul du coefficient correcteur global, scénario « 2050 EH ou 2100 EC ».....	240
Tableau 24 : glissement en fréquence des événements de référence à Staffelfelden.....	241
Tableau 25 : évaluation quantitative du risque et calcul du coût moyen annuel	244
Tableau 26 : valeurs de taux de saturation initial utilisée pour le test de sensibilité	245
Tableau 27 : nouvelle grille d'analyse du risque	251
Tableau 28 : recensement du nombre d'habitations et des superficies endommagées	252

Liste des sigles et abréviations

1D : monodimensionnel

2D : bidimensionnel

3D : tridimensionnel

Cat'Nat' : Catastrophes Naturelles

CECP : Contrast Enhancing Clustering Process

CEMAGREF : Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement

CETMEF : Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales

CEVH : Centre d'Ecologie Végétale et d'Hydrologie

CG68 : Conseil Général du Haut-Rhin

DDAF : Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt

DIREN : Direction Régionale de l'ENvironnement

ENGEES : Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg

ENGREF : Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts

FRHYMAP : Flood Risk and Hydrological Mapping

HEC-RAS : Hydrological Engineering Center – River Analysis System

IGN : Institut Géographique National

MHR : Modèle Hydrologique Récuratif

MNS : Modèle Numérique de Surface

MNT : Modèle Numérique de Terrain

PPR : Plan de Prévention des Risques

PRATIS : Partenariat Régional pour l'Acquisition et le Traitement d'Images Spatiales

SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux

SHYPRE : Simulation d'Hydrogrammes pour la PREdétermination

SIG : Système d'Information Géographique

TIN : Triangular Irregular Network

ULP : Université Louis Pasteur

USACE : US Army Corps of Engineers

A Stéphanie...

Pendant les longues heures de modélisation derrière mon fidèle ordinateur, il m'est arrivé de rêver à des expérimentations plus concrètes de l'hydraulique dans les couloirs de l'ENGEES !



Extrait de Gaston 15 – Edition Définitive – DUPUIS

Introduction

Le risque d'inondation est le premier risque naturel en France, il touche plus de la moitié des communes et occasionne 1 à 2 milliards d'euros de dommages chaque année. La gestion des risques naturels en France vise la maîtrise des inondations à l'échelle nationale.

L'action prioritaire de l'Etat consiste à stabiliser le risque d'inondation à son niveau actuel en évitant que de nouvelles activités se développent en zone inondable. Les Plans de Préventions des Risques permettent une réglementation stricte de l'urbanisation des lits majeurs des cours d'eau, mais leur mise en place nécessite une bonne connaissance des crues et de l'extension des inondations. L'information du public permet de sensibiliser les riverains au danger potentiel des inondations et ainsi de raviver leur culture du risque. Notre travail porte sur la cartographie des crues en intensité et en fréquence au moyen d'une modélisation à l'échelle du bassin versant, dans le contexte particulier des rivières de moyenne montagne.

La cartographie fine des inondations permet de proposer une analyse du risque d'inondation en terme qualitatif, mais également quantitatif. Nous cherchons à estimer le coût potentiel des dommages dus aux inondations pour la vallée de la Thur, une rivière de moyenne montagne du Haut-Rhin. Le diagnostic du risque doit aider à définir des politiques d'aménagement répondant aux nouveaux enjeux de la gestion de l'eau.

Les aménagements de rivières ont longtemps été entrepris localement sans tenir compte de leur impact à l'aval. La suppression des champs d'expansion des crues par les endiguements a conduit à une aggravation des inondations dans le cours aval des rivières. Pour éviter de reproduire ces erreurs les projets d'aménagement doivent être étudiés à l'échelle du bassin versant. Nous proposons de modéliser différentes stratégies d'aménagement dans le cadre de scénarios de prospective. Nous voulons préciser les potentialités et les contraintes des différentes stratégies de lutte contre les inondations dans le contexte des rivières de moyenne montagne.

Le changement climatique introduit une nouvelle variable dans la recherche d'une gestion durable du risque d'inondation. La prise en compte d'une non stationnarité des conditions climatiques implique une adaptation des stratégies de réduction du risque d'inondation. De même, l'intégration du fonctionnement géomorphologique des rivières a pour objectif une meilleure prise en compte de l'évolution du lit mineur à moyen terme. Nous recherchons une gestion durable du risque d'inondation intégrant les évolutions physiques du bassin versant.

La gestion de l'eau doit également intégrer tous les usages de la ressource, y compris les usages non marchands. Les inondations ont un effet bénéfique reconnu sur la dynamique des hydrosystèmes et sur la ressource en eau. La biodiversité et la fonctionnalité des prairies et des forêts alluviales sont inféodées à des inondations fréquentes. Le fonctionnement naturel des cours d'eau permet la recharge optimale des nappes phréatiques, mais aussi l'autoépuration des eaux de surfaces et des eaux souterraines. Les zones alluviales participent au laminage des crues ce qui permet la réduction du risque d'inondation. La gestion intégrée des crues doit donc tenir compte du fonctionnement naturel des cours d'eau. Nous voulons étudier des projets de renaturation des rivières de moyenne montagne pour mettre en valeur leurs atouts et leurs limites.

Les objectifs de la modélisation des crues sont variés. Tout d'abord, nous voulons développer une méthodologie de modélisation cohérente. Les approches à grande échelle doivent tenir compte de la variabilité spatiale des phénomènes pour produire des résultats satisfaisants aux différentes échelles d'étude. Cette problématique scientifique fait l'objet de développements particuliers. Nous recherchons une modélisation cohérente de l'aléa à l'échelle du bassin versant.

La modélisation doit également être opérationnelle : nous voulons mettre au point une méthodologie simple et au meilleur coût. L'étude de cas doit pouvoir être reproduite dans un contexte géographique similaire par un non spécialiste. Nous voulons utiliser des méthodes d'acquisition de données et de traitement qui réduisent le coût des études.

La modélisation des crues doit aussi pouvoir intégrer les modifications issues de scénarios de prospective. Nous voulons que les modèles constituent un véritable instrument d'aide à la décision pour la gestion intégrée du risque d'inondation.

La présentation de notre travail commence par la mise en évidence des enjeux et des objectifs de la gestion du risque d'inondation (cf. partie 1), puis nous détaillons la méthodologie de modélisation proposée (cf. partie 2). L'étude de cas porte sur un tronçon de 30 km de la Thur. Nous présentons un diagnostic intégré du risque, puis une prospective pour l'aide à la décision (cf. partie 3). Les résultats généraux sont présentés dans le contexte des rivières de moyenne montagne mais nous évoquons également les perspectives de transposition du travail à d'autres contextes géographiques.

Partie 1 :

Enjeux, contexte et objectifs de la thèse

1.1	ENJEUX ET METHODES DE LUTTE CONTRE LES CRUES	27
1.1.1	IMPACT DES INONDATIONS ET EVOLUTION DU RISQUE	27
1.1.2	LES PLANS DE PREVENTION DES RISQUES	34
1.1.3	MOYENS DE LUTTE CONTRE LES INONDATIONS	41
1.2	GESTION INTEGREE DES CRUES ET PROBLEMATIQUES SCIENTIFIQUES INDUITES	51
1.2.1	PRINCIPES DE LA GESTION INTEGREE ET TEXTES DE LOI	51
1.2.2	LES ASPECTS BENEFIQUES DES INONDATIONS	56
1.2.3	LES PROBLEMATIQUES SCIENTIFIQUES INDUITES PAR LA GESTION INTEGREE	63
1.3	CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET OBJECTIFS DE LA METHODOLOGIE	71
1.3.1	CONTEXTE PARTICULIER DES RIVIERES DE MOYENNE MONTAGNE, LA THUR	71
1.3.2	OBJECTIF N°1 : UNE METHODOLOGIE COHERENTE ET OPERATIONNELLE	79
1.3.3	OBJECTIF N°2 : PROPOSER UNE AIDE A LA DECISION	86

1) Enjeux, contexte et objectifs de la thèse

Les inondations représentent un danger pour les biens et les personnes dans la plupart des régions du globe. En Europe et en France, les dommages occasionnés par les débordements des rivières sont de plus en plus lourds à supporter pour l'économie des pays. Dans un premier temps nous voulons mettre en évidence les enjeux de la lutte contre les crues et décrire les moyens de protection existants (cf. chapitre 1.1). Nous présentons ensuite les grands principes de la gestion intégrée des crues et les problématiques scientifiques induites (cf. chapitre 1.2). Enfin, nous précisons le contexte géographique du travail et les objectifs que nous nous sommes fixés (cf. chapitre 1.3).

1.1 Enjeux et méthodes de lutte contre les crues

Nos sociétés ont toujours été confrontées aux inondations, les cours d'eau représentent à la fois une richesse et une menace pour les riverains (BRAVARD et PETIT, 1997). Cette dualité a longtemps été considérée comme globalement bénéfique, mais aujourd'hui il semble que cet équilibre se soit rompu. Nous présentons tout d'abord l'impact des crues sur les populations et les activités humaines à l'échelle mondiale puis nationale (cf. § 1.1.1). Nous évoquons ensuite la réglementation sur les risques en vigueur en France à travers les Plans de Prévention des Risques (cf. § 1.1.2). Enfin, nous proposons une revue critique des méthodes actuelles de lutte contre les crues (cf. § 1.1.3).

1.1.1 Impact des inondations et évolution du risque

Les dernières catastrophes survenues en Europe et en France ont fait l'objet d'une description détaillée du déroulement des événements et des dommages occasionnés (BCEOM, 2000), ce qui permet de mieux comprendre leurs causes. Nous dressons un rapide historique des crues les plus récentes (cf. § 1.1.1.1) et un constat sur l'évolution du risque en France (cf. § 1.1.1.2). Enfin, nous présentons l'originalité et les limites du système français d'indemnisation des victimes (cf. § 1.1.1.3).

1.1.1.1 Historique des inondations les plus récentes

Les inondations sont des phénomènes plus ou moins localisés qui surviennent aléatoirement sur les cours d'eau. Toute l'Europe est touchée par le phénomène (figure 1).

L'étendue géographique des catastrophes peut sembler de plus en plus grande de même que l'ampleur des dégâts occasionnés.

Etendue géographique des inondations

Les crues font partie du fonctionnement naturel d'un cours d'eau, elles peuvent être d'ampleur très variable d'une année à l'autre et elles n'occasionnent pas toujours des débordements et encore moins des catastrophes. Les hautes eaux d'une rivière sont en général dues à des épisodes de pluie plus intenses et plus longs qu'en temps normal, ainsi c'est l'étendue du phénomène météorologique qui explique souvent l'étendue d'une crue. Les crues peuvent être très localisées comme elles peuvent toucher plusieurs pays à la fois.

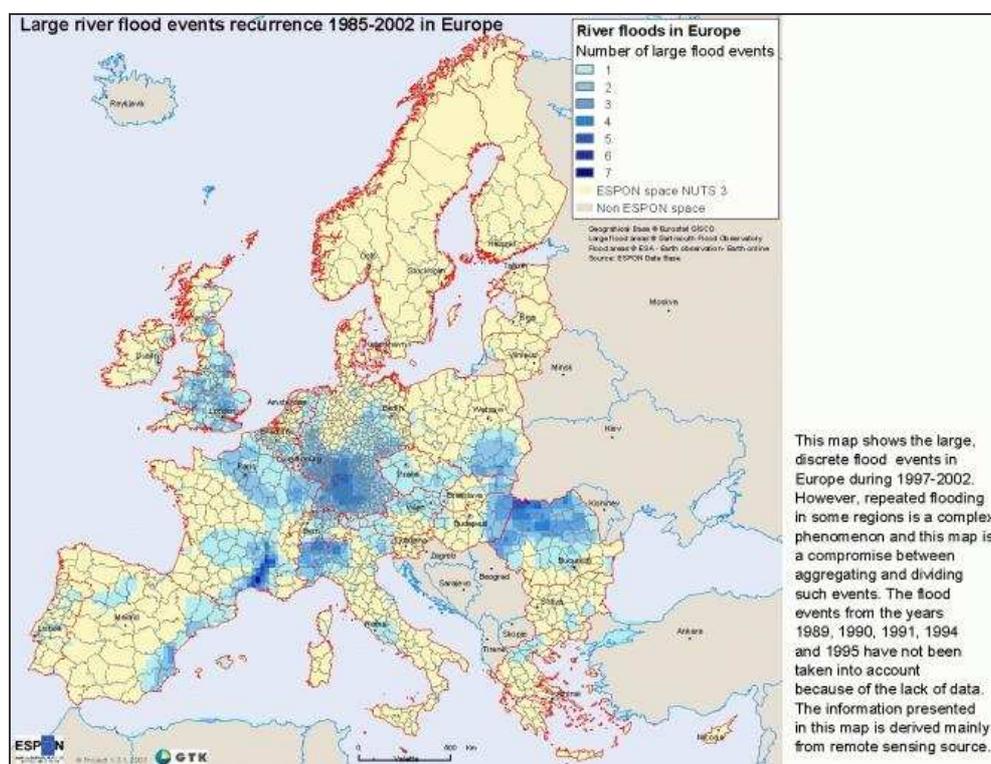


Figure 1 : carte des inondations en Europe, de 1985 à 2002 (source ESPON)

Les inondations survenues en 2002 en Europe de l'Est étaient la conséquence d'une pluviométrie exceptionnelle sur l'ensemble de la région. De même les crues du sud-est de la France en 2001, 2002 et 2003 étaient dues à des épisodes pluvieux intenses et généralisés sur la région.

En France, on estime que plus de 15 700 communes sont exposées au risque d'inondation, c'est le premier risque naturel en métropole, que ce soit du point de vue de son extension géographique ou du point de vue des dommages (DETRAGNE, 2003).

Il est difficile de déterminer si l'étendue des inondations est en augmentation ces dernières années ou bien si c'est la médiatisation des catastrophes qui augmente. Par contre, en terme de dommages aux biens, il est plus facile de mener une investigation rationnelle.

Evolution des dommages et du coût des inondations

Les retours d'expérience en France permettent de chiffrer dans le détail les dommages des crues les plus récentes. Pour l'année 2002 par exemple, les inondations du Gard ont coûté environ 1,2 milliards d'euros, dont 700 millions d'euros sont des coûts assurés (DETRAIGNE, 2003).

Les inondations en Europe de l'Est ont coûté plus de 3 milliards de dollars, mais ce ne sont là que des dommages assurés, or une grande partie des riverains, notamment en Allemagne, n'étaient pas assurés. Au niveau mondial, on recense des coûts plus importants dans la dernière décennie du XX^e siècle (TODINI, 1999), mais on ne peut pas dégager nettement une tendance à la hausse (figure 2).

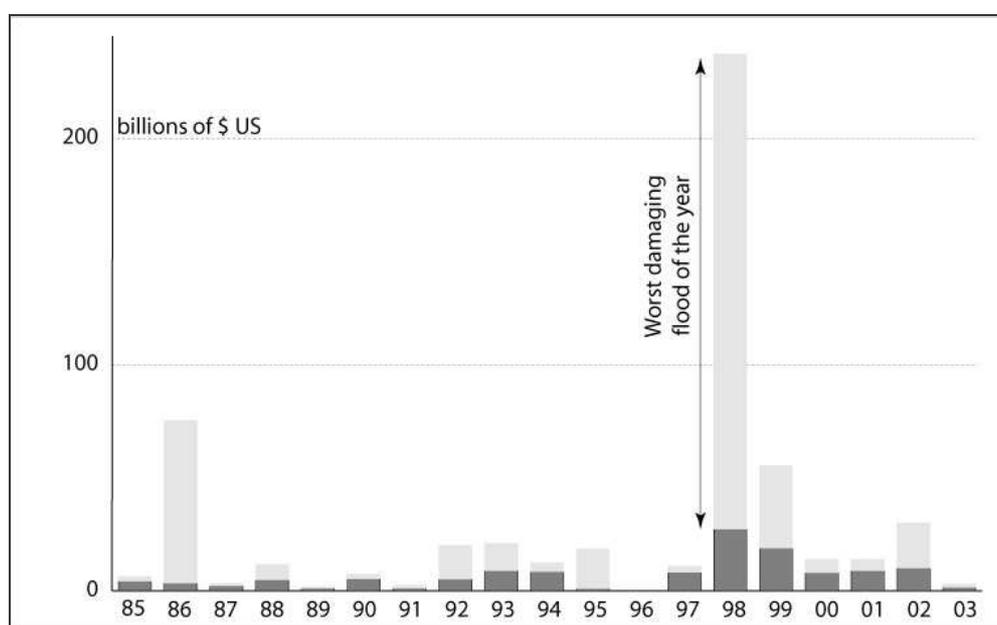


Figure 2 : coût mondial des inondations 85-03 (source Dartmouth Flood Observatory)

Les coûts reportés ci-dessus correspondent approximativement au quart du coût réel des dommages, car une grande partie de ceux-ci n'est pas facile à estimer. Le plus souvent, seuls les dommages indemnisés sont recensés, car les compagnies d'assurance disposent de ces seuls chiffres. Par ailleurs, les impacts indirects des inondations ne sont pas pris en compte ici, or les pertes d'exploitation et le ralentissement de l'économie locale représentent un coût indirect très important. On peut également constater que l'événement le plus fort de l'année représente souvent à lui seul plus de la moitié du coût des dommages. C'est particulièrement exceptionnel en 1998 avec les crues du Yang-Tsé-Kiang, dont on estime les dommages à 210 milliards de dollars.

Les crues représentent aussi un drame humain, puisque chaque année elles tuent des milliers de personnes (figure 3).

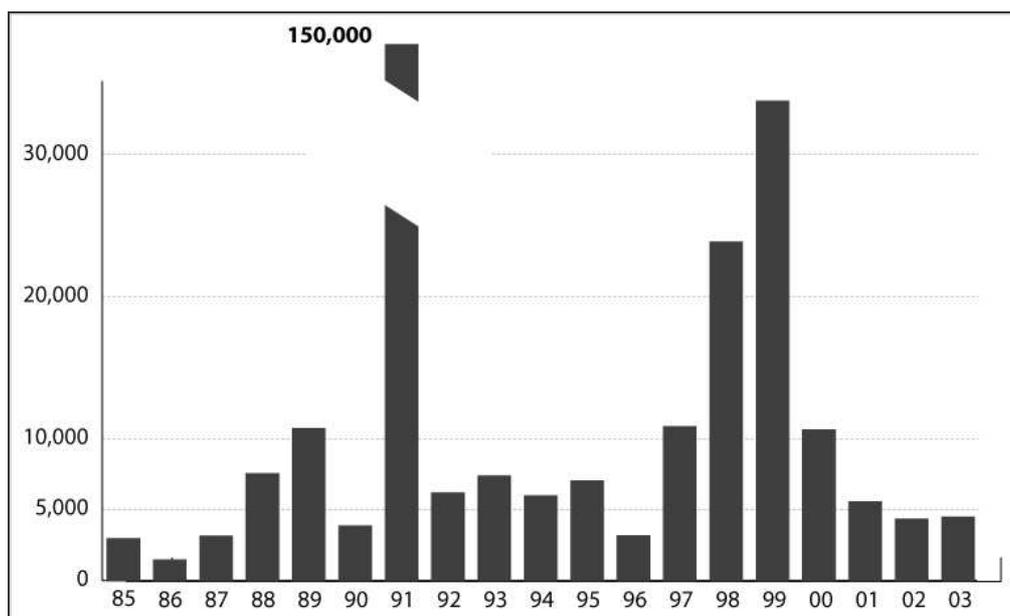


Figure 3 : nb. de morts/an dans le monde 85/03 (source *Dartmouth Flood Observatory*)

Les inondations ont été particulièrement fortes pendant toute la deuxième moitié de la décennie 1990, on constate une nette diminution des dommages et du nombre de victimes depuis le début du XXI^e siècle. Cependant, en France, l'opinion publique a le sentiment inverse, car le pays a été durement touché ces quatre dernières années (Aude, Somme, Bretagne, Gard, Hérault...). Les dommages au niveau national étant en augmentation, les interrogations au sujet d'une aggravation des crues sont récurrentes. Nous proposons donc une courte analyse de l'évolution du risque d'inondation.

1.1.1.2 Evolution du risque d'inondation en France

L'augmentation du nombre d'inondations catastrophiques est souvent considérée comme résultante de facteurs extérieurs au bassin versant touché par les crues. Le changement climatique est de plus en plus souvent montré du doigt. On peut cependant observer d'autres dysfonctionnements de notre société qui ont un impact important sur les inondations.

Changement climatique

Le phénomène mondial de réchauffement de la planète pourrait avoir un impact sensible sur les crues à l'échelle mondiale (GIEC, 2002). On observe dans le monde une hausse du nombre de crues fortes (figure 4).

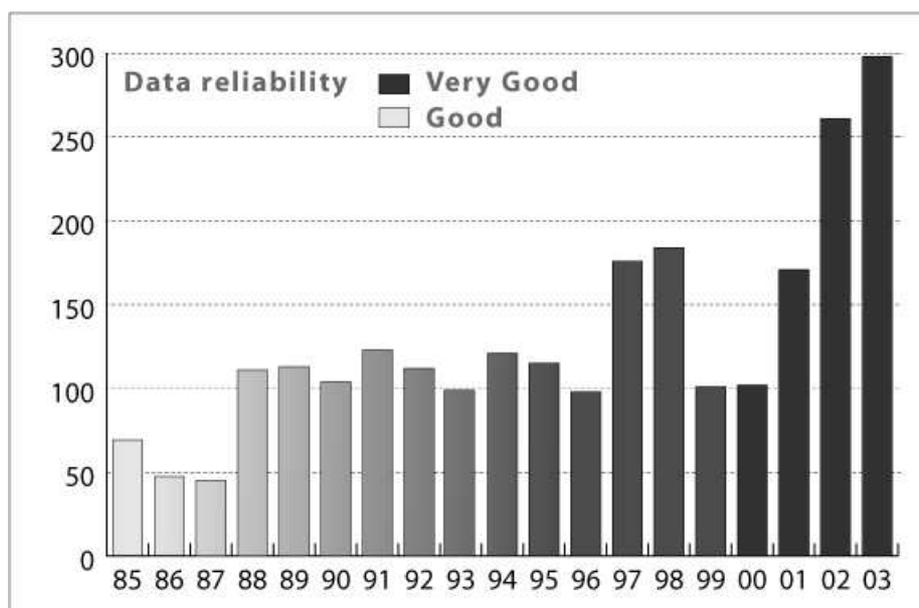


Figure 4 : nb. de crues/an dans le monde 85/03 (source Dartmouth Flood Observatory)

Si le nombre d'inondations augmente incontestablement, on ne peut pas tirer de conclusions hâtives sur l'évolution de l'ampleur des crues. En effet, l'ampleur des inondations n'a pas sensiblement augmenté à l'échelle nationale et encore moins à l'échelle régionale. L'occurrence de plusieurs crues rares ces dernières années dans le sud de la France peut être considérée comme statistiquement normale au regard des observations disponibles (ARNAUD et LAVABRE, 2001b).

La transposition à l'échelle régionale des scénarios de changement climatique est un enjeu important de la recherche en hydrologie. Les estimations des crues rares sont toujours calculées à partir des événements observés en faisant une hypothèse de stationnarité. La remise en cause de la stabilité du climat et l'intégration du changement climatique dans les modèles de prédétermination des crues permettraient de préciser l'aggravation attendue des phénomènes hydro-climatiques.

La météorologie est un facteur important dans la formation des crues, mais l'aménagement du bassin versant peut aussi avoir un impact sur les inondations.

Aggravation des crues par les activités humaines

L'imperméabilisation des sols, le drainage agricole, la disparition des prairies et des haies sont souvent désignés comme un facteur aggravant des crues. Ces pratiques ont effectivement pour effet d'accélérer le transit de l'eau et donc la formation des débits. Le volume d'eau à évacuer est augmenté et la durée de la crue est plus courte, ainsi le débit maximum de la crue est plus fort. Néanmoins cette aggravation est surtout observable sur les crues les plus courantes. En effet, les crues fortes sont en général engendrées par des épisodes pluvieux qui durent plusieurs heures, voire plusieurs jours. Le cumul pluviométrique atteint lors de ces événements est très important en regard des capacités de rétention des sols ou des obstacles à l'écoulement que constituent les haies. Même s'il est difficile de séparer les facteurs d'évolution de la formation des crues, on n'observe pas d'aggravation marquée des inondations les plus fortes à l'échelle du bassin versant (LAVABRE et al., 2002).

L'augmentation des dommages est rarement liée à l'aménagement global du bassin versant, par contre une part importante des dommages peut être attribuée directement à la modification de l'occupation du sol dans les zones inondables des plaines et des vallées.

Vulnérabilité des activités humaines

Les dommages aux biens surviennent lorsque l'occupation du sol en zone inondable n'est pas adaptée aux submersions. C'est la raison pour laquelle les inondations qui surviennent dans des régions peu peuplées ou dont l'urbanisation est particulièrement bien adaptée aux crues occasionnent peu de dommages. Les peuples du sud-est asiatique vivent sur des maisons flottantes ou construites sur pilotis pour s'adapter aux crues annuelles des fleuves (MENZEL et KUNDZEVICZ, 2003).

Dans les pays tempérés le rapport des populations avec les cours d'eau est différent et il a beaucoup changé pendant la deuxième moitié du XX^e siècle. Les activités humaines étaient autrefois implantées à l'abri des inondations, en général sur les points hauts des plaines et des vallées. Certaines activités étaient au contraire développées au plus près des cours d'eau pour profiter de la force hydraulique, du transport fluvial, de l'irrigation ou de tout autre bénéfice naturel qu'offre la rivière. Les crues touchaient parfois sévèrement ces riverains, mais le bénéfice global de leur activité leur permettait de faire face à ces catastrophes périodiques. Ils se protégeaient du mieux qu'ils le pouvaient pour diminuer leur vulnérabilité aux crues les plus fréquentes.

Aujourd'hui le rapport des riverains avec la rivière a beaucoup changé. La rivière est perçue comme un bon moyen d'évacuer l'eau vers l'aval ou de collecter les eaux d'assainissement (SOGREAH, 2004). Les populations apprécient également l'attrait paysager, ainsi que l'espace de loisirs (promenade, pêche, baignade) offert par la rivière. Par ailleurs la pression foncière augmentant, les zones inondables sont plus attrayantes qu'auparavant et les nouveaux quartiers résidentiels mettent à profit les atouts paysagers de ces espaces encore vierges. Les zones inondables sont plates et étendues, elles présentent une topographie idéale pour l'implantation de grands ensembles industriels ou commerciaux, surtout dans les vallées où de tels terrains sont rares. Lorsqu'on examine en détail les dommages dus aux inondations, on constate que la plupart des constructions touchées sont récentes (DAUGE, 1999). Par exemple, le rapport sur la crue de l'Aude en 1999 (BCEOM, 2000) estime le coût total des inondations à plus de 500 millions d'euros. Près de 20% du coût total est dû aux activités économiques implantées en lit majeur dans la vallée du Thoré.

A la lumière des dernières crues observées en France et en Europe, il est prématuré d'attribuer l'augmentation des dommages au changement climatique. La modification des bassins versants ne peut pas non plus être mise en cause pour les crues les plus fortes, sauf dans le cas de petits bassins versants très aménagés. Par contre il est avéré que l'urbanisation des zones inondables a eu un impact direct sur le coût des dommages, ce qui pèse sur le système d'indemnisation des sinistrés.

1.1.1.3 Indemnisation et protection des riverains

Les inondations menacent les biens des riverains, c'est un risque contre lequel ils peuvent souscrire une assurance. Le mécanisme d'indemnisation des biens est très différent

d'un pays à l'autre. La France dispose d'un système original qui est tantôt décrié, tantôt envié. Aujourd'hui la solidarité nationale est mise à mal par les inondations à répétition de certaines communes et les riverains réclament de plus en plus de protection.

L'Etat providence

Lorsqu'un individu souscrit une police d'assurance, la compagnie lui demande de verser une prime annuelle. En général, la prime d'assurance est indexée sur le degré de risque auquel le bien est exposé, c'est par exemple le cas pour les assurances automobiles. Le système français est original, car l'assurance contre les catastrophes naturelles n'est pas indexée sur le risque. Tous les assurés payent une prime catastrophes naturelles (Cat'Nat') dans le cadre de leur assurance habitation. Cette prime alimente un fonds d'indemnisation géré par l'Etat. En cas d'inondation, si l'état de catastrophe naturelle est déclaré, c'est le fonds Cat'Nat' qui indemnise les victimes. Ce système est très solidaire, car il garantit à tout sinistré la pérennité de son assurance, même après plusieurs sinistres. La prime d'assurance n'augmente pas, même en connaissance du risque réellement encouru par l'assuré. Ces dernières années, en raison notamment des tempêtes de décembre 1999 et des crues du sud de la France, le fonds Cat'Nat' a régulièrement dû être alimenté par l'Etat.

Notre système d'indemnisation est décrié parce qu'il ne responsabilise pas suffisamment les personnes qui décident en connaissance de cause de construire dans des zones réputées inondables (TERREAUX, 2002). L'Angleterre a par exemple récemment modifié les règles d'indemnisation, les personnes sont assurées au tarif national tant qu'il n'y a pas eu d'inondation. Dès lors que le bâtiment a été touché par une crue, la prime est indexée sur le risque connu. Cette réforme du mécanisme d'indemnisation permet de responsabiliser ceux qui décident de construire en zone inondable. L'existence d'une prime d'assurance plus élevée à moyen terme diminue l'attractivité des zones inondables, notamment pour les projet industriels ou commerciaux. Le problème corollaire est que certains biens ne sont plus économiquement assurables après la première ou la seconde crue, les habitants doivent alors assumer le risque eux-mêmes ou vendre leur bien (LASUT, 2003). Ces habitations inassurables restent cependant attractives pour les plus défavorisés qui prennent le risque de tout perdre dès la première crue. Aux Etats-Unis le système d'assurance est encore plus libéral puisque la prime d'assurance est indexée dès le départ sur le risque estimé. Cette approche pose alors le problème de l'estimation du risque à grande échelle : les assurances s'appuient sur des cartes de risque disponibles à l'échelle nationale.

Les systèmes anglais et américains permettent de responsabiliser les citoyens. Le système français d'indemnisation des catastrophes naturelles est un exemple de solidarité nationale, cependant il fait peser le poids de certaines décisions individuelles sur les épaules du pays tout entier.

Poids politique des inondations

En France, les victimes des inondations sont en principe indemnisées pour les dommages occasionnés par la crue. Cette indemnisation, considérée comme un dû, ne permet pas d'effacer le traumatisme des populations inondées. Les riverains touchés font pression sur leurs représentants politiques pour obtenir plus de protection (PLATE, 2002). L'Etat n'a pas

pour vocation de protéger des intérêts privés, ni même d'entretenir les cours d'eau non domaniaux, pourtant il est intéressé à la lutte contre les inondations car il alimente en partie le fonds Cat'Nat'. L'Etat ne peut pas se désengager de la gestion du risque d'inondation et la classe politique l'a bien compris. Des parlementaires se sont penchés sur le sujet et ont proposé des pistes d'action à l'échelle nationale (DAUGE, 1999 ; DETRAIGNE, 2003). Ils préconisent en premier lieu la concertation entre les acteurs et l'information sur les risques.

Les dommages dus aux inondations sont en augmentation en France et cela n'est pas imputable au changement climatique ou à l'aménagement des bassins versants. Le développement inconsidéré de l'urbanisation dans les zones inondables a mené à la situation délicate dans laquelle se trouvent de nombreux riverains. Pour l'Etat, le moyen le plus efficace et le plus légitime pour limiter cet accroissement est la réglementation de l'urbanisation des zones inondables.

1.1.2 Les Plans de Prévention des Risques

Le premier objectif des Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles (PPR) est la réglementation de l'urbanisation conformément à la connaissance des crues (cf. § 1.1.2.1) mais ils ont aussi vocation à informer le public (cf. § 1.1.2.2). Les PPR peuvent également donner des prescriptions pour améliorer la sécurité des constructions existantes implantées en zone inondable (cf. § 1.1.2.3).

1.1.2.1 Réglementation de l'urbanisation

La pression foncière croissante dans les plaines et les basses vallées a eu pour effet d'augmenter fortement les enjeux implantés en zones inondables. La loi Barnier (RF, 1995) a introduit les plans de prévention des risques. Ils ne sont pas limités au risque d'inondation, mais celui-ci étant le premier risque naturel en France, la plus grande partie des PPR sont des PPR Inondations (PPRI). Les PPR sont prescrits par le préfet et ils doivent être approuvés dans les cinq ans qui suivent la prescription, sur proposition d'un service de l'Etat et après une enquête publique. La première fonction d'un PPR est de délimiter les zones à risque.

Cartographie de l'aléa et des enjeux

La réglementation du PPR est fondée sur la confrontation d'une carte des inondations (carte d'aléa) et d'une carte de la vulnérabilité de l'occupation du sol (carte des enjeux) (figure 5).

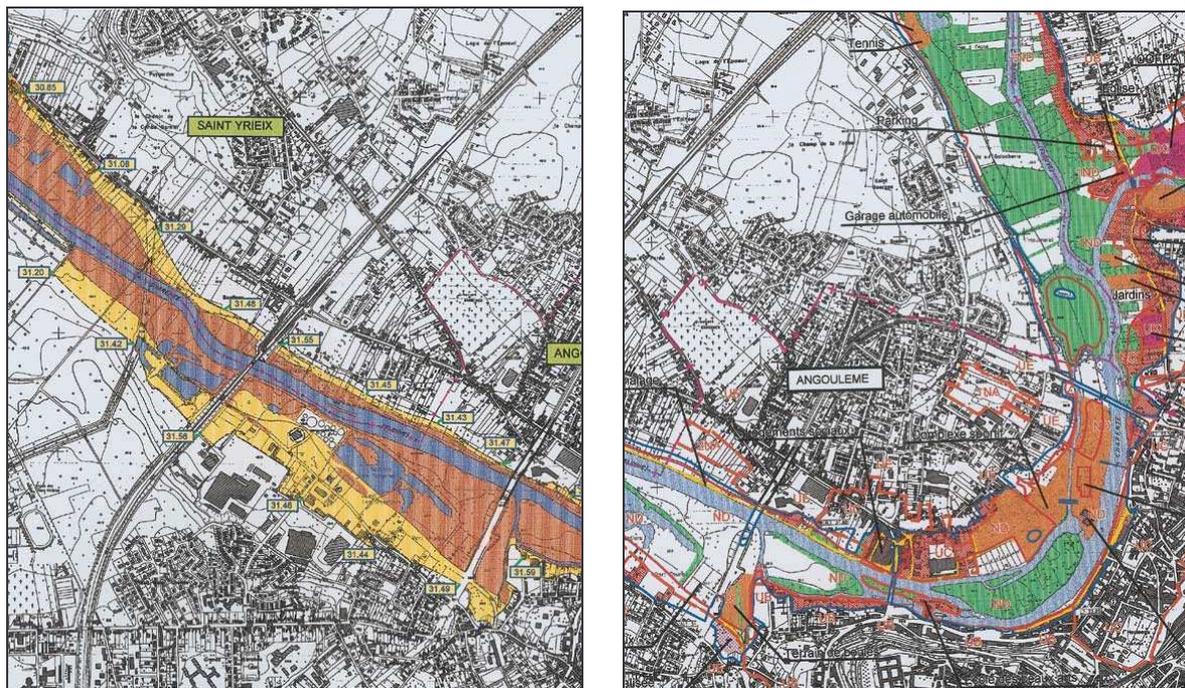


Figure 5 : carte d'aléa et carte des enjeux, exemple de la ville d'Angoulême

La carte d'aléa décrit l'inondation d'une crue forte. En principe, le chargé d'étude doit reporter l'extension de la crue la plus forte observée (plus hautes eaux connues) si elle est de période de retour supérieure ou égale à cent ans. Sinon il doit estimer l'enveloppe de la crue centennale (MATE, 2002). Il est assez rare que l'on puisse utiliser une crue observée pour délimiter cette inondation de référence, mais si c'est le cas, l'exploitation de photographies aériennes et d'images satellites permet une bonne cartographie de l'aléa (RACLLOT, 2003 ; ROBIN, 2000 ; JAEHN, 1997). Ce cas de figure est assez rare, non seulement du fait de la fréquence retenue, mais aussi parce qu'on ne peut exploiter que des crues récentes, car les aménagements hydrauliques modifient l'extension des crues. Le plus souvent on doit donc recourir à une modélisation informatique de la crue de référence dont la qualité est primordiale pour la mise en place du PPR. La cartographie précise de l'aléa est l'un des objectifs de notre travail.

La carte des enjeux décrit les différents types de biens qui sont menacés par la crue de référence. Ainsi on peut distinguer les lieux publics, les industries, les commerces, les maisons individuelles, les immeubles... L'inondation aura en effet un impact différent selon l'enjeu auquel on s'intéresse. La description de la vulnérabilité doit parfois aller au-delà et considérer les détails des constructions, comme la hauteur du premier plancher habitable ou la présence de sous-sols. Une méthode d'estimation à grande échelle de la vulnérabilité est proposée dans notre travail.

Zonage réglementaire

La carte réglementaire permet d'indiquer pour chaque combinaison d'aléa et d'enjeu les nouvelles règles d'urbanisation.

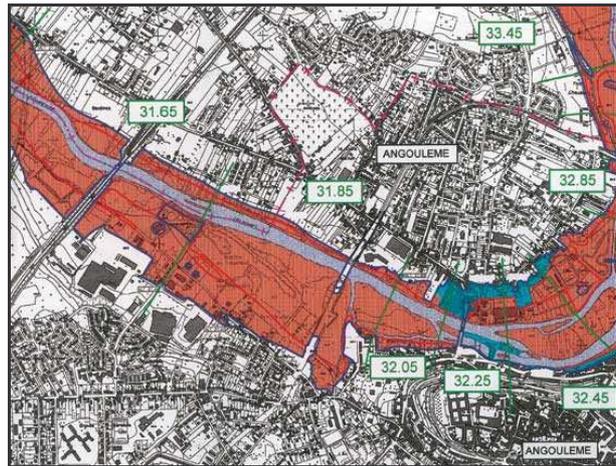


Figure 6 : carte de zonage réglementaire, exemple de la ville d'Angoulême

Les zones soumises à un aléa fort sont déclarées inconstructibles (zone rouge, figure 6). Cette décision s'impose au Plan Local d'Urbanisme, qui doit être modifié si la zone était auparavant constructible. Il existe également des zones bleues ou jaunes pour lesquelles la réglementation est en général moins stricte, il s'agit notamment des zones soumises à remontée de nappe ou à un risque de rupture de digue.

La qualité d'un PPRI dépend en grande partie de la qualité de la cartographie de l'aléa. La modélisation des crues est donc un enjeu important pour que la réglementation soit efficace à long terme. Nous proposons une méthodologie de modélisation des crues ayant pour objectif une cartographie détaillée de l'aléa pouvant entre autre servir de base à l'élaboration d'un PPRI.

1.1.2.2 Information de la population

L'Etat a un devoir d'information des citoyens sur le risque (DETRAIGNE, 2003), il doit porter à la connaissance des habitants les informations issues des observations ou des simulations. La communication des informations au public doit faire l'objet d'une réflexion approfondie car l'hydrologie statistique est assez difficile à comprendre pour les non initiés.

Culture du risque

Le PPR doit permettre de communiquer la *culture du risque* (on parle aussi parfois de *mémoire du risque* ou *conscience du risque*) aux riverains, ils doivent prendre conscience de la dangerosité de la rivière (GIVONE, 1998). En effet, la plupart des communes ne sont que rarement touchées par les crues. La rivière qui déborde naturellement plusieurs fois par décennie a été progressivement aménagée pour éviter les désagréments des inondations les plus fréquentes. Par contre, les inondations les plus fortes, de période de retour supérieure à 20 ou 50 ans, peuvent toucher les populations. Les habitants qui autrefois étaient familiarisés avec les inondations sont aujourd'hui désarmés face à une crue qui ne survient plus que quelques fois par siècle.

Un des exemples les plus marquants est la situation de la ville de Paris. La dernière inondation marquante date de 1910. On a attribué une période de retour de 100 ans à cet événement catastrophique qui avait occasionné des dommages colossaux. En presque un siècle, les habitants ont totalement oublié l'existence de ces inondations. Ainsi, une grande campagne d'information a été lancée suite à l'approbation du PPRI le 15 juillet 2003. On peut représenter le risque de plusieurs manières, la difficulté étant de choisir celle qui parle le mieux aux habitants. On peut par exemple adopter le point de vue de l'hydraulicien (figure 7).

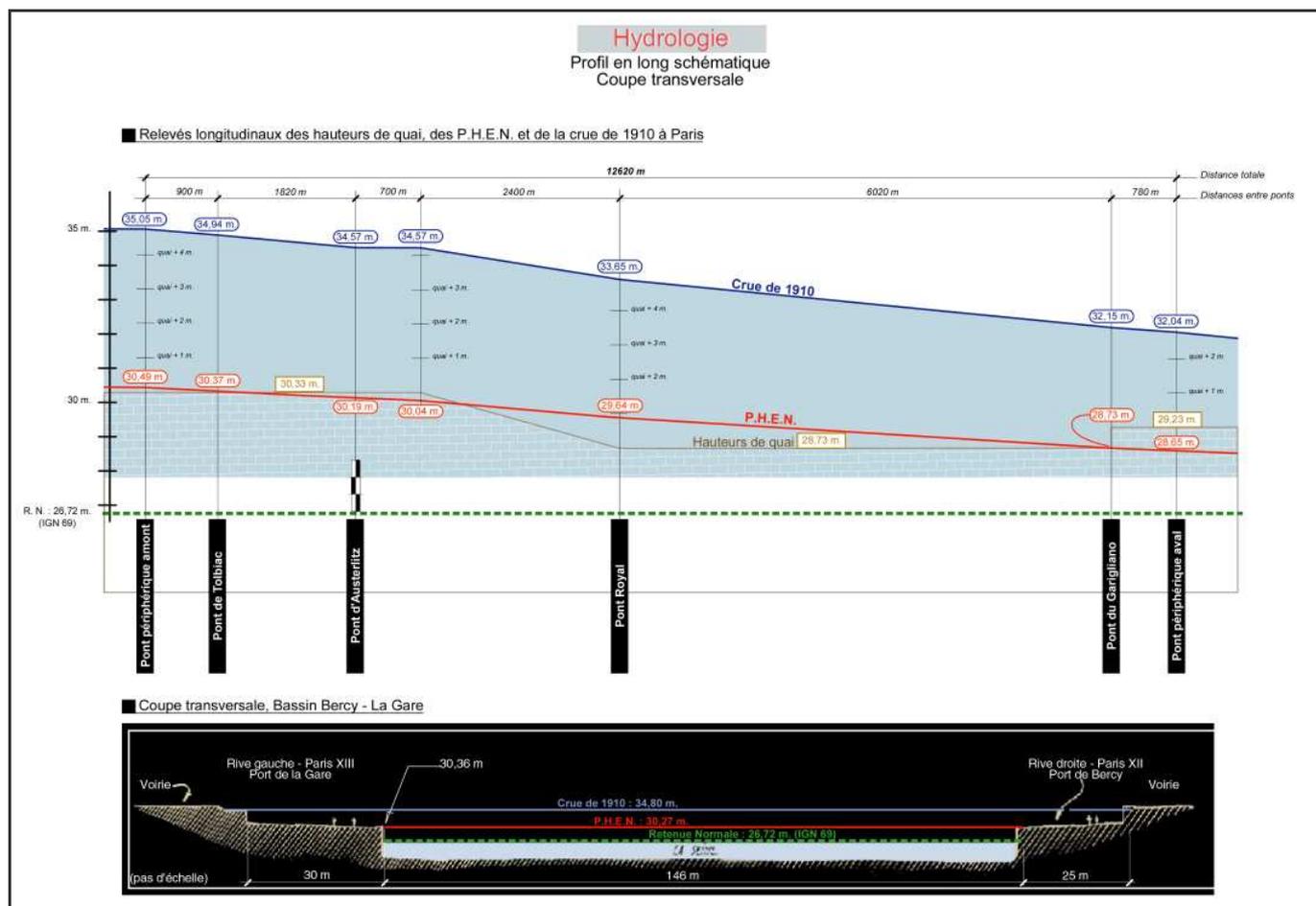


Figure 7 : exemple de représentation « hydraulique » du risque (source PPRI Paris)

Le profil en long et un profil en travers de la ligne d'eau de la crue de 1910, ainsi que l'affichage des cotes et des profils de référence est un outil précieux pour l'ingénieur, mais le public a des difficultés à interpréter ces images et surtout à se représenter la crue dans l'espace. Ainsi, la carte est sans doute le moyen le plus utilisé pour représenter l'extension de la crue (figure 8). Cette carte détaillée de la ville de Paris permet à n'importe quel citoyen de repérer les zones inondables pour une crue comparable à celle de 1910. Cette carte renvoie également au règlement du PPRI en vigueur.

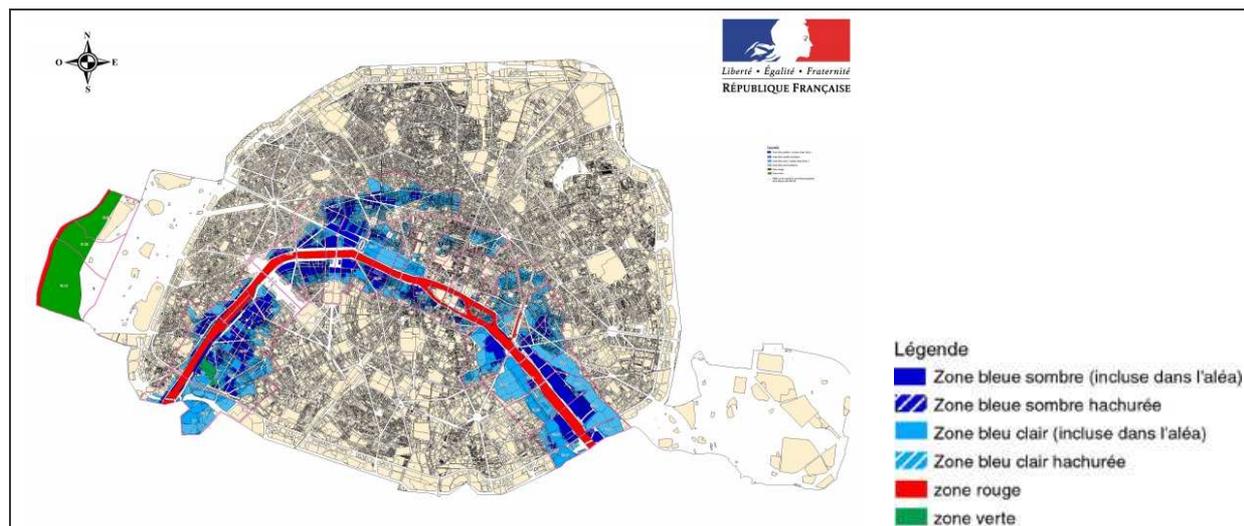


Figure 8 : carte du PPRI de Paris (source PPRI Paris)

La carte est incontestablement le meilleur moyen de situer le risque (GIVONE, 1998), cependant elle ne permet pas toujours de faire prendre conscience du réel danger de la crue. Pour cela on peut dessiner des cartes de hauteur d'eau et de vitesse d'écoulement, cependant il n'est pas toujours aisé de se représenter le danger sur la base de chiffres. Une solution intéressante est d'utiliser des points de repère bien connus de tous les citoyens, afin qu'ils puissent facilement se représenter l'ampleur de l'inondation. Dans le cas de la ville de Paris, il a par exemple été choisi de se servir du fameux zouave du pont de l'Alma (figure 9).

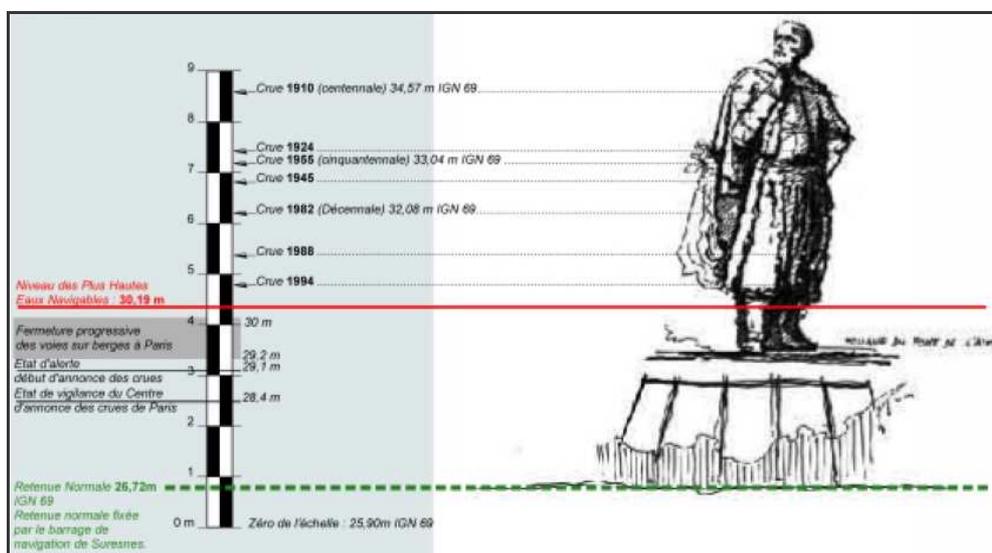


Figure 9 : visualisation concrète des hauteurs d'eau (source PPRI Paris)

On peut également matérialiser les crues les plus fortes en apposant des repères de plus hautes eaux connues bien en évidence sur des monuments ou des ouvrages publics. Cette mesure est préconisée dans la loi du 30 juillet 2003 (RF, 2003).

La transmission et l'entretien de la culture du risque est un défi pour les hydrologues et les hydrauliciens qui doivent réfléchir à la communication des résultats de leurs études pour qu'ils soient assimilables par le plus grand nombre de nos concitoyens. Au-delà de la difficulté de se représenter le danger d'une crue, il est difficile d'explicitier l'approche probabiliste utilisée par les hydrologues.

Crues et probabilités

Le terme le plus connu du grand public est sans doute le mot « centennale ». Les gens ont parfois entendu parler de la crue centennale de 1910 à Paris, par exemple, et c'est souvent ce qui les induit en erreur. En effet ils imaginent que les crues sont périodiques et donc qu'une crue centennale revient précisément tous les 100 ans. Dans le cas de la capitale, cette interprétation est salvatrice puisque beaucoup de gens sont sensibilisés car 2010 approche. Il est assez difficile de faire comprendre qu'une crue centennale a 1 chance sur 100 de se produire chaque année et qu'il est donc possible d'observer plusieurs crues centennales dans un même siècle. De même il est possible de n'observer aucune crue centennale en 100 ans. Les crues surviennent de façon aléatoire, c'est la raison pour laquelle on ne peut pas prévoir quelle sera l'intensité de la crue suivante, ni même dire avec certitude si on observera une crue exceptionnelle au cours des 10 prochaines années. On peut par contre estimer la probabilité d'observer une crue rare dans un laps de temps donné.

Des chercheurs du CEMAGREF (Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement) proposent une nouvelle approche permettant de caractériser le risque en cinq classes (GENDREAU et al., 2003). On considère qu'une personne est susceptible de connaître un événement si elle a 50 % de chance de connaître l'événement sur une durée donnée. On caractérise les crues par leur débit de pointe, T est la période de retour (figure 10).

- Classe 1 : $1 \text{ an} \leq T \leq 7 \text{ ans}$.
Il y a de fortes « chances » pour qu'une crue de cette classe ait **prochainement** lieu. Ces crues sont fréquentes, d'intensité faible et peuvent être à l'origine de **désagréments**.
- Classe 2 : $7 \text{ ans} < T \leq 29 \text{ ans}$
Au cours des **5 prochaines années**, il y a 1 chance sur 2 (50 %) pour qu'une crue de cette classe ou d'une classe supérieure ait lieu. Ces crues sont peu fréquentes, d'intensité modérée et peuvent être à l'origine de **perturbations**.
- Classe 3 : $29 \text{ ans} < T \leq 72 \text{ ans}$
Au cours des **20 prochaines années**, il y a 1 chance sur 2 pour qu'une crue de cette classe ou d'une classe supérieure ait lieu. Ces crues sont rares, d'intensité importante et peuvent être à l'origine de **sinistres**.
- Classe 4 : $72 \text{ ans} < T \leq 144 \text{ ans}$
Au cours des **50 prochaines années**, il y a 1 chance sur 2 pour qu'une crue de cette classe ou d'une classe supérieure ait lieu. Ces crues sont très rares, d'intensité considérable et peuvent être à l'origine de **catastrophes**.
- Classe 5 : $144 \text{ ans} < T$
Au cours des **100 prochaines années**, il y a 1 chance sur 2 pour qu'une crue de cette classe ait lieu. Ces crues sont exceptionnelles, d'intensité immense et peuvent être à l'origine de **grandes catastrophes**.

Figure 10 : classes de risque selon Nicolas GENDREAU et al. (Ingénieries EAT)

Cette nouvelle description du risque permet de mettre en relation la probabilité d'occurrence d'une crue, son intensité et les dommages qu'elle est susceptible d'occasionner. En terme de besoin de protection, on peut dire que les événements de la première classe ne doivent pas en principe inquiéter les riverains, sauf si l'espace a été utilisé de façon

inconsidérée. Les événements de la dernière classe sont extrêmement violents, il est *a priori* inconcevable de s'en protéger, on ne peut qu'essayer d'atténuer leur impact. Pour les événements de classe intermédiaire, l'opportunité d'une protection doit être discutée.

Il n'est pas sûr que cette nouvelle approche facilite l'appropriation des notions probabilistes par le grand public, mais elle a le mérite de proposer un nouvel angle d'approche et d'associer probabilité d'occurrence et probabilité de dommages. On observe également que la crue centennale fait partie de la classe 5, les constructions qui sont présentes dans l'enveloppe de la crue centennale sont donc dans une situation délicate.

La mise en place d'un PPR est utile pour planifier l'urbanisation future, mais elle confronte également les décideurs au problème des zones à risque existantes.

1.1.2.3 Mesures applicables aux constructions existantes

Le développement économique des plaines et des vallées a fait augmenter la pression foncière sur les zones réputées inondables. Les constructions ont peu à peu investi les lits majeurs des cours d'eau et à chaque nouvelle crue importante on recense de nouvelles zones à risque. Le PPR permet d'avertir du danger et de prendre des mesures immédiates pour éviter les catastrophes.

Le PPR peut proposer des mesures portant sur l'aménagement, l'utilisation ou l'exploitation des bâtiments existants. Ces dispositions ont pour objectif premier de protéger la vie des personnes. Cependant, les occupants des zones concernées doivent conserver la possibilité de mener une vie ou des activités normales si elles sont compatibles avec les objectifs de sécurité recherchés (MATE, 2002). C'est pour cette raison qu'il est souvent difficile de rendre obligatoires les mesures de protection.

Lorsque la situation est très grave, c'est à dire lorsque certains habitants sont en danger de mort, les mesures peuvent être rendues obligatoires dans un délai maximal de 5 ans, avec exécution d'office par l'Etat si elles n'ont pas été mises en œuvre dans les temps. Dans les faits il est assez rare d'en arriver à ce type de procédure. Les mesures préconisées sont en général de garantir un niveau refuge au-dessus des plus hautes eaux de la crue de référence, de choisir des matériaux peu sensibles à l'eau, de surélever les équipements électriques, de stocker les produits polluants hors de l'eau... On peut également penser à faciliter l'évacuation de l'eau après la crue en prévoyant des dispositifs de vidange (figure 11).

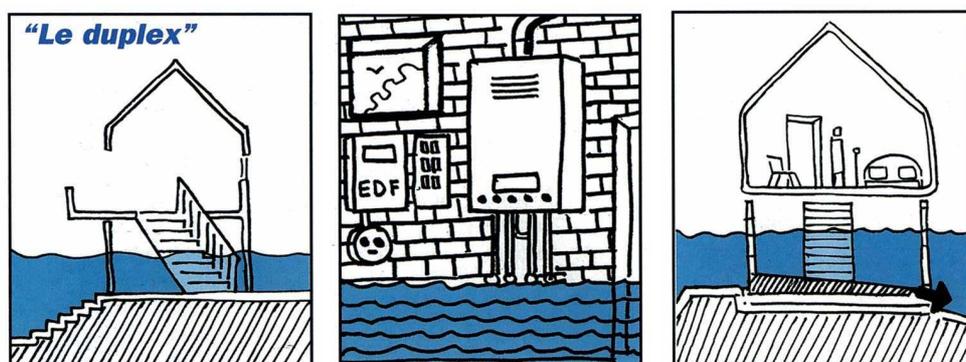


Figure 11 : mesures simples pour diminuer la vulnérabilité (source PPR Val de Marne)

L'Etat peut subventionner à hauteur de 50 % les travaux de réduction de la vulnérabilité, ce qui peut inciter les particuliers à mettre en œuvre les recommandations du PPR. Lorsque le danger est vraiment important et si le coût des travaux de protection excède la valeur des biens menacés, la Loi Barnier prévoit une procédure d'expropriation (RF, 1995). On peut par exemple citer le cas des ruines de Séchiliennes, il s'agit d'un risque d'éboulement sur un hameau qu'il est quasiment impossible de prévoir. L'Etat ne pouvant assurer la sécurité des personnes à un coût économiquement acceptable, c'est l'expropriation qui a été retenue. Ce type de procédure intervient dans des cas extrêmes, car une telle décision représente un traumatisme immense pour les habitants.

Le PPRI est un moyen efficace pour enrayer l'augmentation des dommages dus aux inondations et faire prendre conscience du risque d'inondation aux riverains. La rédaction et la mise en place du PPR interpellent les riverains et les élus, ils expriment en général un besoin de protection plus grand qu'auparavant. Même si l'Etat n'a pas vocation à protéger des biens privés, la pression politique des élus mène souvent à des projets de lutte contre les inondations.

1.1.3 Moyens de lutte contre les inondations

La lutte contre les inondations n'est pas une préoccupation nouvelle, les rivières ont depuis longtemps fait l'objet de travaux visant à brider leurs débordements afin de ménager les activités humaines (BRAVARD, 2000). Toutefois, les progrès techniques de la fin du XX^e siècle ont permis d'imposer plus fermement qu'auparavant de nouvelles lois aux cours d'eau. Nous proposons tout d'abord un bref historique de l'aménagement des rivières permettant de mieux comprendre la situation actuelle (cf. § 1.1.3.1). Nous rappelons ensuite le principe de fonctionnement et les limites des ouvrages de protection classiques que sont les digues et les murs de rive (cf. § 1.1.3.2). Nous présentons également les ouvrages de rétention à travers leur fonctionnement et leur mise en œuvre (cf. § 1.1.3.3).

1.1.3.1 Historique de la lutte contre les inondations

Pour illustrer notre propos, nous prendrons l'exemple du Rhin en Alsace qui a subi toute une succession d'aménagements afin de protéger la plaine d'Alsace des crues, de le rendre navigable et de produire de l'énergie. La logique d'aménagement a été développée jusqu'à son terme en moins d'un siècle.

Historiquement le cours français du Rhin, entre Bâle et Lauterbourg, est une rivière à tresse (SCHMITT, 2001), c'est-à-dire que le fleuve présente de nombreux bras qui s'entrecroisent (figure 13). Le transport solide est très important, les bras changent souvent de place effaçant et formant sans cesse de nouvelles îles. Par exemple, en 1926, après une forte crue, la ville de Vieux-Brisach qui se trouvait en rive gauche du fleuve se retrouve en rive droite.

Les crues se produisent à la fonte des neiges dans la partie alpine, du bassin versant, en général au printemps, voire au début de l'été. Les crues les plus fortes peuvent causer des

dégâts très importants à toute la plaine d'Alsace entre le Rhin et la rivière Ill. Par exemple, en juin 1480, la ville de Strasbourg est inondée, ainsi que toute la plaine à 30 km à la ronde, cette crue eu pour conséquence épidémies et famines. Lassés des débordements du fleuve, les riverains entreprennent des aménagements de grande ampleur dès le XVIII^e siècle.

Correction du Rhin de 1842 à 1876

C'est l'ingénieur badois Tulla qui conçoit et suit la réalisation du grand projet de correction du fleuve (figure 12 et figure 13). Le nouveau lit mineur du Rhin devient ainsi un large chenal rectiligne qui dans un premier temps a facilité la navigation et permis le développement des villages riverains.

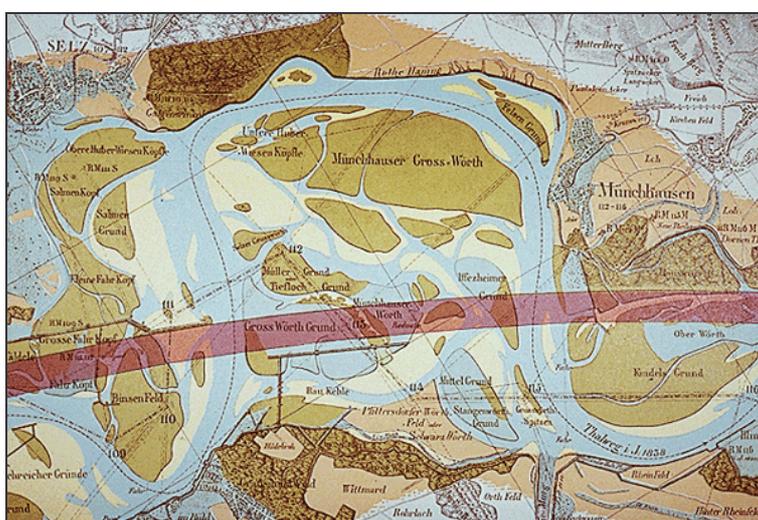


Figure 12 : tracé du nouveau lit mineur par Tulla (www.aufildurhin.com)

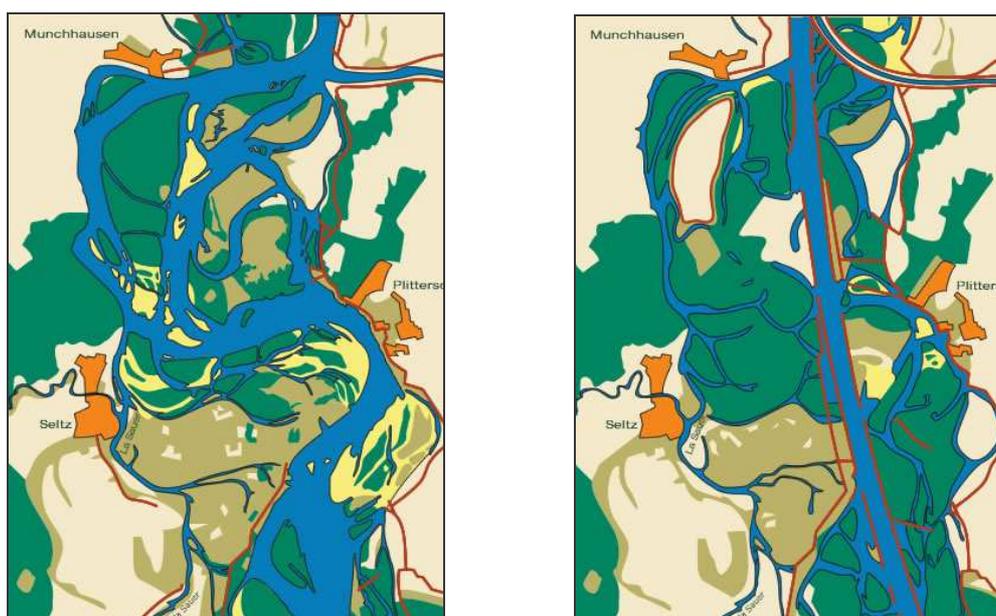


Figure 13 : le Rhin naturel à tresses et le Rhin « corrigé » par Tulla (source *Rhin Vivant*)

On remarque que la rectification du Rhin a pour effet de couper les tresses, cela se traduit par un raccourcissement de l'ordre de 30 % de la longueur totale du cours du fleuve. La dénivelée restant constante, la pente moyenne du fleuve a augmenté de même que la vitesse du courant. Ces nouvelles conditions d'écoulement ont très rapidement déclenché une érosion importante du lit du fleuve. L'incision a atteint plusieurs mètres par endroits, ce qui a fini par dégager la barre rocheuse d'Istein. L'accès au port de Bâle est alors impossible une grande partie de l'année. Ce type d'érosion régressive est très bien connu aujourd'hui, il se produit systématiquement dès lors qu'on modifie la pente d'un cours d'eau. En général, sur une rivière non navigable, on stoppe cette érosion en construisant un ou plusieurs seuils sur la rivière. Sur le Rhin, on adopte une stratégie similaire à celle entreprise sur le Rhône par l'ingénieur français Girardon : la régularisation.

Régularisation du Rhin de 1907 à 1956

La régularisation du fleuve a consisté en la construction d'épis transversaux pour limiter l'érosion en recréant un chenal navigable plus étroit avec une hauteur d'eau plus importante (figure 14). Ces aménagements ont permis de ralentir l'érosion régressive de façon significative.

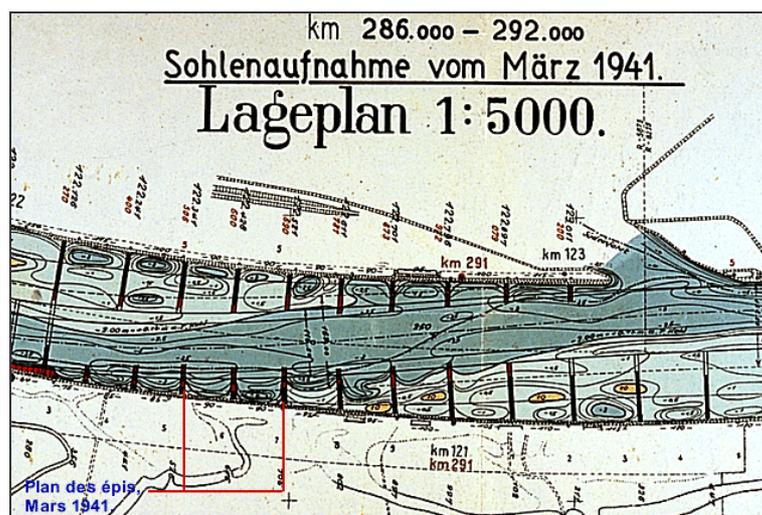


Figure 14 : plan des épis sur un tronçon du Rhin corrigé (www.aufildurhin.com)

Parallèlement à ces travaux de régularisation, l'ingénieur alsacien Koechlin développe un projet de grand canal pour la navigation et la production d'électricité.

Canalisation du Rhin de 1925 à 1980

Le projet est présenté dès 1902, mais il n'est entamé qu'après la première guerre mondiale. Il prévoit huit chutes qui doivent permettre de produire de l'électricité au profit de l'Alsace, de stopper définitivement l'érosion du fleuve et d'améliorer encore la protection contre les crues. Finalement, quatre chutes seront réalisées, les autres ouvrages étant par la suite aménagés en feston ou en ligne (figure 15) pour permettre à l'Allemagne l'accès industriel au fleuve et pour améliorer l'alimentation de la nappe phréatique.

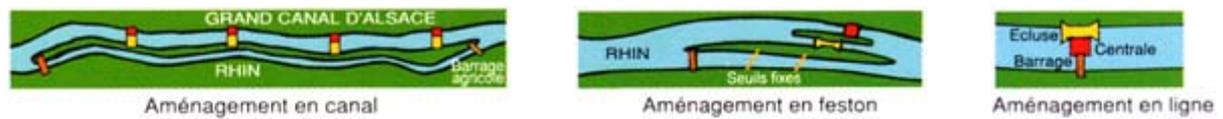


Figure 15 : trois aménagements de type canalisation (www.aufildurhin.com)

Le Rhin en Alsace est un triste exemple d'aménagement de rivière mené à son terme et dont on cherche maintenant à atténuer les impacts. On retiendra que les aménagements de protection contre les crues modifient l'équilibre naturel de la rivière, ce qui oblige par la suite à engager de nouveaux travaux afin d'établir un nouvel équilibre artificiel. Au-delà de la géomorphologie, les ouvrages de protection ont des limites qu'il est utile de rappeler.

1.1.3.2 Ouvrages de protection : digues et murs

Les crues d'une rivière peuvent être plus ou moins fortes d'une année à l'autre. Les ouvrages de protection sont en général dimensionnés pour offrir une protection contre une crue centennale, or il y a eu par le passé des crues plus fortes et il y en aura dans l'avenir.

Dimensionnement et limites des protections

L'ouvrage de protection le plus simple et le plus couramment utilisé est la digue. Le dimensionnement d'une digue est relativement simple : on calcule la hauteur d'eau atteinte par la rivière pour une crue centennale s'écoulant entre les digues et certains ajoutent une revanche d'environ cinquante centimètres. Il y a des incertitudes sur le débit de pointe de la crue de référence et des imprécisions dans les calculs hydrauliques, mais en général l'ouvrage protège effectivement les riverains pour les crues dont la période de retour n'excède pas la période de retour de la crue de projet. Le plus souvent on choisit la crue centennale, c'est arbitraire, mais cela garantit qu'en moyenne une personne ne subira pas plus d'une crue de cette ampleur au cours de sa vie.

La limite de la protection offerte par une digue est précisément la période de retour de la crue de projet. En effet, le risque zéro n'existe pas en hydrologie, il pourra toujours survenir une crue plus forte capable de dépasser l'ouvrage de protection. On peut augmenter le niveau de protection en adoptant une crue de projet bicentennale ou millénaire. D'une part, cet ouvrage coûtera très cher et d'autre part, il sera toujours susceptible d'être emporté par une crue décennale par exemple. Le **risque zéro a un coût infini**, on est donc contraint d'accepter l'éventualité d'un dépassement de l'objectif de protection. On pourrait calculer un niveau de protection économiquement optimal en comparant le coût de l'ouvrage aux dommages évités par l'ouvrage. Cette approche coût-bénéfice n'est en général pas adoptée pour au moins deux raisons :

- Il est assez difficile d'estimer les dommages occasionnés par une crue car les incertitudes sont très importantes (TORTEROTOT, 1994). De plus on raisonne à vulnérabilité constante, ce qui est rarement le cas, car une fois les digues construites, l'urbanisation se développe dans la zone protégée.
- Une estimation économique des dommages ne tient pas compte du traumatisme engendré par les crues à répétition, or les décideurs sont sensibles à l'opinion de leurs administrés et souhaitent une certaine équité de traitement.

On peut mettre en évidence la persistance d'un risque résiduel malgré les aménagements à l'aide d'un jeu de boules de couleurs (GENDREAU et al., 2003 ; figure 16). On compare une rivière sans aménagement et une rivière aménagée pour différentes durées d'observation : 5 ans, 20 ans, 50 ans et 100 ans. Le niveau de protection est fixé à 72 ans.

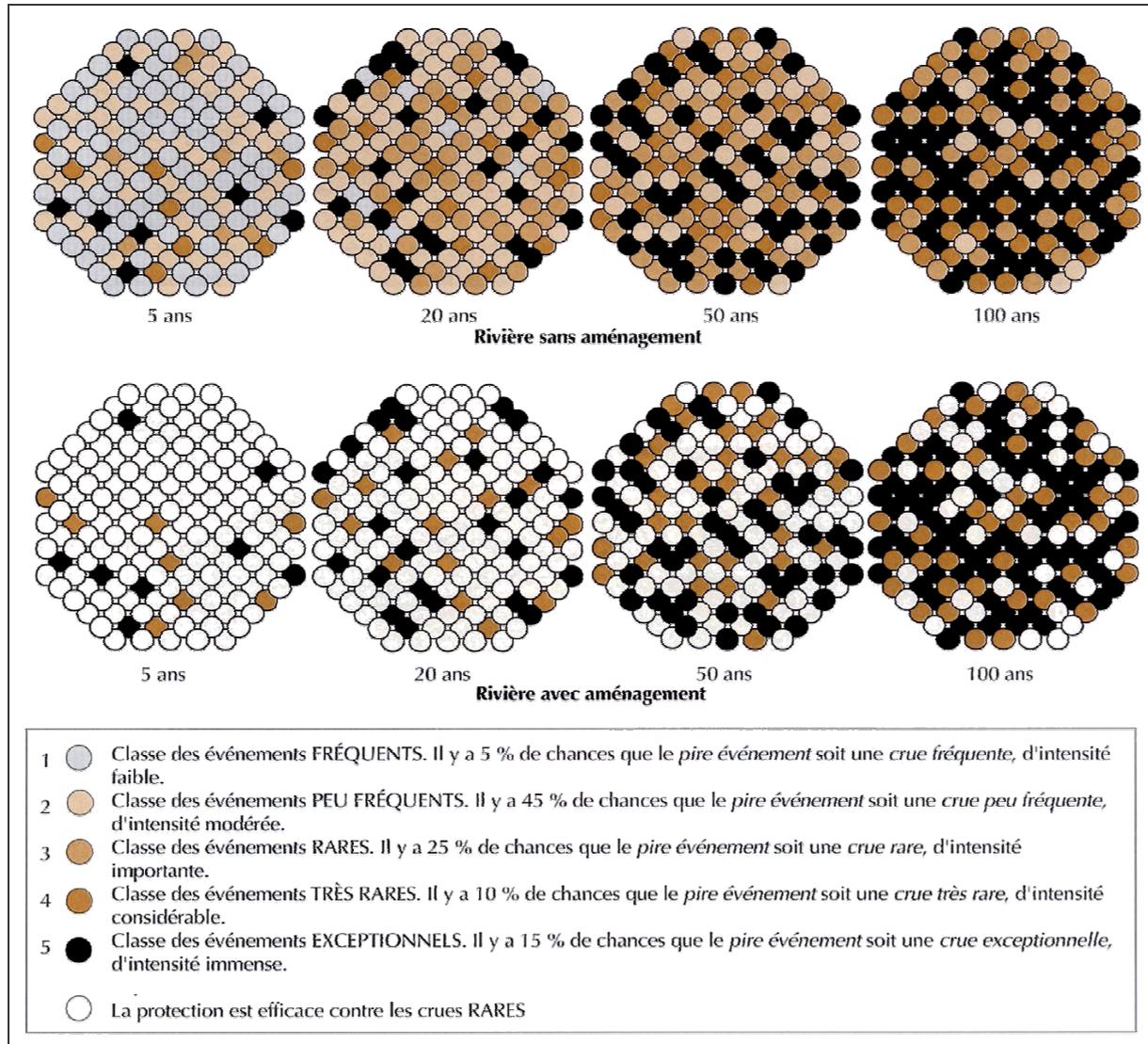


Figure 16 : apparition d'inondations malgré la protection (source Ingénieries EAT)

Les aménagements ne permettent pas de protéger des événements les plus rares (boules noires), c'est la raison pour laquelle seules les crues les plus fréquentes ne sont plus observées après aménagement. Les inondations sont donc moins fréquentes, mais occasionnellement les riverains qui se croyaient protégés sont inondés. Les mesures structurelles ont des limites qui ne pourront pas être beaucoup améliorées dans le futur (BRAVARD, 2000).

Aggravation locale des crues

L'effet pervers des protections est de procurer un faux sentiment de sécurité aux riverains. En effet, ils ne sont plus inondés par les crues les plus fréquentes et ainsi ils perdent la culture du risque. Par ailleurs, ils n'ont pas non plus conscience du risque résiduel qui

subsiste malgré la protection. C'est pourquoi ils aménagent leurs terrains et leurs maisons sans tenir compte de ce risque. On observe par exemple l'aménagement de sous-sols en pièces habitables.

Le risque résiduel est également lié au risque de défaillance de l'ouvrage de protection. Les digues sont en général construites en tout-venant compacté, elles nécessitent un entretien et un contrôle attentif, car elles peuvent être endommagées par les crues, la chute d'un arbre, le creusement d'un terrier ou un tassement. Lorsqu'une digue cède, les eaux envahissent les terrains protégés, mais elles ne peuvent plus s'évacuer librement après la crue, la durée d'inondation est allongée, ce qui aggrave les dégâts causés aux bâtiments. De plus, lorsqu'une digue est submergée, la hauteur d'eau derrière la digue est souvent plus importante qu'elle ne l'aurait été pour la même crue sans protection (figure 17). Dans la plaine du Yangtse par exemple, la hauteur d'eau en cas de rupture de digue peut atteindre 13 m (HONGFU et CHANGAN, 2001).

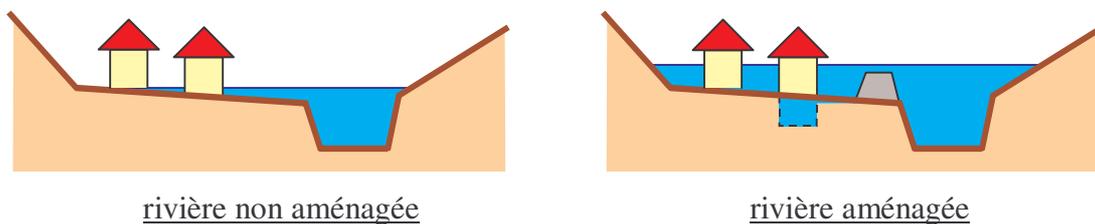


Figure 17 : hauteur d'eau pour une même crue dépassant le niveau de protection

Les digues protègent des inondations les plus fréquentes, mais elles aggravent les crues les plus fortes pour les riverains qu'elles doivent protéger : les inondations peuvent être plus longues et les hauteurs d'eaux plus importantes. Les digues modifient par ailleurs les crues à l'aval des secteurs aménagés.

Aggravation des crues à l'aval

Lorsqu'une crue se forme dans un bassin versant, la rivière doit évacuer un volume d'eau important : c'est ce que l'on appelle le routage de la crue. Si la rivière déborde et inonde le lit majeur, une partie du volume de la crue est ralenti, voire temporairement stocké en lit majeur. On peut illustrer ce laminage des crues par le fonctionnement d'une simple baignoire (figure 18).

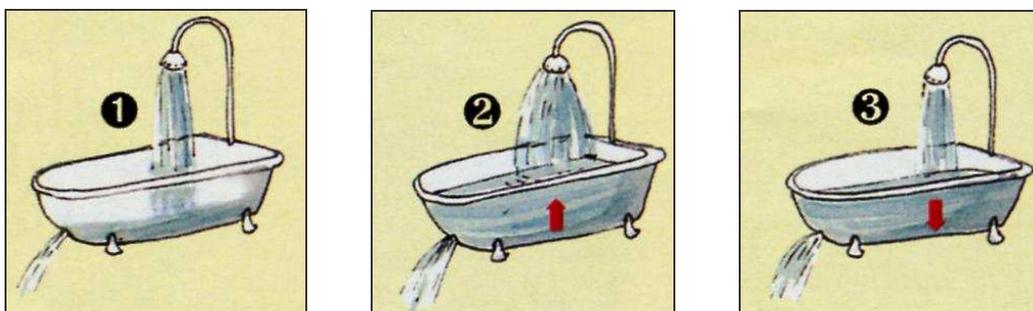


Figure 18 : illustration du laminage des crues (source Conseil Général du Haut-Rhin)

1. Avant la crue, le débit de la rivière est entièrement évacué vers l'aval sans débordement, le volume qui entre sort immédiatement, sans rétention.

2. Pendant la crue, le débit amont de la rivière augmente, mais la capacité d'évacuation de la rivière étant limitée, celle-ci déborde et le niveau d'eau dans le lit majeur augmente. Le lit majeur stocke un certain volume d'eau.
3. Après la crue, le débit amont de la rivière diminue, le lit majeur se vidange progressivement et son niveau d'eau diminue.

La construction de digues et la correction d'un cours d'eau ont tous deux pour effet d'améliorer la capacité d'évacuation de la rivière vers l'aval. Ces aménagements limitent le volume de rétention en lit majeur et donc ils limitent le laminage des crues. Ils provoquent l'aggravation des crues à l'aval (SPALIVIERO, 2002).

On peut mettre en évidence la modification du transit des crues à l'aide d'hydrogrammes de crue (figure 19).

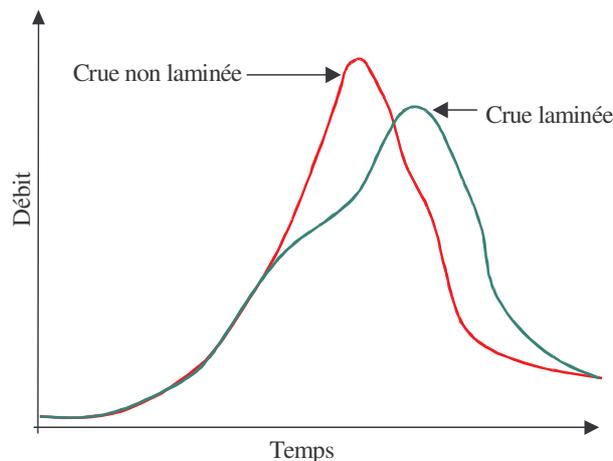


Figure 19 : laminage des crues, comparaison d'hydrogrammes

Ces deux hydrogrammes représentent exactement le même volume de crue, mais celui-ci est réparti différemment dans le temps. L'hydrogramme laminé est un hydrogramme « aplati », comme si on l'avait passé dans un laminoir. La différence s'observe sur la valeur du débit de pointe, comme nous l'avons dit plus haut, mais également sur la vitesse de montée de la crue. Lorsqu'on diminue le laminage, on observe une accélération du transit des crues dans le bassin versant (LAMMERSEN et al., 2002). Si les pointes de crue des affluents et de la rivière principale deviennent concomitantes alors qu'elles ne l'étaient pas auparavant, l'aggravation de la crue à l'aval de la confluence peut être très importante.

Les digues sont loin de représenter la solution parfaite aux problèmes d'inondation, mais elles restent le moyen le plus efficace pour protéger les riverains des crues les plus fréquentes. L'étude de leur impact à grande échelle est rarement réalisée dans un cadre opérationnel, pourtant cela permettrait de vérifier si les mesures compensatoires adoptées sont suffisantes. Nous proposons d'examiner cette question dans la suite de notre travail. Aujourd'hui il est conseillé aux aménageurs de construire les digues au plus proche des enjeux à protéger afin de laisser le plus de place possible à la rivière. On peut également envisager la rétention d'une partie de la crue artificielle dans des bassins écrêteurs de crue.

1.1.3.3 Ouvrages de rétention des crues

Les crues représentent souvent des volumes d'eau colossaux. Le débit d'une rivière de taille moyenne en crue atteint plusieurs centaines de m³/s et la crue dure souvent plus de 24 heures, le volume total d'une crue se chiffre donc en dizaines de millions de m³. Les bassins de rétention doivent pouvoir contenir plusieurs millions de m³ pour qu'ils aient une influence significative sur la crue, ainsi ces ouvrages ont souvent une emprise importante. Il est difficile aujourd'hui de trouver des espaces suffisamment vastes pour implanter de grands barrages réservoirs comme ceux qui protègent Paris des crues de la Seine. On privilégie plutôt des ouvrages en dérivation qui permettent de stocker un volume moins important, mais au moment le plus opportun.

Polders, exemple sur le Rhin

Les crues du Rhin Supérieur ont été profondément modifiées par les aménagements successifs. L'onde de crue se propage de Bâle à Mannheim en 80 heures au lieu de 110 à la fin du XIX^e siècle. Le risque de concomitance avec les crues du Neckar a fortement augmenté, ce qui aggrave la situation sur le Rhin Moyen et Inférieur. Le débit de pointe à Cologne a également augmenté et les inondations dans cette ville sont de plus en plus fréquentes. Pour tenter de limiter cette aggravation, le Rhin Supérieur fait l'objet d'un grand programme de construction de polders : Das Integrierte Rheinprogramm (figure 20).

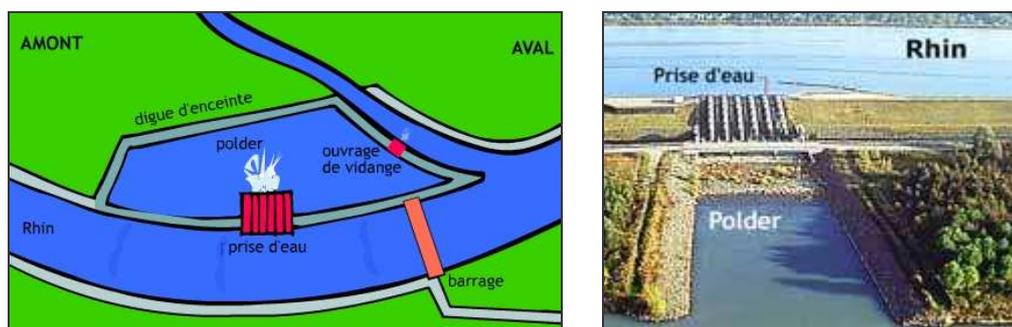


Figure 20 : schéma du polder d'Erstein et prise d'eau (www.aufildurhin.com)

Pour qu'un polder soit efficace, il doit être géré de façon très rigoureuse, l'ouverture des vannes doit avoir lieu le plus tard possible, pour prélever le volume sur la pointe de crue (MAUCHAMP, 2002). Ce type d'ouvrage doit avoir l'appui d'un service d'annonce des crues performant, ce qui est le cas sur les grands fleuves navigables. Sur les rivières de taille moyenne, on ne peut pas espérer la même efficacité. On privilégie donc des systèmes passifs qui sont délicats à mettre au point et qui nécessitent une très bonne connaissance de l'hydrologie de la rivière.

Ralentissement dynamique, une mise en œuvre délicate

Pour mettre fin à la construction de digues de plus en plus hautes et à l'aggravation des crues en aval, les projets de ralentissement dynamique se développent. L'idée est de remplacer les grands barrages réservoirs par un nombre important de petits bassins tout au long du cours d'eau (POULARD et al., 2003 ; MEDD, 2004). Cette solution est intéressante, car elle vise à stocker le volume de la crue en amont partout où cela est possible. Cela permet

de réduire les inondations dans les régions densément peuplées et dont la topographie ne se prête pas à l'implantation de barrages traditionnels. De plus, ces bassins sont à sec la plupart du temps et la hauteur d'eau reste en général limitée.

Les bassins peuvent être construits en ligne, sur la rivière, pour créer un surstockage pendant la crue (figure 21). Ce type de dispositif est relativement peu coûteux, mais il présente deux inconvénients :

- Il ne permet pas la rétention de crues volumineuses et longues, car lorsqu'il est plein il n'écrête plus la crue.
- La gestion des embâcles est très difficile et ceux-ci peuvent rendre l'ouvrage totalement inefficace, voire dangereux.

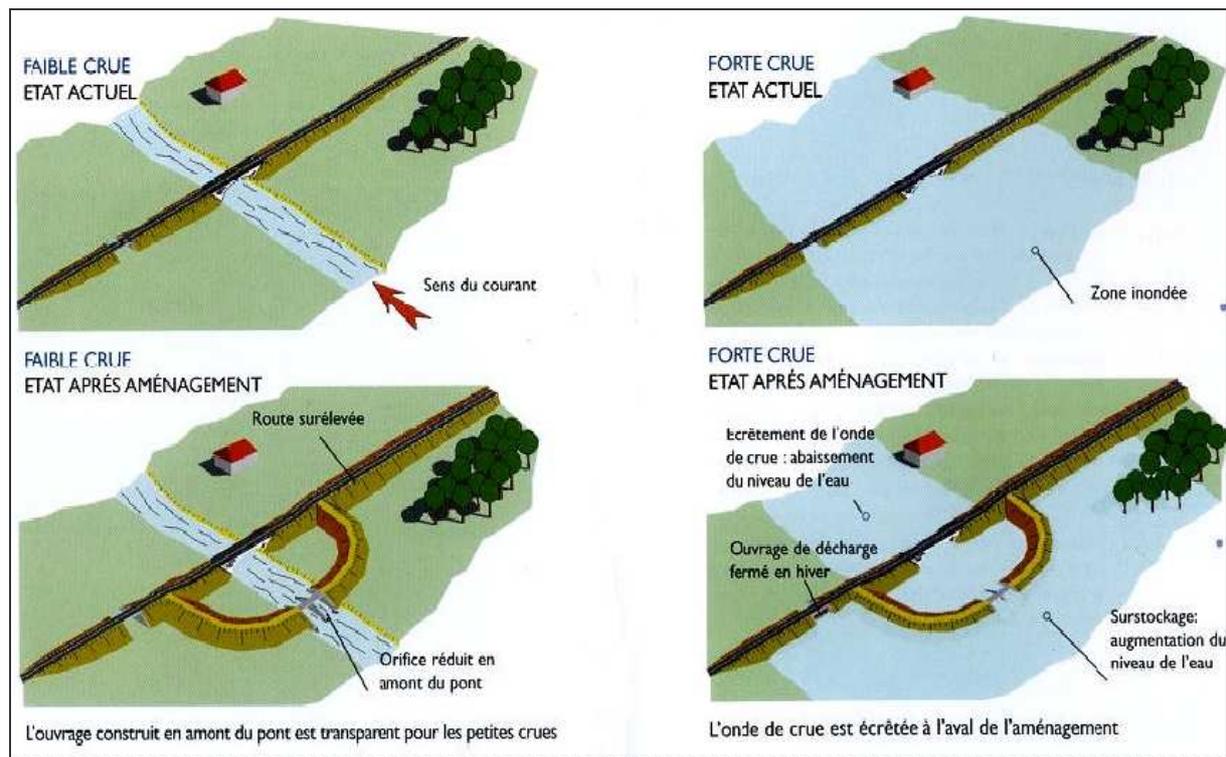


Figure 21 : exemple de dispositif de ralentissement dynamique (source Préfecture IdF)

Pour améliorer le fonctionnement d'un dispositif à plusieurs bassins, il faut que leur remplissage s'effectue le plus tard possible, afin de ne stocker que le volume excédentaire de la crue. Pour cela on doit créer des bassins en parallèle du cours d'eau, à l'image des polders, mais avec une alimentation en eau passive (déversoir latéral). Ce type de projet avec un grand nombre de bassins a été entrepris sur la Savoureuse, une rivière du Territoire de Belfort. Cette opération s'est soldée par un accident assez grave qui a mis à jour les difficultés de mise en œuvre de ce type de projets.

Les 9 bassins du projets doivent permettre de retenir plus de 2 millions de m³ en quelques heures pour éviter les inondations de la Savoureuse à Belfort et Montbéliard. Ces ouvrages se remplissent à partir de déversoirs latéraux dont la cote est calculée pour optimiser l'écrêtement de la crue de projet. Les bassins sont délimités par des digues en terre qui permettent de retenir un volume d'eau important. En janvier 2001, à la première mise en eau, l'un de ces ouvrages a cédé et a inondé les villages à l'aval. Les inspections générales de

plusieurs ministères ont rendu un rapport sur cet événement (CGPC et al., 2002), il met en lumière plusieurs défaillances dans la mise en œuvre de ces ouvrages :

- D'un point de vue technique, le projet a été plusieurs fois remanié : choix du nombre de bassins, cote des déversoirs... Les études hydrologiques n'ont pas été adaptées à chaque nouveau projet, alors que la connaissance du fonctionnement hydrologique et hydraulique du bassin versant est déterminante. Il n'y a pas eu de modélisation complète du système pour en évaluer la performance.
- Les services chargés de la police de l'eau n'ont pas les moyens humains, ni les compétences pour évaluer des projets aussi complexes, tant du point de vue hydrologique que du point de vue géotechnique.
- Ce type de bassin semble anodin en raison du faible nombre de jours d'utilisation annuel, mais il faut au contraire considérer que ce type d'ouvrage fonctionnant lors d'événements exceptionnels, sa surveillance et son entretien doit être mené de façon très rigoureuse. La conception doit également être soignée pour que le risque de défaillance soit limité.

Les ouvrages de rétention peuvent être un moyen efficace de lutte contre les crues, mais ils ont pour effet de transformer un risque naturel en un risque technologique, dont il ne faut pas sous-estimer l'ampleur. Les collectivités territoriales qui assurent la maîtrise d'ouvrage prennent en charge ce nouveau risque, alors qu'elles n'étaient pas responsables des inondations naturelles du cours d'eau. Les bassins de la Savoureuse ont été provisoirement mis hors d'usage pour procéder à des travaux de renforcement. A l'avenir la mise en place de ce type d'aménagement devra s'appuyer sur une modélisation rigoureuse de leur fonctionnement pour des crues variées. Ces projets nécessitent une modélisation du fonctionnement des ouvrages à l'échelle du bassin versant (SAMUELS, 2001).

Les aménagements de protection contre les inondations doivent être considérés comme une solution locale et limitée pour atténuer le risque. Ils modifient de façon importante les caractéristiques des inondations, mais aussi la culture du risque et les responsabilités. La prise de conscience des limites des aménagements et de leurs conséquences pour l'aval est récente. Les décideurs sont à la recherche de solutions techniques plus efficaces à long terme et tenant compte de l'ensemble du bassin versant.

La gestion intégrée appliquée aux crues est une préoccupation nouvelle qui soulève des problématiques scientifiques, techniques et réglementaires.

1.2 Gestion intégrée des crues et problématiques scientifiques induites

La prise de conscience de l'impact des activités humaines sur l'environnement, et notamment sur l'hydrosphère, a fini par prendre corps dans les textes de lois qui réglementent la gestion de l'eau en France et en Europe. Ces textes visent à transposer les grands principes de la gestion intégrée en directives et en procédures réglementaires applicables aux projets d'aménagement et notamment aux projets de protection contre les inondations. Les bénéfices des inondations doivent être pris en compte dans les projets d'aménagement, ce qui pose de nouvelles questions scientifiques et techniques aux gestionnaires des cours d'eau. Dans un premier temps, nous rappelons les textes de loi qui réglementent la gestion des eaux, ils appellent tous à une gestion intégrée des cours d'eau (cf. § 1.2.1). Ensuite, nous présentons les aspects bénéfiques des inondations pour l'ensemble de l'hydrosystème (cf. § 1.2.2). Enfin, nous dégageons les problématiques scientifiques induites par la gestion intégrée (cf. § 1.2.3).

1.2.1 Principes de la gestion intégrée et textes de loi

Les textes réglementaires sont souvent fastidieux à parcourir tant le législateur se soucie de rendre le texte applicable à tous les cas particuliers. Cependant ils ont le mérite de mettre en avant de grands principes de gestion et d'aménagement qui ont été proposés et validés par les scientifiques compétents dans le domaine. Ainsi la Loi sur l'eau de janvier 1992 a marqué une avancée déterminante dans l'application de la gestion de l'eau en France. Une nouvelle Loi sur l'eau est actuellement en préparation, elle devrait reprendre les grands principes de sa devancière. Nous aborderons successivement trois textes réglementaires : la Loi sur l'eau du 3 janvier 1992 (cf. § 1.2.1.1), la Directive cadre européenne sur l'eau (cf. § 1.2.1.2) et la Loi du 30 juillet 2003 (cf. § 1.2.1.3).

1.2.1.1 Loi sur l'eau du 3 janvier 1992

La loi N° 92-3 (RF, 1992), plus connue sous le nom de Loi sur l'eau a mis fin à la gestion sectorisée de la ressource en eau qui prévalait jusque là. Ce texte fait prévaloir les principes d'unicité de la ressource, de gestion équilibrée et de gestion par bassin versant.

Unicité de la ressource en eau

L'article premier de la Loi sur l'eau énonce clairement ce principe :

« L'eau fait partie du patrimoine commun de la nation. Sa protection, sa mise en valeur et le développement de la ressource utilisable, dans le respect des équilibres naturels, sont d'intérêt général. »

L'usage de l'eau appartient à tous dans le cadre des lois et règlements ainsi que des droits antérieurement établis.»

L'eau est un bien commun, c'est-à-dire qu'elle ne peut être gérée au profit d'une seule activité économique. C'est également un bien unique que l'on ne peut pas diviser au profit d'usages exclusifs. Ainsi la gestion de ce bien doit privilégier la concertation des différents usagers. La loi ne demande pas aux usagers de renoncer à leurs usages, au contraire elle encourage la mise en valeur de la ressource pour l'intérêt général. Par ailleurs, elle ne remet pas en cause les droits d'eau existants ce qui rend parfois difficile l'application des nouvelles règles de gestion de la ressource.

La ressource en eau est unique et elle doit être gérée dans le respect de tous les usages, c'est le fondement de la gestion intégrée. Le bon fonctionnement des milieux naturels peut être considéré comme un usage légitime de l'eau : la gestion de l'eau doit être équilibrée.

Gestion équilibrée

L'article 2 plaide pour une gestion équilibrée de l'eau entre tous les usages, marchands et non marchands :

« Les dispositions de la présente loi ont pour objet une gestion équilibrée de la ressource en eau. Cette gestion équilibrée vise à assurer :

- *la préservation des écosystèmes aquatiques (...)*
- *la protection contre toute pollution (...)*
- *le développement et la protection de la ressource en eau (...)*
- *la valorisation de l'eau comme ressource économique et la répartition de cette ressource de manière à satisfaire ou à concilier, lors des différents usages, activités ou travaux, les exigences de la santé (...), de la protection contre les inondations, de l'agriculture, des pêches (...), de l'industrie, de la production d'énergie, des transports, du tourisme, des loisirs (...) ainsi que toutes autres activités humaines légalement exercées. »*

La loi place au premier rang des préoccupations la préservation des écosystèmes aquatiques et elle intègre comme une des valorisations de l'eau la protection contre les inondations. La gestion des crues fait pleinement partie des objectifs de la gestion intégrée de l'eau et elle doit prendre en compte le fonctionnement des écosystèmes (RAMADASAN, 1999). La gestion des crues doit également tenir compte de l'ensemble des autres usages de l'eau, comme l'alimentation en eau potable. Elle doit aussi tenir compte des objectifs de protection contre les inondations des autres usagers, notamment de ceux situés à l'aval. La protection contre les crues n'est qu'un usage parmi d'autres localisé au sein d'un bassin versant ayant des besoins multiples et parfois contradictoires, ainsi la loi prévoit une gestion planifiée par bassin versant.

Gestion par bassin versant

La loi sur l'eau a institué le SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux) et le SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux). Le but de ces schémas d'aménagement, à l'échelle de grands bassins fluviaux ou pour de plus petits cours

d'eau, est de planifier l'aménagement du bassin versant et la gestion des eaux pour plusieurs années en prenant en compte le plus grand nombre d'usages. Pour chaque SAGE, une Commission Locale de l'Eau est créée, elle représente les différents acteurs de la gestion de l'eau. Elle assure le suivi des projets engagés dans le bassin versant et est attentive au respect des engagements pris lors de la rédaction du SAGE. Les SAGE doivent permettre de mieux tenir compte des différents usages ainsi que des attentes des différents acteurs.

Les SAGE permettent parfois de faire émerger des projets communs à l'ensemble des acteurs. Cela permet de les fédérer autour d'un ou plusieurs objectifs qui serviront de point de mire aux projets engagés par la suite. Souvent la protection contre les inondations est un objectif commun des collectivités et on demande beaucoup d'efforts aux communes situées à l'amont pour améliorer la rétention des crues. Le SAGE permet de favoriser la création de structures intercommunales qui entreprennent les travaux à l'échelle du bassin versant, ce qui permet de répartir plus équitablement les financements. La solidarité des collectivités est indispensable pour la gestion des crues (LAGANIER et SCARWELL, 2001).

D'un point de vue technique, la mise en place d'un SAGE fait souvent appel à une grande étude de diagnostic pour faire l'état des lieux du bassin versant (exemple : SOGREAH, 2004). Ces études pluridisciplinaires à grande échelle décrivent rarement de façon fine le fonctionnement hydrologique et hydraulique du cours d'eau en crue. En effet, le coût de ces études est souvent trop élevé au regard des budgets qui sont alloués à la mise en place d'un SAGE et les bureaux d'étude ne disposent pas toujours des compétences nécessaires pour mener une telle approche à grande échelle. Nous avons développé une méthodologie opérationnelle permettant un diagnostic à l'échelle du bassin versant tout en veillant à maîtriser le coût de l'étude.

Le principe de gestion par bassin versant a également été mis en avant par la directive cadre européenne sur l'eau.

1.2.1.2 Directive cadre européenne sur l'eau

La directive 2000/60/CE du parlement européen et du conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau (EU, 2000) reprend et complète les grands principes de la Loi sur l'eau française. Comme toute directive européenne, la directive cadre sur l'eau doit être transposée en droit français sous peine de sanctions financières. La première notion rappelée est la gestion par bassin versant, mais il est également question de développement durable et de bon état écologique des cours d'eau.

Gestion à grande échelle

Nota : bien qu'il n'y ait pas de définition universelle d'une « grande échelle », nous entendons par là une approche d'extension géographique importante par opposition aux études de détail plus localisées. En terme de superficie, la notion de « grande échelle » correspond à un bassin versant de plusieurs dizaines de kilomètres carrés ou à un tronçon de cours d'eau de plusieurs dizaines de kilomètres de long.

Les pays membres de l'Union Européenne devaient définir, avant fin 2003, des districts hydrographiques composés d'ensembles de bassins versants, en assurant la cohérence

des délimitations pour les bassins transfrontaliers. La directive souhaite étendre le principe de gestion par bassin versant au-delà des territoires nationaux. En effet, la gestion des grands fleuves et des grandes rivières européennes ne peut pas raisonnablement rester nationale (VIVIEN et ZUINDEAU, 2001). Pour que la gestion de l'eau dépasse les frontières, il faut que les pays aient des objectifs et des règles identiques.

La gestion de l'eau à grande échelle est également un défi technique qui demande la coordination du travail des chercheurs de l'ensemble de la communauté européenne. De nombreux programmes de recherche européens, notamment les programmes INTERREG, financent et organisent des réseaux de chercheurs de tous les pays pour répondre aux nouveaux enjeux de la gestion de l'eau. L'un de ces nouveaux enjeux est la gestion durable de la ressource en eau.

Gestion durable

Le développement durable, ou soutenable (de l'anglais *sustainable*), est un vocable à la mode. Cet objectif est clairement affiché par la directive. L'article premier présente l'objet de la directive de la façon suivante :

« *La présente directive a pour objet d'établir un cadre pour la protection des eaux (...) qui :*

- *prévienne toute dégradation supplémentaire, préserve et améliore l'état des écosystèmes aquatiques, ainsi que (...) des écosystèmes terrestres et des zones humides qui en dépendent directement*
- *promeuve une utilisation durable de l'eau, fondée sur la protection à long terme des ressources en eau disponibles*
- *visent à renforcer la protection de l'environnement aquatique (...)*
- *assurent la réduction progressive de la pollution des eaux souterraines (...)*
- *contribuent à atténuer les effets des inondations et des sécheresses (...)* »

Comme dans la Loi sur l'eau de 1992, la directive européenne place la protection des écosystèmes aquatiques en tête des objectifs. Elle va même plus loin en associant les écosystèmes terrestres inféodés aux cours d'eau, ce qui est très important pour améliorer la gestion des zones inondables (MALTBY et BLACKWELL, 2003). De même, l'atténuation des inondations fait partie explicitement des objectifs de la directive. Ce texte vise donc à promouvoir, entre autre, une gestion durable des inondations.

Une gestion « durable » est une gestion à long terme, ce qui impose de prévoir l'impact des aménagements ou des choix de gestion. Cette préoccupation implique une meilleure prise en compte des équilibres fragiles qui régissent le fonctionnement des cours d'eau et des hydrosystèmes. Une gestion équilibrée est en principe durable si elle prend en compte les évolutions probables des besoins et des usages (VIVIEN et ZUINDEAU, 2001). Les aménagements doivent être planifiés pour atteindre certains objectifs à une échéance fixée par la directive : on ne raisonne plus par moyens mais par objectifs.

Objectif de bon état écologique

La directive n'impose pas un objectif unique pour tous les cours d'eau ou toutes les nappes, mais elle propose de définir un objectif adapté. Ainsi plus une masse d'eau est artificialisée, moins l'objectif est contraignant. On vise en fait un objectif de bon état de la masse d'eau. Ainsi, un cours d'eau peu artificialisé devra atteindre un objectif de bon état écologique, c'est-à-dire que les différents écosystèmes devront retrouver un fonctionnement satisfaisant. Cette approche est intéressante car elle complète l'objectif traditionnel de bonne qualité physico-chimique. Par ailleurs, dès 2006 un réseau de surveillance de l'état des eaux doit être mis en place. Il permettra de faire un état des lieux et de définir un plan de gestion. Ces plans de gestion devront être définis avant 2009 et ils fixeront les objectifs à atteindre en 2015. Le réseau de surveillance permettra de vérifier si les objectifs ont été atteints.

La directive cadre européenne sur l'eau pose deux grands principes de gestion nouveaux : la gestion durable et la gestion par objectifs. La protection contre les inondations doit intégrer ces nouvelles contraintes dès l'établissement du diagnostic. Les aménagements proposés doivent désormais intégrer une vision à grande échelle et à long terme. La récente loi du 30 juillet 2003 vient encadrer la prévention des risques naturels en France.

1.2.1.3 Loi du 30 juillet 2003

L'intitulé exact du texte est : loi N° 2003-699 du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages (RF, 2003). Elle comporte un volet relatif aux risques technologiques que nous n'aborderons pas ici. Elle aborde également dans le détail les questions d'indemnisation, de prévision des crues et de réglementation des travaux qui ne nous intéressent pas directement. Cette loi donne plus de liberté pour engager des aménagements à grande échelle afin de réduire plus efficacement le risque d'inondation.

Surstockage amont

La loi prévoit l'établissement de servitudes d'utilité publiques pour retenir plus d'eau en amont des zones fortement touchées par les inondations. Elles permettront de :

« Créer des zones de rétention temporaire des eaux de crues ou de ruissellement, par des aménagements permettant d'accroître artificiellement la capacité de stockage de ces eaux, afin de réduire les crues ou les ruissellements dans des secteurs situés en aval. »

Ces aménagements contribuent au ralentissement dynamique des crues (MEDD, 2004). Ils doivent permettre de limiter le risque d'inondation en attaquant le problème à la source. Nous avons montré que ce type d'aménagement n'aggrave pas la situation comme les endiguements sont susceptibles de le faire, mais il n'est pas sans risque, car il fait appel à des ouvrages qui sont difficiles à dimensionner et dont la défaillance peut avoir des conséquences graves localement. Ainsi, avant d'envisager du surstockage, on doit vérifier que la rétention naturelle des crues est active.

Restauration des zones inondables

La loi prévoit un deuxième type d'usage pour les servitudes d'utilité publique. Elles permettront de :

« Créer ou restaurer des zones de mobilité du lit mineur d'un cours d'eau en amont des zones urbanisées dans des zones dites « zones de mobilité d'un cours d'eau », afin de préserver ou de restaurer ses caractéristiques hydrologiques et hydrogéologiques essentielles. »

La restauration de la dynamique naturelle du cours d'eau permet en principe d'améliorer les échanges entre la rivière et son lit majeur, ce qui participe au laminage des crues. En laissant le tracé de la rivière libre de se déplacer, on peut recréer des chenaux de crue et des bras morts qui contribuent à la rétention d'eau pendant la crue. La restauration des cours d'eau ne nécessite pas d'ouvrages nouveaux, du moins dans la zone de mobilité du cours d'eau, et elle permet de restaurer le fonctionnement des hydrosystèmes. Nous reviendrons plus longuement sur la question de la restauration des champs d'expansion de crues dans la suite de notre travail (cf. chapitre 3.2).

La loi du 30 juillet 2003 vise à favoriser des aménagements de protection à grande échelle, réparti dans tout le bassin versant et n'aggravant pas la situation à l'aval. Elle facilite la restauration des zones inondables, ce qui pourrait concourir aux objectifs de la gestion intégrée.

Les différents textes de loi qui encadrent actuellement la protection contre les inondations vont tous dans le sens d'une prise en compte du bassin versant et des écosystèmes à long terme.

La gestion intégrée doit tenir compte :

- du bassin versant dans son ensemble (impact des aménagements à l'aval, diversité des usages, contraintes économiques...)
- des équilibres naturels (géomorphologie, écosystèmes ...)
- des évolutions futures (de la société, des écosystèmes, du climat, de la ressource en eau...)

Pour mieux appliquer ces grands principes, il convient de modifier l'approche traditionnelle des inondations pour intégrer également leurs aspects bénéfiques.

1.2.2 Les aspects bénéfiques des inondations

L'inondation est un phénomène naturel : une rivière naturelle inonde régulièrement les terrains qui la bordent. Les crues ont un rôle majeur dans le fonctionnement des écosystèmes riverains par l'intermédiaire de processus variés. Elles contribuent au maintien de la biodiversité et à la sauvegarde de la ressource en eau. Le bénéfice apporté par les crues est réel, certains envisagent même son estimation économique (DUBGAARD et al., 2004). Nous présentons tout d'abord les liens qui unissent les crues et la dynamique fluviale (cf. § 1.2.2.1). Ensuite nous montrons l'importance des inondations pour le maintien de la dynamique

naturelle des hydrosystèmes (cf. § 1.2.2.2). Enfin, nous rappelons le concept de flood-pulse et son importance pour la ressource en eau (cf. § 1.2.2.3).

1.2.2.1 Dynamique fluviale et laminage des crues

Les rivières s'écoulent dans un lit mineur qu'elles ont elles-mêmes créé au fil des siècles. La forme du lit et son tracé ont une grande importance car ils conditionnent les débordements et le laminage des crues.

Mobilité du lit mineur d'un cours d'eau

Le tracé du lit mineur d'un cours d'eau est régulièrement remodelé lors des crues. Leur énergie peut mener à des modifications spectaculaires du cours de la rivière. Le lit majeur porte les traces des anciens lits de la rivière, gravés dans la topographie de la plaine inondable (figure 22).

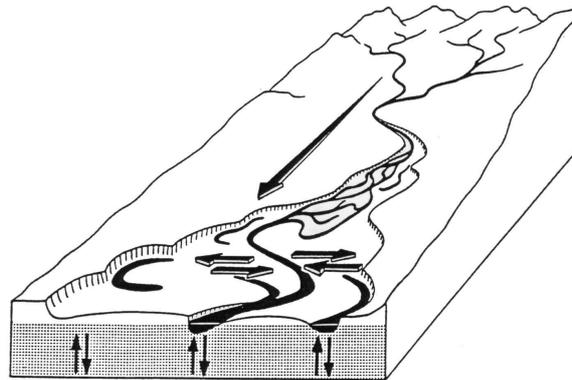


Figure 22 : dynamique fluviale et échanges avec la plaine inondable

Lors des crues, les anciens bras et les anciens méandres sont reconnectés à la rivière. Ils participent à l'étalement et à la rétention des crues, ce qui a pour effet d'atténuer les inondations à l'aval. La dynamique fluviale permet de conserver un lit majeur actif qui limite l'ampleur des inondations à l'échelle du bassin versant (PIEGAY et STROFFEK, 2000).

Aujourd'hui on impose aux rivières de respecter les infrastructures de nos sociétés modernes. Les ponts, les zones urbanisées et les terres arables ont été protégés de la dynamique alluviale par des protections de berges qui figent la dynamique latérale de la rivière. Cela a souvent pour effet d'enclencher une incision du lit mineur qui isole progressivement la rivière de la plaine inondable (BRAVARD et PETIT, 1997). Les crues sont les architectes de la morphologie des cours d'eau, elles fournissent l'énergie nécessaire à la dynamique fluviale pour entretenir des connections actives avec le lit majeur, ce qui maintient le laminage naturel des crues.

Approche mathématique du laminage naturel des crues

Pour comprendre les paramètres physiques qui régissent la propagation des crues on peut faire appel à une approche théorique (GRAF et ALTINAKAR, 2000 ; CETMEF, 2002) basée sur les équations dynamiques filaires de Saint-Venant :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} = -g \frac{\partial h}{\partial x} + g(i - j)$$

(avec V : vitesse, t : temps, x : abscisse curviligne, g : accélération de la pesanteur,

h hauteur d'eau, i : pente du lit, j : perte de charge linéaire)

Le premier terme est le terme d'inertie de l'équation de quantité de mouvement, on peut le négliger lorsque l'écoulement présente un régime fluvial, ce qui est le cas pour les rivières dès lors que la pente n'est pas trop forte. Si on ajoute l'équation de continuité en régime transitoire, on obtient un système d'équations assez simple :

$$\begin{cases} B \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 & \text{(équation de continuité)} \\ \frac{\partial h}{\partial x} = (i - j) & \text{(équation de Saint-Venant)} \end{cases}$$

B est la largeur de l'inondation qu'on appelle la largeur au miroir. En supposant que le régime transitoire est une succession d'états quasi-statiques, on peut employer la formule de Strickler pour exprimer $j = Q^2 / (K^2 \cdot B^2 \cdot h^2 \cdot R_h^{4/3})$, Q étant le débit du cours d'eau et R_h le rayon hydraulique. B dépend également de h et de x . En dérivant l'équation de continuité par rapport à x et l'équation de Saint-Venant par rapport à t , puis en les combinant, on obtient l'équation des ondes diffusantes :

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = \frac{\partial Q}{\partial x} \left(-\frac{\partial j}{\partial h} + \frac{1}{B} \left(\frac{\partial B}{\partial x} + (i - j) \frac{\partial B}{\partial h} \right) \right) + \frac{\partial Q}{\partial t} \left(B \frac{\partial j}{\partial Q} \right)$$

On peut identifier un terme de célérité C et un terme d'atténuation σ tels que :

$$\sigma \cdot \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = C \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t}$$

C'est le terme d'atténuation σ qui nous intéresse pour comprendre quels paramètres physiques jouent un rôle sur le laminage de la crue. Si on considère que le lit mineur est assez large on peut assimiler le rayon hydraulique R_h à la hauteur d'eau h .

$$\sigma = \frac{1}{B \frac{\partial j}{\partial Q}} = \frac{K^2 B h^{10/3}}{2Q}$$

On constate que la largeur de l'inondation B apparaît comme contribuant positivement à atténuer la pointe de la crue. Une hauteur d'eau h plus importante en lit mineur permet également d'amortir l'onde de crue. Mais si on compare pour une même crue un écoulement exclusivement en lit mineur et un écoulement débordant en lit majeur, on note que la largeur au miroir augmente beaucoup plus vite que la hauteur d'eau ne diminue : $h_1 < h_2$, mais $B_1 \gg B_2$ (figure 23).

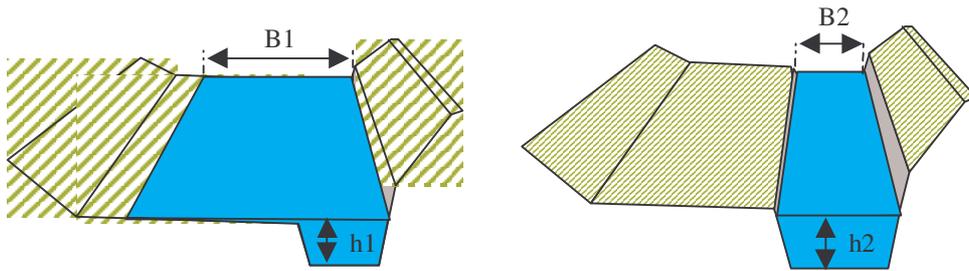


Figure 23 : bases de comparaison pour estimer le laminage d'une crue

Lorsque le lit majeur disponible est suffisamment large, l'atténuation de l'onde de crue offerte par le champ d'inondation est bien plus importante que celle offerte par le chenal. On peut donc dire que les champs d'expansion de crue permettent de réduire le risque d'inondation des zones urbanisées situées à l'aval. Les inondations sont bénéfiques d'un point de vue hydraulique, elles le sont également d'un point de vue écologique.

1.2.2.2 Dynamique des hydrosystèmes et biodiversité

La dynamique fluviale et les inondations régulières des champs d'expansion de crue permettent le bon développement des écosystèmes aquatiques et terrestres qui bordent la rivière. La plaine inondable est le lieu d'échanges permanents entre les différents compartiments de l'hydrosystème.

Définition d'un hydrosystème

Il n'y a pas de définition dans les dictionnaires de langue française, mais on peut trouver diverses définitions dans la littérature technique. L'Encyclopédie AXIS propose la définition suivante :

« Portion de l'espace où, dans les trois dimensions, sont superposés les milieux de l'atmosphère, de la surface du sol et du sous-sol, à travers lesquels les flux hydriques sont soumis à des modes particuliers de circulation. L'hydrosystème est le siège, sous l'effet de l'eau, de transformations car, en toutes ses phases, le cycle de l'eau a d'étroits rapports avec d'autres cycles physiques, géochimiques et biologiques de l'environnement terrestre. »

Le fonctionnement de l'hydrosystème est étroitement lié au fonctionnement hydrologique du bassin versants car ce sont les flux d'eau qui permettent les échanges entre ses différents compartiments (TREMOLIERES et al., 1991). Ces échanges sont particulièrement actifs pendant les crues.

Echanges dans un hydrosystème

L'hydrosystème ne se limite pas aux abords immédiats de la rivière. Le lit majeur actif du cours d'eau en fait partie car il est connecté au lit mineur pendant les crues (figure 24).

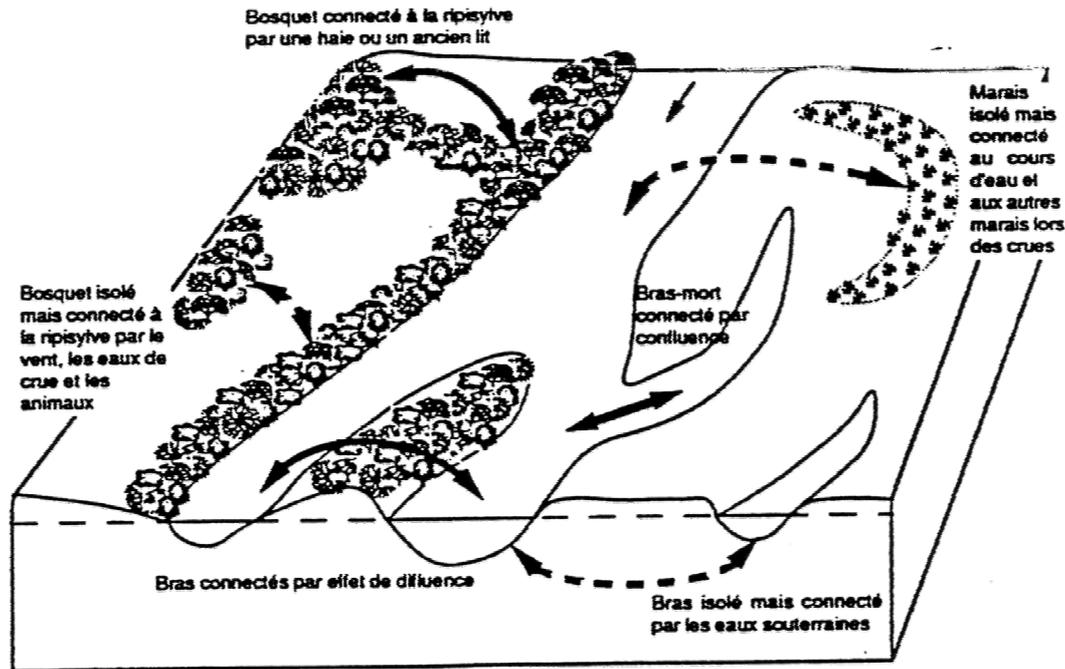


Figure 24 : échanges dans l'hydrosystème pendant une crue

Les flux d'eau sont **quadridimensionnels** :

- La crue progresse d'amont en aval, transportant des sédiments et des nutriments.
- L'inondation du lit majeur est un mouvement transversal à l'axe du cours d'eau. Elle permet le dépôt des sédiments et l'apport de nutriments, mais elle peut également en emporter.
- Les échanges verticaux entre la rivière et la nappe phréatique sont renforcés pendant la crue. Ils permettent aussi la connexion avec d'anciens bras de la rivière.
- La quatrième dimension est le temps, car le débit et les flux de matière varient en permanence tout au long de la crue. La durée d'inondation peut être très variable d'un site à l'autre et d'une crue à l'autre.

Le fonctionnement des hydrosystèmes est étroitement lié à la fréquence de ces échanges (AMOROS et PETTS, 1993). Les rivières artificialisées ne permettent plus le débordement des crues les plus fréquentes ni la dynamique fluviale. Ainsi l'hydrosystème fonctionne mal et perd de sa richesse (SOUCHON, 2002). Les végétaux sont particulièrement sensibles à la sauvegarde de la dynamique fluviale et des inondations (TREMOLIERES et al., 2002).

Biodiversité des lit majeurs

Les communautés végétales qui occupent la plaine inondable sont adaptées aux inondations (SPAT, 2003). Les crues entretiennent la dynamique végétale en modifiant la morphologie de la plaine et en apportant des nutriments et de l'eau en abondance. Les forêts alluviales rhénanes par exemple ont une productivité exceptionnelle grâce aux inondations estivales du Rhin (DEILER et al., 2002). On observe trois stades forestiers différents selon la

topographie du terrain et la dynamique fluviale. Dans le stade à bois dur (*Quercus-Ulmetum*) la structure et la richesse spécifique est exceptionnelle (CARBIENER, 1983).

La biodiversité est favorisée par la diversité de substrats, des niveaux hydrique et trophique des stations. La dynamique fluviale modifie en permanence la topographie de la plaine en alternant érosion et alluvionnement, ainsi la distance à la nappe phréatique est contrastée d'une station à l'autre. La fréquence et la durée des submersions varie en fonction du type de connexion à la rivière : connexion en crue, connexion avale, diffluence, remontée de nappe... Cette grande diversité permet d'observer une richesse spécifique exceptionnelle dans les champs d'inondation encore actifs.

Les inondations sont bénéfiques pour maintenir ou enrichir la biodiversité des zones alluviales. La sauvegarde des zones humides passe par la sauvegarde des processus physiques associés aux inondations (PIEGAY et STROFFEK, 2000). Cette démarche permet également de protéger la ressource en eau.

1.2.2.3 Flood-pulse et protection de la ressource en eau

Le débit d'une rivière varie en permanence, mais la variation est particulièrement forte pendant les crues. Le débit maximal de la crue peut atteindre 10, 50 voire 100 fois le module (débit moyen annuel). On observe nettement une élévation du niveau d'eau, puis une décrue. Ce battement joue un rôle très important dans le fonctionnement de l'hydrosystème : c'est le concept de flood-pulse.

Concept de flood-pulse

La rivière imprime un rythme hydrologique aux écosystèmes riverains. Les battements de niveau d'eau engendrent des processus physiques, chimiques et biologiques particuliers (figure 25).

L'inondation apporte une grande quantité de nutriments qui sont en partie assimilés par la végétation, ce qui contribue à la production d'une biomasse importante (TREMOLIERES et al., 1991). Par la suite la dégradation de la matière organique entraîne le ruissellement de nutriments vers le cours d'eau. Les poissons ont également besoin de ces périodes de hautes eaux pour leur reproduction (SOUCHON, 2002).

Le flood-pulse correspond au couplage du cycle hydrologique et du cycle biologique qui se traduit par une transformation des nutriments en biomasse, puis à nouveau en nutriments. Le bilan en nutriments est négatif, ainsi on peut dire que l'inondation des zones alluviales a un rôle auto-épurateur des eaux de surface (EDELIN, 2001 ; REILLY et al., 2000). On observe également ce phénomène dans les sols (TREMOLIERES et al., 1991).

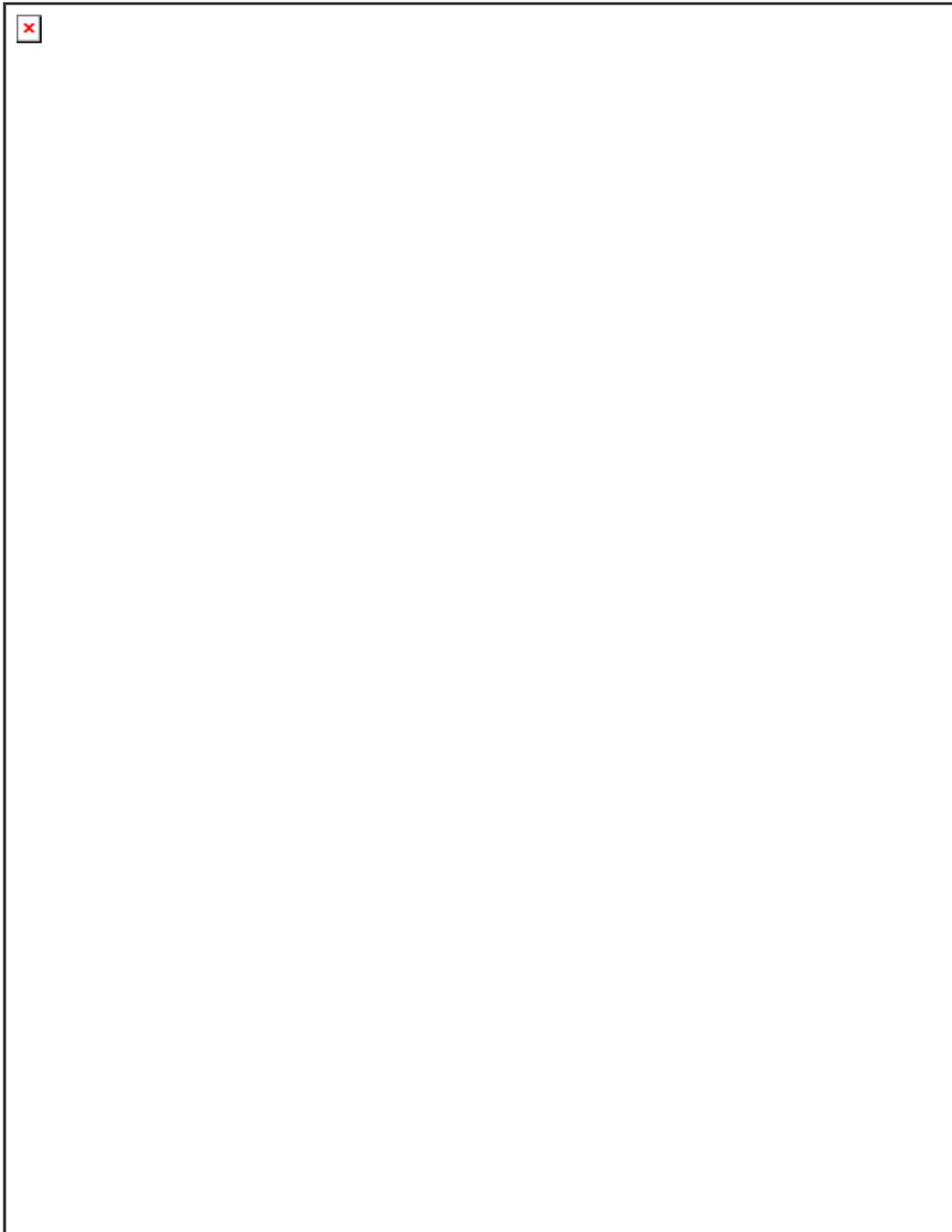


Figure 25 : concept de flood-pulse (d'après Junk et al. 1989)

Protection de la ressource en eau

L'inondation des zones alluviales permet de diminuer l'eutrophisation des eaux de surface, mais elle permet également de recharger les nappes phréatiques en eau de qualité. En effet, l'inondation permet d'alimenter la nappe phréatique directement sur de grandes surfaces. Les échanges entre la nappe et la rivière sont beaucoup plus intenses pendant l'inondation que le reste de l'année. La recharge de la nappe alluviale permet de garantir la ressource en eau des villes et des villages qui utilisent l'eau des nappes pour l'alimentation en eau potable. Elle permet également de soutenir le débit pendant l'étiage en apportant

progressivement de l'eau fraîche et propre au cours d'eau. D'un point de vue quantitatif, les inondations permettent d'assurer une ressource en eau abondante.

D'un point de vue qualitatif, nous avons vu que les eaux de surface sont épurées lors de l'inondation des plaines alluviales. Ainsi on peut dire que l'eau qui contribue à la recharge des nappes est de bonne qualité, donc la qualité des eaux souterraines se trouve améliorée par effet de dilution. Mais le flood-pulse a également un effet sur la qualité des eaux souterraines (VAN OORSCHOT et al., 2000). Dans les zones alluviales, la nappe phréatique est en général assez proche du sol, les battements de niveau d'eau dans la rivière engendrent des battements de niveau de la nappe alluviale. L'alternance de conditions aérobies et de conditions anaérobies permet la dénitrification des eaux souterraines. On a pu montrer que l'inondation des forêts alluviales permet une diminution significative de la teneur en nitrates des eaux souterraines (TREMOLIERES et al., 1991). Les ripisylves ont également un impact positif sur la qualité des eaux, notamment lorsque la plaine alluviale est à vocation agricole. La ripisylve filtre les nutriments et les produits phytosanitaires issus de l'agriculture intensive (SPAROVEK, 2002).

Les inondations contribuent à protéger la ressource en eau, tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif. La sauvegarde des ripisylves, des forêts et des prairies alluviales, ainsi que le maintien de la dynamique fluviale permettent de protéger la ressource en eau et même d'améliorer sa qualité.

Les inondations n'ont pas uniquement des impacts négatifs, au contraire la sauvegarde des champs d'expansion de crue et des hydrosystèmes permet de protéger les zones urbanisées contre les inondations, de constituer un réservoir de biodiversité et d'améliorer la ressource en eau en quantité et en qualité.

La restauration des plaines inondables semble offrir des perspectives intéressantes pour la gestion intégrée des crues, mais elle nécessite une approche à grande échelle qui soulève des questions scientifiques et techniques intéressantes.

1.2.3 Les problématiques scientifiques induites par la gestion intégrée

La gestion intégrée des inondations affiche des objectifs nouveaux qui impliquent une meilleure connaissance du bassin versant et de son fonctionnement en crue. Les outils actuellement à disposition de l'ingénieur ne sont pas adaptés pour mener une approche à grande échelle aux objectifs multiples. Cela appelle le développement d'une nouvelle méthodologie de modélisation des crues. Les difficultés techniques rencontrées par les ingénieurs rejoignent des problématiques scientifiques sur lesquelles nous voulons apporter des éclaircissements. Nous traitons dans un premier temps de l'attribution d'une fréquence à une crue (cf. § 1.2.3.1), puis de la cohérence des approches aux différentes échelles (cf. § 1.2.3.2). Enfin nous proposons une réflexion sur la recherche et la validation des solutions techniques (cf. § 1.2.3.3).

1.2.3.1 Attribution d'une fréquence à une crue

Dans les paragraphes qui précèdent, nous avons plusieurs fois utilisé le terme « période de retour » d'une crue ou le terme « fréquence ». En fait on ne peut pas attribuer une fréquence unique à un événement donné : elle varie à la fois dans l'espace et dans le temps.

Variabilité temporelle de la fréquence

La première grandeur caractéristique d'une crue est le débit maximal atteint : le débit de pointe (figure 26). La période de retour d'une crue est calculée à partir de la fréquence de non dépassement du débit de pointe observé. Pour attribuer une fréquence au débit de pointe, on le compare aux débits de pointe des autres crues observées. Il y a deux méthodes pour calculer la fréquence :

- On retient pour chaque année le débit de pointe maximum, c'est-à-dire le débit de pointe de la crue la plus forte de l'année. On classe par ordre croissant les n débits maximum annuels. On note le rang i de la crue considérée, puis on calcule sa fréquence empirique à partir de la formule de Hazen : $F = (i - 0,5)/n$ (ou ses variantes). Comme on a retenu une crue par an, la période de retour T vaut : $T = 1/(1-F)$. Ainsi la crue centennale a une fréquence de non dépassement de 0,99 : chaque année il y a 99 chances sur 100 pour que le débit de pointe de la crue la plus forte ne dépasse pas le débit de pointe centennial.
- On retient les n' plus forts débits de pointe (ce qui revient à choisir des débits supérieurs à un seuil), puis on calcule la fréquence des crues à partir de la formule de Hazen (ou ses variantes). Si on a observé N années et si on a en moyenne plus d'une valeur de débit de pointe par an, la période de retour se calcule par la formule : $T = (N/n').1/(1-F)$. Cette seconde approche est intéressante lorsqu'on dispose de peu d'années d'observations, car on exploite un échantillon de crues plus important.

On peut d'ores et déjà faire remarquer que la fréquence observée d'une crue dépend de la durée d'observation. En effet, lorsqu'on ajoute des observations à l'échantillon sur lequel on calcule la fréquence, le nombre de valeurs observées ainsi que le rang de classement des crues vont être modifiés. Cela peut faire varier fortement la fréquence observée du débit de pointe d'une crue donnée. Plus le nombre d'années d'observation est élevé, plus la fréquence observée est stable. La période de retour observée la plus forte augmente également avec le nombre d'années d'observation.

Une crue ne se résume pas à son débit de pointe, on peut également être intéressé par son volume, notamment lorsqu'on envisage des ouvrages de rétention. Il faut alors observer la variation du débit au cours du temps à partir de l'hydrogramme de crue (figure 26).

Le volume V de la crue correspond à la surface hachurée sous l'hydrogramme, le volume est un débit multiplié par le temps. On n'utilise pas cette caractéristique pour calculer une fréquence car il est difficile de déterminer le début et la fin de la crue. Sur cet exemple on pourrait considérer que la crue n'est pas achevée car le débit n'a pas encore suffisamment diminué. Sans pour autant faire de statistiques sur le volume, il est souvent intéressant de comparer des crues qui ont un même débit de pointe mais des volumes différents.

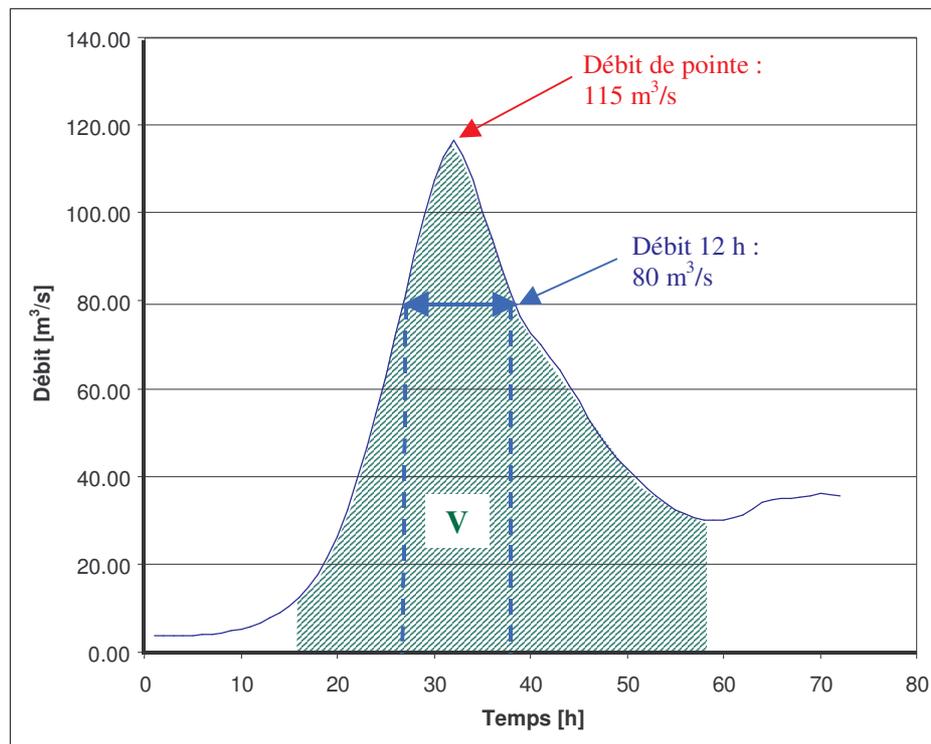


Figure 26 : exemple de caractérisation d'un hydrogramme

Pour faire des statistiques qui traduisent le volume de la crue, on utilise plutôt les débits dépassés pendant 1h, 6h, 12 h, 24h, 48h, 72h... Sur l'exemple ci-dessus on a déterminé le débit dépassé pendant 12h. Si on étudie plusieurs crues, on peut calculer la fréquence du débit dépassé pendant 12 h de la même manière que pour le débit de pointe. Une crue observée a en général une fréquence différente pour ce qui concerne son débit de pointe et son débit dépassé pendant 12h. Une période de retour élevée du débit dépassé pendant 12h indique que la crue est assez volumineuse. On peut décrire le volume d'une crue à l'aide des fréquences des débits dépassés pour différentes durées.

Variabilité spatiale de la fréquence

Lorsqu'on travaille à grande échelle, le débit de pointe de la crue observée varie de l'amont à l'aval du cours d'eau sous l'effet des apports des différents affluents. La répartition de la pluie sur le bassin versant peut parfois mener à observer une crue moins forte à l'aval qu'à l'amont (figure 27).

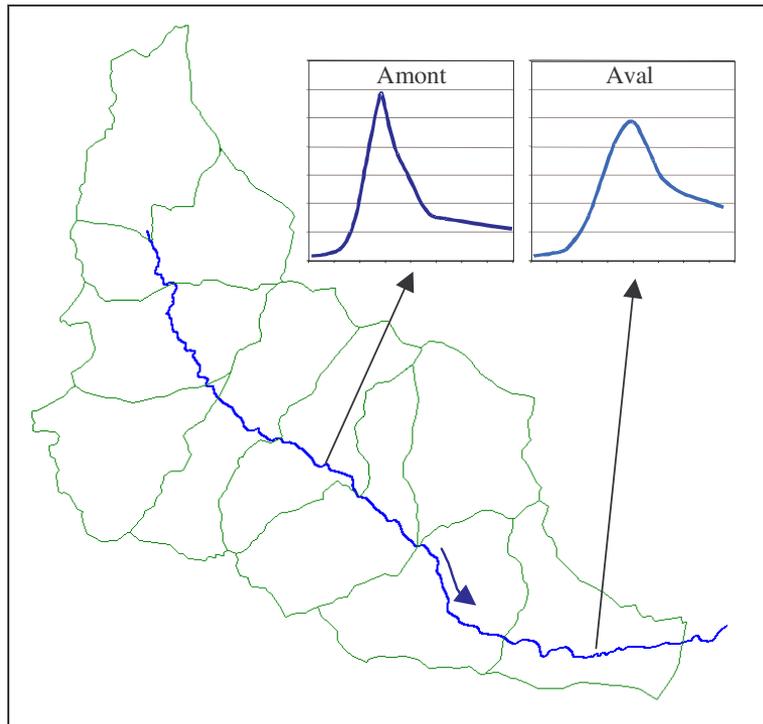


Figure 27 : deux hydrogrammes d'une même crue observée à l'amont et à l'aval

Lorsqu'on observe une crue telle que celle présentée ci-dessus, il est évident que la période de retour du débit de pointe n'est pas homogène d'amont en aval. Le plus souvent c'est la répartition spatiale de la pluie qui explique cette variabilité. Mais même avec une pluie répartie de façon homogène sur le bassin versant, on peut observer une variabilité spatiale de la fréquence. En effet, une pluie courte et intense va générer une crue forte à l'amont, mais pas forcément à l'aval. *A contrario*, une pluie peu intense mais assez longue ne donnera pas lieu à une crue importante à l'amont, mais elle peut être forte à l'aval. La durée de pluie la plus défavorable est traditionnellement prise égale au temps de concentration du bassin versant. La description d'une crue comme combinaison d'un épisode intense et de conditions initiales de saturation des sols pourrait introduire des définitions nouvelles de durées caractéristiques (LEVIANDIER et al., 2000).

La répartition spatiale et la structure temporelle de la pluie explique la variabilité spatiale en fréquence d'un même événement. On peut décrire la structure de la pluie de la même façon que pour un hydrogramme, en calculant la fréquence de la lame d'eau tombée en 1h, 6h, 12h, 24h, 48h, 72h...

On ne peut pas attribuer une fréquence unique à une crue donnée. La « crue centennale » ne l'est en général que par son débit de pointe en un endroit donné. On doit donc réfléchir à la caractéristique de la crue que l'on veut prendre en compte et à la façon dont on peut attribuer une fréquence à cette caractéristique en tout point du cours d'eau. Au-delà de la question de la variabilité en fréquence, se pose la question des changements d'échelle de telles études.

1.2.3.2 Des approches aux échelles variées

Une approche à grande échelle présente souvent une superposition d'échelles différentes selon les événements et les phénomènes observés. On va par exemple observer des crues d'ampleurs très différentes.

Gamme de fréquences

La gestion intégrée des crues doit prendre en compte à la fois le fonctionnement des hydrosystèmes et le risque d'inondation. Ces deux approches font appel à l'étude de crues de fréquences assez différentes.

Les écosystèmes alluviaux ont besoin d'inondations fréquentes, il est donc utile de prendre en compte les crues de période de retour annuelle ou inférieure. Ces crues nous paraissent d'ampleur faible car elles n'occasionnent en général pas de dommages aux activités humaines. On parle souvent de crues écologiques dans le sens où elles ont un grand intérêt pour les écosystèmes. Le volume de ces crues est en général peu important car même si elles peuvent être longues, leur débit de pointe reste en général assez faible, de l'ordre de 10 fois le module.

Le diagnostic du risque d'inondation s'intéresse plutôt aux périodes de retour supérieures à 10 ans, car les zones urbanisées sont en général bien protégées pour les crues plus courantes. L'objectif de protection est souvent la période de retour 100 ans, ce qui correspond à des crues de grande ampleur, dont le débit de pointe peut être plus de 100 fois supérieur au module interannuel.

Les crues de période de retour inférieure à 10 ans sont plus faciles à caractériser, car elles sont plus souvent observées. La prise en compte de ces événements ne représente pas de difficultés particulières d'un point de vue hydrologique. Par contre on dispose de peu d'observations sur les crues rares, il est donc nécessaire d'estimer leurs caractéristiques. La prédétermination des crues rares est un des objectifs de notre travail.

Résolution spatiale et précision

L'étude de la formation des débits dans un bassin versant de plusieurs centaines de kilomètres carrés n'exige pas une résolution spatiale très fine. Les modèles hydrologiques globaux ou semi-globaux sont utilisés sur des bassins versants de plusieurs kilomètres carrés au moins. Les modèles à base physique nécessitent une description de l'occupation du sol, de la pédologie, de la géologie, des pentes, qui s'accommode bien des données issues de la télédétection. Ces données sont rarement d'une résolution inférieure à 25m et leur précision est supramétrique.

Les études hydrauliques nécessitent quant à elles une meilleure résolution spatiale et une précision plus fine. En effet, les calculs hydrauliques sont très sensibles aux effets de seuil. Ainsi la cote d'une digue, par exemple, doit être connue avec une précision altimétrique de l'ordre d'une dizaine de centimètres. La résolution spatiale de l'information topographique est également très importante. Dans leur cours amont, les rivières peuvent être larges de moins de 10 mètres. Si la topographie est connue avec une résolution moyenne de 10 mètres, on ne peut même pas distinguer le lit de la rivière. La résolution spatiale nécessaire est donc

de l'ordre de 1 à 2 mètres. La précision planimétrique doit être inframétrique, car il faut pouvoir situer avec précision les enjeux par rapport à l'inondation. La délimitation de la zone inondée doit être assez précise, surtout dans les régions où la pression foncière est importante.

Les échanges d'eau et de matière dans l'hydrosystème se déroulent à une échelle encore plus réduite. La microtopographie de la plaine inondable a souvent un rôle important, de même que le type de substrat qui peut varier fortement d'un point à un autre. Le niveau de la nappe et la profondeur de la rhizosphère sont également importants pour comprendre les transformations biologiques et chimiques qui se déroulent à l'interface du sol et de la plante. Nous ne sommes toutefois pas descendus à un tel niveau de détail au cours de notre travail.

La résolution spatiale et le niveau de précision des approches varient beaucoup. Nous retiendrons deux échelles différentes : l'échelle du sous-bassin versant (quelques km²) pour l'étude hydrologique et l'échelle métrique, voire centimétrique, pour l'étude hydraulique.

Echelles de temps

Selon la taille du bassin versant et le climat, les crues peuvent durer quelques heures ou plusieurs semaines. Dans le cas des bassins versants tempérés de quelques centaines de kilomètres carrés, la description des crues est souvent journalière. Cependant, lorsque les bassins versants sont très réactifs, comme en montagne par exemple, le pas de temps horaire est indispensable pour une bonne description de la crue. L'étude hydrologique se fait le plus souvent au pas de temps journalier ou horaire, rarement inférieur.

La vitesse de propagation des crues varie beaucoup selon les rivières. Dans les grandes rivières de plaine, la pointe de crue peut mettre plusieurs jours à se propager de l'amont vers l'aval. Les rivières de montagne ont des crues qui traversent très rapidement le bassin versant. Quelques heures suffisent à l'onde de crue pour rejoindre l'exutoire, c'est pourquoi le pas de temps des modèles hydrauliques est de l'ordre de la minute.

Le fonctionnement des hydrosystèmes est beaucoup plus lent. La réponse à la crue s'étale sur plusieurs jours, voire plusieurs semaines. Les crues fréquentes ont une influence permanente sur les communautés végétales, elles participent aux cycles végétatif et reproductif annuels. Les crues rares inondent des hautes terrasses dont les communautés végétales ne sont pas adaptées aux crues, le bouleversement est alors très important. Ces inondations permettent le renouvellement de la forêt alluviale et participent ainsi à un cycle qui dure plusieurs années voire plusieurs siècles.

La dynamique fluviale est également rythmée par les crues. L'énergie des crues est en partie utilisée pour mettre en mouvement les alluvions et créer une nouvelle morphologie. Les crues les moins fortes modifient de façon mineure le tracé du cours d'eau, mais les crues rares peuvent donner lieu à un déplacement du lit de plusieurs dizaines de mètres. Les ajustements morphologiques, comme les érosions régressives, peuvent prendre quelques heures ou plusieurs années selon la dynamique du cours d'eau.

La gestion intégrée des crues demande une vision à grande échelle et à long terme, elle nécessite une connaissance fine de nombreux processus aux échelles spatio-temporelles variées. Nous proposons une méthodologie de modélisation qui intègre toutes les échelles spatiales et temporelles, ainsi que les évolutions physiques du bassin versant.

1.2.3.3 Recherche et validation de solutions techniques

Lorsqu'on prétend rechercher la gestion intégrée d'un cours d'eau, on ne peut pas se contenter d'établir un diagnostic. Quelles solutions est-on en mesure de proposer pour permettre une réduction du risque d'inondation tout en améliorant le fonctionnement naturel des hydrosystèmes ? La recherche de solutions techniques peut exploiter les retours d'expérience de projets pilotes, mais on doit adapter les aménagements au contexte local et valider leur efficacité.

Transposition de projets pilotes

L'aménagement de rivière n'est pas une science exacte, partout en Europe fleurissent des projets de restauration des zones inondables, de surcreusement du lit majeur, de relocalisation de digues (IRMA-SPONGE, 2002) (figure 28).

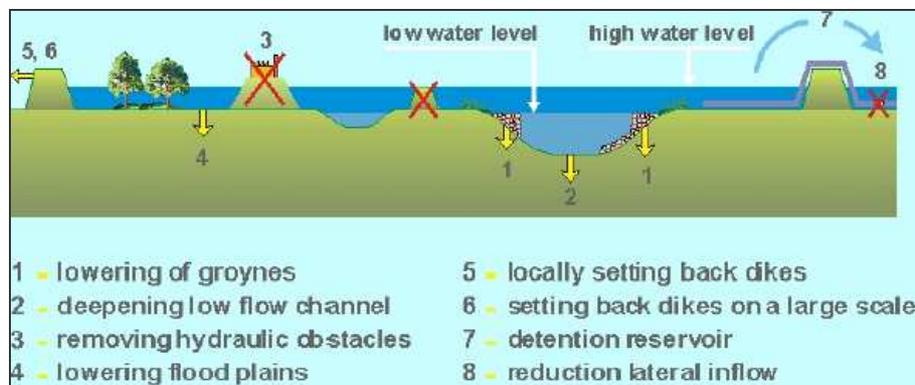


Figure 28 : exemples de projets d'aménagement (source *Room for the Rhine*)

Certains projets sont achevés depuis plusieurs années et ils font l'objet d'un suivi scientifique, les résultats obtenus sont régulièrement publiés dans des revues spécialisées. Dans la plupart des cas il s'agit de grands projets sur de grandes rivières ou de grands fleuves, on peut donc se poser la question de la transposabilité de ces aménagements à des rivières plus petites. Par ailleurs les résultats sont souvent détaillés du point de vue écologique, mais il y a assez peu de retours d'expérience sur l'impact hydrologique et hydraulique de ces aménagements. On considère que le projet permet d'atteindre les objectifs de protection et de laminage prévus lors de la mise au point du projet. Pour vérifier la transposabilité et l'efficacité de l'aménagement sur une rivière aux caractéristiques différentes, il faut valider le projet à l'aide de modélisations dans le contexte local.

Choix d'événements de référence

La validation d'une option d'aménagement nécessite une modélisation du fonctionnement du cours d'eau intégrant l'aménagement (BRETON et MARCHE, 2001). Pour tester un projet on utilise souvent une crue de projet. Cet événement de référence permet de visualiser l'impact local de l'aménagement sur l'inondation, mais également son impact sur la partie aval du cours d'eau. La crue de projet est souvent la crue de référence, à savoir la crue centennale du point de vue du débit de pointe. Or il existe un grand nombre de crues dont le débit de pointe est centennal, mais ayant des volumes tout à fait différents. La validation à

l'aide de l'une ou l'autre de ces crues, ou d'une crue observée, ne garantit pas que l'aménagement fonctionnera pour les autres.

Les aménagements favorisant la rétention et le laminage des crues sont très sensibles au volume de la crue et à sa structure temporelle. Il faut renoncer aux approches n'utilisant qu'une seule crue de projet car l'aménagement peut transformer la période de retour de certaines crues. Il faudrait s'assurer de la période de retour des crues après aménagement et sélectionner *a posteriori* les épisodes pluvieux. Une modélisation hydraulique simplifiée du fonctionnement hydraulique peut être acceptée dans cette étape de sélection.

Les aménagements combinant la protection contre les crues et le respect des hydrosystèmes doivent être validés pour garantir leur efficacité hydraulique. Cette validation ne peut être faite que sur la base de la crue de projet la plus défavorable dont la formalisation est l'un des objectifs de notre travail. La validation sur une étude de cas pourrait être généralisée en menant en parallèle la même démarche sur une rivière générique.

1.2.3.4 Modèle générique de rivière

La contrepartie de la modélisation d'un système complexe est qu'elle tend à la monographie. Par exemple, l'étude de la vallée de la Thur nécessite une description fine de la topographie et des aménagements hydrauliques. Ces préoccupations sont nécessaires à l'étude de cas, mais ne contribuent pas à l'émergence de résultats généraux.

Il est utile de reconnaître dans le foisonnement de détails, les grands facteurs explicatifs, s'il en existe, ou l'émergence de comportements universels résultant de la complexité. Dans les deux cas, la démonstration nécessite l'utilisation de modèles de rivières simplifiés, autorisant les tests de sensibilité. L'abstraction et la simplicité d'un modèle générique de rivière permettent de généraliser les résultats obtenus sur une étude de cas réel. Un tel modèle permet aussi une validation simplifiée de grandes options d'aménagement.

La rivière « virtuelle » peut être adaptée pour traduire des contextes morphologiques différents. Mais la construction d'un modèle générique, présentant une cohérence globale de ses paramètres et conditions aux limites, pouvant correspondre à une genèse morphologique plausible, est un problème en soi (cf. § 3.2.2).

Les problématiques scientifiques induites par la gestion intégrée appellent une réflexion approfondie sur le choix des modèles, leur articulation et la sélection des événements de référence. L'utilisation d'un modèle générique de rivière peut être utile pour la généralisation de résultats particuliers.

L'inondation des lits majeurs contribue activement à la sauvegarde de la biodiversité et de la ressource en eau. Elle permet également d'atténuer les crues à l'aval et ainsi de protéger les zones urbanisées. Les aspects bénéfiques des inondations sont inscrits dans les textes de loi qui encadrent la gestion de l'eau en France et en Europe afin d'encourager l'émergence de projets d'aménagement conciliant fonctionnement naturel et réduction du risque d'inondation. La gestion intégrée des crues soulève un ensemble de problématiques scientifiques dont on doit tenir compte lors de l'élaboration d'une méthodologie de modélisation. Le choix des modèles est crucial : ils doivent être adaptés au contexte géographique et répondre aux objectifs de la méthodologie.

1.3 Contexte géographique et objectifs de la méthodologie

Les rivières peuvent présenter des morphologies très variées. Il y a en effet peu de points communs entre les torrents de montagne et les grandes rivières ou les fleuves de plaine. Nous nous sommes intéressés aux rivières de moyenne montagne, non torrentielles, mais présentant des crues violentes et rapides. Les rivières vosgiennes du département du Haut-Rhin sont un bon exemple de ce type de cours d'eau peu étudiés. Dans un premier temps nous présentons le contexte particulier des rivières de moyenne montagne ainsi que l'étude de cas (cf. § 1.3.1). Ensuite nous fixons les objectifs de la méthodologie : le premier objectif est la mise au point d'une modélisation des crues cohérente et opérationnelle (cf. § 1.3.2). Le second objectif est de proposer un outil d'aide à la décision pour la gestion intégrée du risque d'inondation (cf. § 1.3.3).

1.3.1 Le contexte particulier des rivières de moyenne montagne, l'exemple de la Thur

Nous avons choisi d'étudier les rivières de moyenne montagne car elles sont nombreuses à occasionner des dommages importants, mais on connaît mal leur fonctionnement en crue. L'étude de cas que nous avons sélectionnée pour illustrer le travail est la vallée de la Thur. Nous présentons tout d'abord la situation géographique de la vallée et les enjeux à protéger (cf. § 1.3.1.1). Ensuite nous précisons les particularités des rivières de moyenne montagne (cf. § 1.3.1.2). Enfin, nous décrivons les aménagements de protection réalisés dans la vallée de la Thur (cf. § 1.3.1.3).

1.3.1.1 Situation géographique et enjeux de la vallée

Le département du Haut-Rhin est situé dans le Nord-Est de la France (figure 29), dans la région Alsace. Le climat y est tempéré océanique à continental. Le Haut-Rhin est bordé à l'Est par le Rhin et à l'Ouest par les Vosges. Les rivières du Haut-Rhin sont de deux types :

- Des rivières de moyenne montagne entre Vosges et plaine d'Alsace.
- Des rivières de plaine, dont la plus grande, l'Ill, draine la plaine d'Alsace ainsi que tous les cours d'eau vosgiens qui rejoignent la plaine (HUMBERT et CORBONNOIS, 2000).

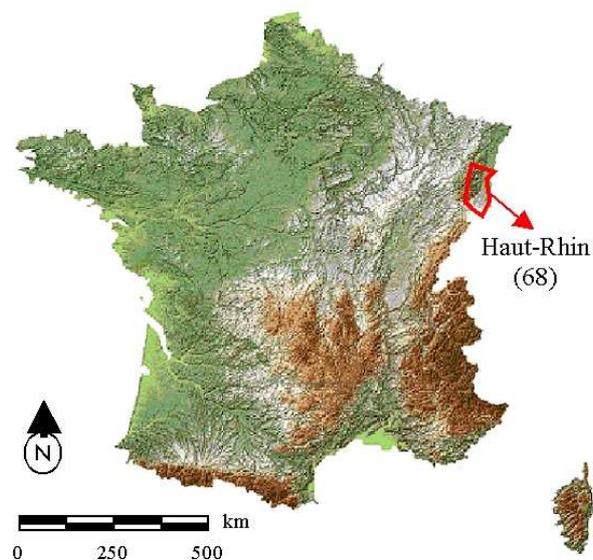


Figure 29 : situation géographique du département du Haut-Rhin (68)

Rivière vosgienne

La vallée de la Thur (figure 30) est une rivière vosgienne typique (SCHMITT, 2001). Elle prend sa source près des sommets vosgiens et elle conflue avec l'Ill à Ensisheim, à l'aval de la ville de Mulhouse. La Doller, qui est également une rivière vosgienne, conflue avec l'Ill en amont, dans la ville de Mulhouse.

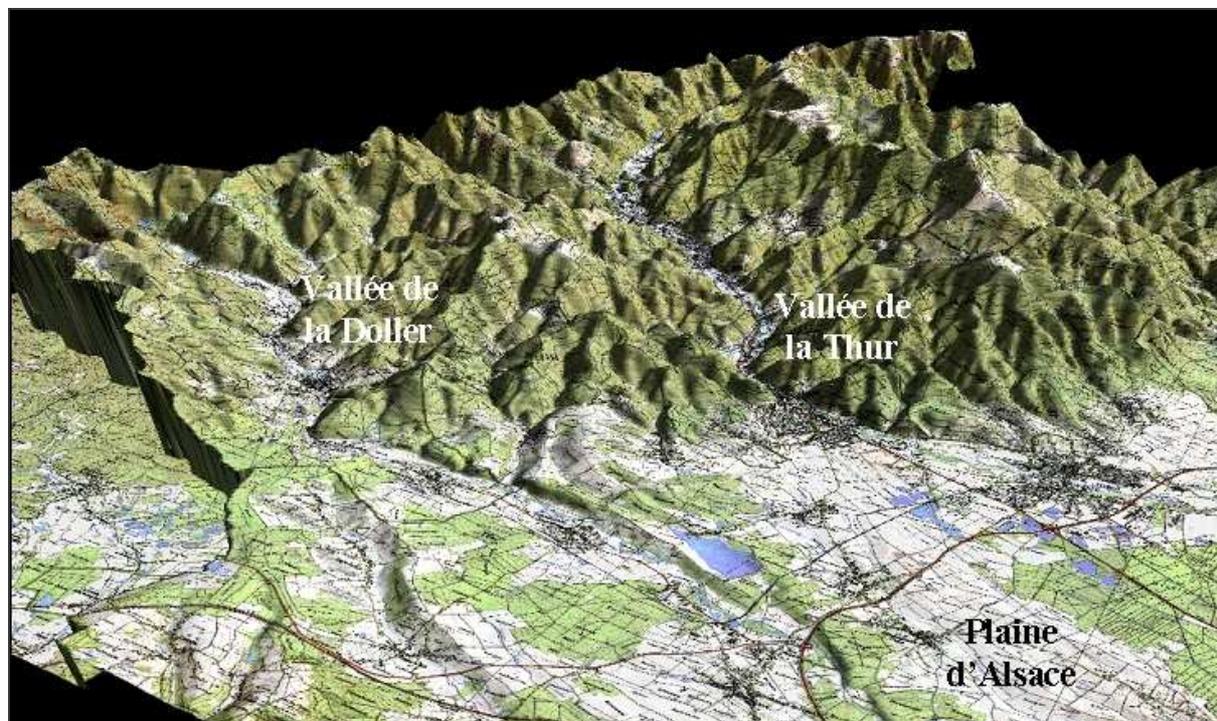


Figure 30 : situation géographique de la vallée de la Thur, vue en 3D

Le bassin versant a une superficie d'un peu moins de 300 km² et le cours d'eau a une longueur d'environ 50 km. Le point culminant du bassin versant est le Grand Ballon à 1424 m et la confluence dans la plaine a une altitude d'environ 250 m. Il s'agit donc d'une rivière de

taille moyenne dont les deux tiers du cours sont situés en moyenne montagne. On peut remarquer sur la vue ci-dessus que le fond de vallée est très urbanisé.

Urbanisation dense

A l'image de la ville de Thann, située au débouché de la vallée dans la plaine d'Alsace, l'urbanisation du fond de vallée est dense et quasiment continue. Dès le XIX^e siècle, les industriels se sont implantés dans les vallées vosgiennes afin de profiter de la force hydraulique offerte par les cours d'eau vosgiens. La pente importante de la vallée leur a permis de développer un grand nombre d'usines sur tout le linéaire du cours d'eau. La réussite économique de la vallée de la Thur a attiré une population importante ce qui lui vaut d'être si densément peuplée.

Aujourd'hui les zones commerciales et artisanales ont remplacé les vieilles usines, mais quelques grandes entreprises textiles et chimiques demeurent implantées dans la vallée, notamment à Thann et à Saint-Amarin. La population travaille le plus souvent dans la région de Mulhouse ou en Suisse et la vallée attire de plus en plus de résidents qui cherchent un cadre de vie agréable.

Voies de communication

La vallée sert de passage à la RN66 qui est un itinéraire européen important pour le transport de marchandises entre le sud et le nord de l'Europe. La vallée est également desservie par une voie de chemin de fer depuis Mulhouse.

Les inondations de la vallée de la Thur menacent des enjeux importants, à la fois humains et économiques. Si on ajoute à cela une topographie défavorable, on est en présence d'un risque d'inondation particulièrement délicat à maîtriser.

1.3.1.2 Particularités des rivières de moyenne montagne

Les crues des rivières de moyenne montagne sont très différentes de celles des rivières de plaine. Les principales particularités sont la pente du cours d'eau, l'étroitesse de la vallée et le gradient pluviométrique.

Pente forte

La Thur a une pente comprise entre 3 ‰ et 6 ‰ considérée comme forte (SCHMITT, 2001) en comparaison avec les rivières de plaine, dont la pente est le plus souvent inférieure ou égale à 1 ‰. On verra plus loin que la rivière présente néanmoins un écoulement en régime fluvial, même pendant les crues.

La pente du cours naturel d'une rivière correspond à un équilibre entre érosion et alluvionnement du lit. La pente d'équilibre d'une rivière dépend de la granulométrie et de la géométrie du lit mineur. Dans le cas de la Thur, la géométrie du cours d'eau a été profondément modifiée par les aménagements successifs, mais la pente du cours d'eau a été stabilisée à l'aide de seuils. La granulométrie très grossière du lit, composé d'alluvions

glaciaires, a permis aux aménageurs de retenir des pentes très fortes. Elles sont comparables à celles des rivières à tresses qui est le style fluvial naturel de la moyenne vallée de la Thur (SCHMITT, 2001). La pente des rivières de moyenne montagne explique en partie la rapidité des crues, les inondations quant à elles sont en général peu étendues du fait de l'étroitesse de la vallée.

Vallée étroite

Les vallées vosgiennes sont d'origine glaciaire, elles se caractérisent par leur forme en V et leur fond plat et étroit (SCHMITT, 2001). La vallée de la Thur est un excellent exemple et on prend bien conscience de cette particularité topographique quand on observe le débouché dans la plaine. Le centre historique de la ville de Thann est enserré entre les flancs des montagnes qui gardent l'entrée de la vallée de la Thur (figure 31). Autrefois cette topographie particulière a fait la fortune de la ville qui prélevait un droit de péage pour accéder à la vallée. Mais aujourd'hui la gestion du risque d'inondation est rendue très difficile par l'urbanisation dense et les différentes voies de communication.



Figure 31 : illustration de l'étroitesse de la vallée à Thann, vue en 3D

Les vallées vosgiennes sont non seulement très étroites, mais en plus les crues qui les traversent sont particulièrement importantes en raison de la forte pluviométrie qui touche les sommets.

Gradient pluviométrique marqué

En plaine (250 m d'altitude) les précipitations annuelles avoisinent les 600 mm, tandis que sur les sommets vosgiens (plus de 1200 m) on peut observer des cumuls annuels de plus de 2000 mm (PARMENTIER, 1999). On peut voir sur la carte ci-dessous que la répartition des précipitations décrit à peu près les courbes de niveau, ce qui indique que c'est l'altitude qui influence la pluviométrie.

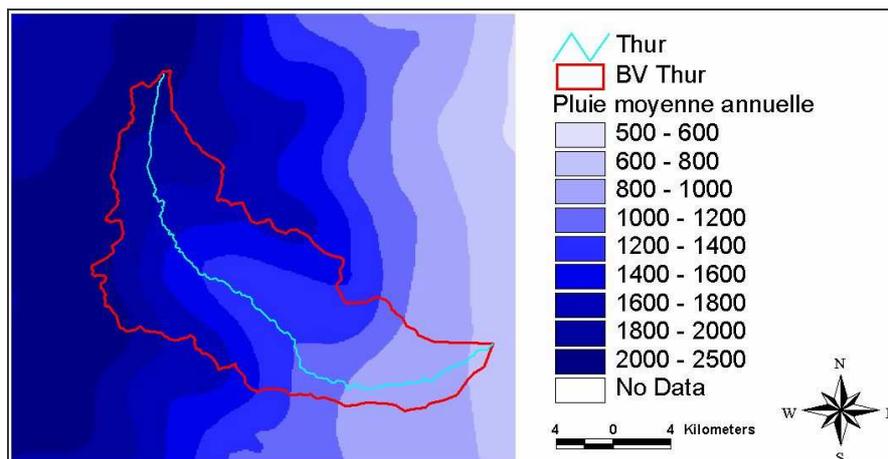


Figure 32 : répartition de la pluviométrie annuelle (méthode AURELHY Météo France)

On distingue également assez nettement une décroissance de l'ouest vers l'est. Le massif vosgien a un effet important sur la répartition de la pluie dans les vallées vosgiennes.

Effet de fœhn et neige

Lorsque les précipitations sont liées à un flux d'ouest, il peut y avoir un effet de fœhn important sur le relief (figure 33).

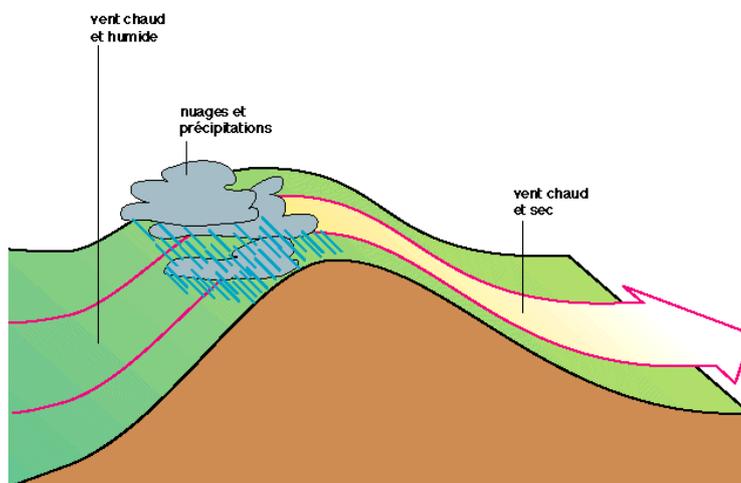


Figure 33 : effet de fœhn sur un massif montagneux

Sous l'effet du relief, la masse d'air remonte le long du versant et se charge en humidité. Les précipitations sont très fortes en altitude tandis que le versant sous le vent est balayé par un air chaud et sec. Lorsque ce phénomène se produit sur les Vosges, le gradient pluviométrique est particulièrement marqué (PAUL, 1981).

Certaines crues fortes observées dans les vallées vosgiennes surviennent lorsque la neige est présente en abondance sur les sommets et qu'un effet de fœhn se produit. On assiste alors à une fonte très rapide du manteau neigeux sous l'effet de pluies intenses et d'une remontée brutale des températures. Il est assez difficile de séparer l'influence de la fonte du manteau neigeux de celle de l'intensité de la pluie, toutefois il est évident que la fonte de neige a un impact plus fort dans le haut bassin qu'à l'aval. Les différentes études menées sur le sujet dans les Vosges (HUMBERT, 1986) ou en Bavière (SUI et KOEHLER, 2001)

montrent que la fonte de neige peut jouer un rôle significatif dans la formation des crues dans le haut bassin (altitude supérieure à 400 m), mais pas dans la vallée. On peut rappeler que 10 centimètres de neige correspondent à 10 mm de pluie, tandis que le cumul pluviométrique enregistré pour la crue de 1990 par exemple dépassait les 250 mm.

Les rivières vosgiennes sont assez représentatives des rivières de moyenne montagne, elles ont en effet une pente forte, un lit majeur étroit et la répartition de la pluie est complexe. Lorsque l'urbanisation de la vallée a été mal maîtrisée, les crues les plus violentes occasionnent d'importants dégâts.

1.3.1.3 L'aménagement hydraulique de la Thur

La proximité de la rivière a permis la prospérité de la vallée pendant plusieurs décennies, mais les habitants ont toujours été confrontés aux inondations. Les digues et les murs témoignent des tentatives de protection des riverains de la Thur. Un barrage réservoir a été construit pour atténuer l'ampleur des crues.

Historique des inondations

L'histoire de Thann a été marquée par les crues de la Thur (d'après J. BAUMANN *in* L'ALSACE (1990)). Au début du XVIII^e siècle la ville a été touchée par de fortes crues : en mai 1700 et en avril 1702. En décembre 1717 la Thur emporte un pont et deux personnes périssent noyées. En décembre 1729, en janvier 1735, en août 1740, puis en mars 1751 il y eut également de grandes crues. En octobre 1778 la Thur détruisit un pont, emporta l'hôtel de ville, 11 maisons et en endommagea 4 autres. En 1781 à nouveau les inondations furent catastrophiques, ce qui poussa le bailli François-Louis Philippe de Clebsattel à financer d'importants travaux d'aménagement de la Thur, notamment la régularisation de la rive gauche et la réparation des digues en rive droite. Un mur de rive fut construit à la fin du XVIII^e siècle pour améliorer la protection des habitants.

La fin du XIX^e siècle est marquée par l'industrialisation de la vallée et la domestication de la rivière pour alimenter les usines en énergie. Les industriels mettent en œuvre d'importants moyens pour protéger leurs investissements, comme en témoignent les nombreux murs de rive. Dès lors la vallée se trouve à l'abri des crues fréquentes et seules les crues les plus violentes occasionnent des dégâts. On peut citer les crues de 1947, 1955 et 1983 qui ont occasionné des dégâts importants (HUMBERT et CORBONNOIS, 2000). En février 1990 des crues importantes ont touché toutes les rivières vosgiennes d'Alsace (ADAM, 1998). Dans la vallée de la Thur de nombreux villages sont inondés ainsi que le centre ville de Thann (L'ALSACE, 1990) (figure 34). Les dégâts s'élèvent à plus de 26 millions de francs et on déplore un décès à Cernay.



BITSCHWILLER-LÉS-THANN. – Généralement paisible, la Thur ressemblait à un véritable fleuve.
BITSCHWILLER-LÉS-THANN. – On ne passe plus. L'eau arrive de partout et noie les sous-sols.



BITSCHWILLER-LÉS-THANN. – Les eaux de la Thur en furie envahissent la rue de la Carrière.



Figure 34 : photos de la crue de février 1990 dans la vallée de la Thur (source L'Alsace)

La période de retour de cette crue est comprise entre 20 ans à l'aval et 50 ans à l'amont. La crue a été plus forte dans le haut bassin versant qu'à l'aval en raison d'une pluviométrie beaucoup plus forte sur les sommets que dans la vallée. La violence des crues et la grande vulnérabilité de la vallée ont amené les aménageurs à multiplier les ouvrages en rivière.

Aménagements de rivière

Le tracé de la rivière a été modifié en de nombreux endroits pour permettre l'implantation des activités économiques et l'expansion des villages. Pour stabiliser le lit mineur et pour alimenter les canaux usiniers en eau, les aménageurs ont établi des seuils en grand nombre sur le linéaire de la rivière (figure 35). Pour éviter les érosions de berge et pour se protéger des inondations tout en conservant le maximum de surface constructible, des murs de berge ont été construits. Lorsque la pression foncière sur le fond de vallée était moindre, notamment à l'amont, on a préféré construire des digues de faible hauteur. Elles protègent les villages et certaines prairies des inondations les plus fréquentes. Les prés étaient irrigués par submersion au moyen de petits canaux aujourd'hui totalement disparus.

On peut noter la présence d'une « zone naturelle de divagation de la rivière » entre Thann et Cernay. Cet espace a été sauvegardé par le Conseil Général du Haut-Rhin car le cours d'eau présente encore un fonctionnement naturel du point de vue de la dynamique fluviale.



Figure 35 : les aménagements de la Thur (source Conseil Général du Haut-Rhin)

Toutes les digues ne sont pas représentées sur le schéma ci-dessus. Il faut également noter que la succession de seuils à l'aval de Cernay est liée à l'effondrement des terrains suite à l'exploitation des mines de potasse d'Alsace.

Barrage de Kruth – Wildenstein

Le barrage a été construit dans le double objectif de lutter contre les inondations et de soutenir les étiages. Il a été mis en service en 1964 et il peut contenir jusqu'à 15 millions de mètres cubes au total. Le volume de rétention utile en hiver est de 7 millions de mètres cubes. Lors de la crue de 1990 il a permis de stocker l'intégralité de la pointe de crue produite par son bassin versant d'une vingtaine de kilomètres carrés. Cela représente un débit écrêté de 20 à 30 m³/s car le barrage est situé à l'amont du bassin versant, là où la pluviométrie est la plus élevée.

Le barrage est très efficace pour la partie amont de la vallée de la Thur, car il permet d'écrêter la crue de façon significative. Plus à l'aval, la part d'écrêtement liée au barrage est relativement faible. En effet, le débit de pointe peut dépasser les 200 m³/s alors que le barrage ne peut écrêter plus de 20 à 30 m³/s. Par ailleurs, cet ouvrage est assez difficile à gérer car il doit à la fois pouvoir accueillir les crues en hiver et au printemps, mais aussi être plein dès la fin du mois d'avril pour soutenir l'étiage. Les crues qui surviennent en fin de printemps ne sont donc pas laminées par le barrage, sauf si par chance il est en vidange décennale, comme en mai 1983.

La vallée de la Thur est l'une des plus vulnérables du département du Haut-Rhin. Les zones urbaines et les infrastructures de transport sont directement menacées par des crues brèves mais violentes. La rivière est déjà fortement aménagée et son fonctionnement n'a plus rien de naturel. Il ne subsiste que quelques reliques de zones inondables actives. La vallée de la Thur constitue un bon exemple de rivière de moyenne montagne confrontée à un risque d'inondation élevé, pour lequel il faut trouver des solutions qui dépassent les approches traditionnelles.

1.3.2 Objectif n°1 : développer une méthodologie cohérente et opérationnelle

Dès le commencement du travail, nous avons attaché une grande importance à ce que la méthodologie puisse être appliquée à d'autres bassins versants par des personnes formées aux outils mais non spécialistes des modèles hydrologiques ou hydrauliques. Cet objectif implique un certain nombre de contraintes sur le choix des outils de travail. Nous allons donc expliciter les critères qui ont motivé le choix des différents modèles. La première exigence est d'assurer la cohérence de l'approche aux différentes échelles (cf. § 1.3.2.1). Dans l'objectif d'une méthodologie opérationnelle, nous privilégions des outils éprouvés et simples (cf. § 1.3.2.2). Nous avons également veillé à la maîtrise des coûts occasionnés par les études car c'est un élément important pour les élus et les citoyens (cf. § 1.3.2.3).

1.3.2.1 Assurer la cohérence de la méthodologie

Pour que la méthodologie proposée soit applicable à d'autres bassins versants, il est important de prévenir les incohérences qui peuvent naître de la juxtaposition de plusieurs modèles. Le premier souci que nous avons eu est de proportionner la précision des données et des modèles à la sensibilité des enjeux. D'un point de vue scientifique, il est important de réfléchir à la cohérence d'approches globales et spatialisées appliquées à un même bassin versant.

Précision proportionnée aux enjeux

Dans le cadre d'un travail de recherche purement scientifique, on vise souvent la précision maximale, ou du moins suffisante pour discriminer des hypothèses concurrentes. On rechigne à dégrader la précision des résultats par rapport à la précision des données compte tenu des technologies disponibles. Nous avons fait un raisonnement un peu différent puisque nous avons commencé par étudier la sensibilité des enjeux pour déterminer la précision nécessaire des modèles et des données.

Les inondations que nous avons étudiées sont des inondations par débordement. C'est le dépassement de la capacité de transit du lit mineur qui entraîne la surverse par-dessus la berge la plus basse. Ainsi, le débit de la rivière et la cote topographique des berges sont deux paramètres importants.

Le débit en crue d'une rivière de taille moyenne comme la Thur peut atteindre plus de 50 à 100 m³/s, même dans le haut bassin. Une précision de l'ordre de 10 % sur le débit de pointe est largement acceptable. Les mesures de débit de crue aux stations hydrométriques peuvent rarement prétendre à une précision supérieure en raison des difficultés d'étalonnage de la station pour les plus forts débits. D'ailleurs, certaines stations sont contournées en crue et les débits fournis dans la base de données sont en fait des débits corrigés par estimation du débit contournant la station.

La cote des berges est une donnée topographique très importante, car elle marque un seuil de fonctionnement du cours d'eau. Les données topographiques indispensables aux études hydrauliques. En terme de précision, il va de soi quand on observe les berges d'une rivière qu'il est inutile de vouloir une précision inférieure à 10 cm. En effet, la ligne de berge est loin d'être parfaitement lisse, sauf si l'on est en présence d'un mur de rive ou d'une digue très récente. De même, la hauteur d'eau dans le lit majeur n'a pas besoin d'être calculée avec une très grande précision, car en général on ne connaît pas la cote du premier plancher inondable de chaque maison et encore moins celle des installations sensibles. Nous considérons qu'une précision moyenne de l'ordre de 10 cm en altimétrie est satisfaisante (FRHYMAP, 2002). Pour que la méthodologie soit cohérente, il faut que les lignes d'eau soient calculées avec une précision comparable. Ce n'est pas évident à assurer dans le cadre d'une modélisation à grande échelle.

La résolution planimétrique des cartes d'inondation doit être proportionnée à la taille du cours d'eau et des enjeux auxquels on s'intéresse. Une rivière de taille moyenne peut être large de quelques mètres dans le haut bassin et de plusieurs dizaines de mètres à l'aval. Si on conserve la même résolution dans tout le bassin versant, il faut tenir compte de la partie amont qui est la plus limitante. On doit pouvoir distinguer le cours d'eau dans les données topographiques, pour cela une résolution de 1 à 2 mètres est souvent nécessaire. Cette résolution correspond également bien aux enjeux, puisqu'une petite maison fait en général plus de 5 m de côté. On est assuré de pouvoir la représenter avec une résolution métrique. La précision planimétrique est moins importante que la précision altimétrique, mais il est souhaitable qu'elle soit inframétrique pour assurer une bonne localisation des enjeux menacés.

Les précisions que nous affichons ici peuvent sembler minimalistes, mais nous estimons qu'elles sont d'une part suffisantes pour répondre aux enjeux de la gestion intégrée des crues et que d'autre part, elles sont assez exigeantes pour une approche à grande échelle.

Cohérence de l'approche spatialisée

La modélisation des crues peut utiliser simultanément des approches ayant un degré de spatialisation différent (figure 36) :

- Une modélisation hydraulique en régime transitoire permet de connaître le débit de la crue en tout point du bassin versant, y compris aux stations de mesures de débit.
- Une modélisation hydrologique globale effectuée à partir des données des stations de mesure permet de calculer le débit de crue pour chaque station.

La comparaison des résultats obtenus pour une même station à l'aide de deux approches différentes peut faire apparaître des incohérences.

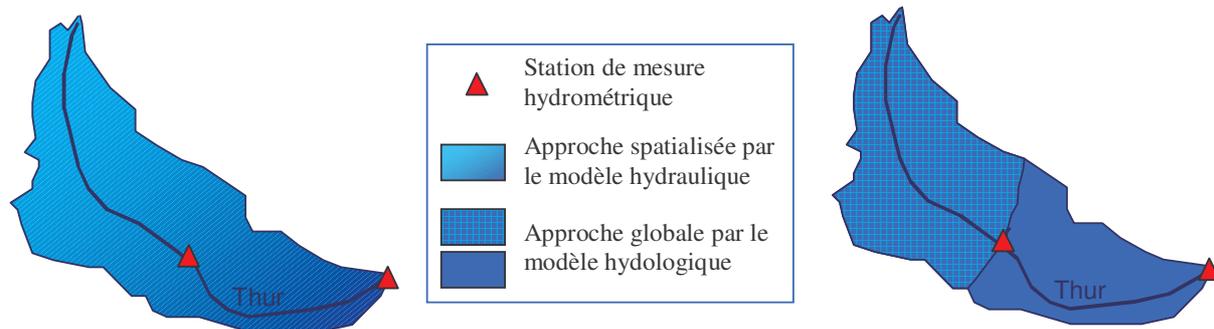


Figure 36 : comparaison des deux niveaux de spatialisation des débits par les modèles

Pour garantir la cohérence de la méthodologie, il faut s'assurer que la modélisation hydrologique globale au niveau des stations de mesure donne des résultats comparables à ceux obtenus par modélisation hydraulique. Il n'est pas évident qu'une approche globale et une approche spatialisée, utilisant les mêmes données mais des modèles différents, donnent des résultats comparables.

La précision des données et des modèles ainsi que la cohérence des approches aux différentes échelles doivent faire l'objet d'une attention particulière. Les modèles choisis seront validés au regard de leur précision, mais aussi en fonction de leur cohérence vis-à-vis des autres modèles mis en œuvre dans la méthodologie.

1.3.2.2 Utiliser des outils éprouvés et simples

Nous n'avons pas pour objectif de développer de nouveaux modèles hydrologiques ou hydrauliques. Nous pensons en effet qu'il existe déjà des modèles et des logiciels permettant de répondre à nos attentes. Nous nous sommes tournés vers des outils éprouvés exploitant des modèles simples. Nous avons également donné la préférence aux logiciels les plus conviviaux afin de faciliter le transfert de connaissances aux acteurs de terrain.

Des outils éprouvés

Par « éprouvé » nous entendons un outil qui a été utilisé avec succès dans un contexte comparable à celui des rivières de moyenne montagne. Il faut distinguer à ce stade les modèles des logiciels.

Un modèle éprouvé peut avoir été utilisé dans un grand nombre de logiciels différents. Par exemple, les équations monodimensionnelles (1D) de Saint-Venant sont à la base des modèles hydrauliques filaires utilisés dans le monde entier sous la forme de logiciels informatiques différents.

De manière générale, un modèle hydrologique éprouvé doit avoir fait l'objet d'au moins une publication dans une revue internationale d'hydrologie. Les modèles hydrologiques peuvent être empiriques, conceptuels ou à base physique. Ces modèles peuvent également être spatialisés, semi-spatialisés ou globaux, c'est pourquoi il existe un très grand nombre de modèles hydrologiques dans le monde. Une synthèse sur les modèles globaux (PERRIN, 2000) a montré la qualité des modèles conceptuels globaux et leur bonne

transposabilité. Nous avons dès le départ orienté nos recherches vers les modèles conceptuels globaux, car ils sont largement utilisés et ont été validés dans des contextes très variés, y compris dans le cas des rivières de moyenne montagne.

La mise en forme informatique d'un modèle est un logiciel, celui-ci représente l'interface entre l'utilisateur et le modèle, il lui permet d'entrer les données, de choisir les options et les paramètres, puis d'effectuer les calculs. Un logiciel éprouvé est une application informatique qui met fidèlement en œuvre le modèle choisi. Les algorithmes doivent avoir été vérifiés et il doit offrir une bonne stabilité à l'utilisation. Il est également très utile qu'il prévienne le modélisateur des erreurs ou des incohérences de la simulation. S'il existe un grand nombre de modèles hydrologiques performant dans le monde, il n'en va pas de même pour ce qui est des logiciels. Le plus souvent les laboratoires d'hydrologie ne disposent pas des compétences informatiques, ni des moyens financiers nécessaires au développement d'un logiciel totalement opérationnel. Par ailleurs, les modèles étant en constante amélioration, il est difficile de développer un logiciel à la fois très stable et évolutif. Dans le cadre d'une méthodologie opérationnelle, nous avons été attentifs à la qualité du logiciel, ce qui a fortement limité le nombre de modèles utilisables.

Des modèles simples

Pour qu'un utilisateur non spécialiste puisse appliquer la méthodologie, il est important qu'il comprenne les principes de modélisation retenus. C'est dans cet objectif que nous avons retenu des modèles dont l'architecture est simple à comprendre. Nous avons fait le choix d'utiliser les mêmes modèles pour le travail de recherche et le transfert opérationnel de la méthodologie. Ce choix limite en partie les développements scientifiques, mais il assure un outil opérationnel performant pour lequel l'étude de cas constitue un test grandeur nature.

Un modèle hydraulique 1D est la façon la plus simple de modéliser un écoulement en rivière. On considère que toute l'eau s'écoule dans une même direction, parallèlement à l'axe du cours d'eau. La géométrie de la rivière est décrite par les profils en travers qui coupent perpendiculairement l'écoulement.

Les modèles hydrologiques peuvent être plus ou moins complexes à décrire. Dans le cas des modèles conceptuels, l'architecture du modèle est basée sur des réservoirs. Le fonctionnement du modèle est donc assez facile à comprendre, même si on ne peut pas toujours donner un sens physique aux réservoirs ou aux paramètres. Parmi les modèles conceptuels, certains utilisent un grand nombre de réservoirs et de paramètres, tandis que d'autres en utilisent le moins possible, ils sont dits « parcimonieux ». Nous avons privilégié les modèles parcimonieux, car il est plus simple de tester leur sensibilité aux différentes valeurs des paramètres et ainsi de donner des repères aux utilisateurs non spécialistes.

Des logiciels conviviaux

Un logiciel convivial est un logiciel facile à utiliser et à prendre en main. Les logiciels qui fonctionnent sous d'anciens systèmes d'exploitation comme MS-DOS ne sont pas conviviaux car ils ne proposent pas d'interface moderne entre l'utilisateur et le modèle. Nous avons donc privilégié les logiciels fonctionnant sous Windows ou Linux.

Un logiciel est par ailleurs d'autant plus facile à prendre en main qu'il existe un manuel d'utilisation et une notice technique. Le mieux étant de disposer en plus de fichiers d'exemples. Les logiciels commerciaux proposent le plus souvent ces facilités, mais il est plus rare de trouver ceci pour des logiciels libres de droits.

Un bon logiciel technique doit également permettre une visualisation approfondie des résultats des simulations pour que l'utilisateur puisse vérifier la qualité de la modélisation. Ce type de fonctionnalité est assez long à programmer, c'est la raison pour laquelle beaucoup de logiciels se contentent de fournir les résultats sous forme de fichiers texte dont l'exploitation est possible avec un tableur.

Les logiciels les plus conviviaux à utiliser sont ceux qui permettent, en plus d'une visualisation rapide, des échanges facilités avec d'autres logiciels. Lorsqu'on désire associer plusieurs modèles dans le cadre d'une méthodologie, les échanges de données entre les modèles doivent être facilités au maximum et les logiciels qui permettent cela ont un atout majeur.

Les modèles utilisés doivent être validés dans le contexte des rivières de moyenne montagne. Leur fonctionnement doit être aussi simple que possible pour qu'il soit facile à comprendre par un non spécialiste. Les logiciels qui mettent en œuvre ces modèles doivent être stables et, si possible, conviviaux et interactifs.

1.3.2.3 Maîtriser les coûts des études

Pour que la méthodologie soit opérationnelle, il faut qu'elle puisse être mise en œuvre à un coût économiquement acceptable pour la collectivité. L'étude peut être menée soit par les services techniques de la collectivité, soit par un bureau d'étude spécialisé. Dans les deux cas l'un des postes de dépense les plus importants est l'acquisition des données. On doit aussi tenir compte du coût d'acquisition des logiciels. Un autre poste de dépense important est le temps de travail nécessaire à la modélisation, car les études hydrologiques et hydrauliques mobilisent un personnel qualifié.

Coût des données hydro-météorologiques

En France, les données hydrologiques et météorologiques sont accessibles depuis des bases de données dont l'accès est payant. La Banque Hydro est gérée par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable et Climathèque est gérée par Météo France. Les utilisateurs ne payent pas le coût réel de la donnée, mais le coût de sa mise à disposition. Pour la recherche et l'enseignement, des conventions permettent un accès quasiment gratuit, mais l'exploitation des résultats et leur publication est encadrée. Le coût d'acquisition de ces données est pour ainsi dire incompressible. Le choix du pas de temps de l'étude (journalier ou horaire par exemple) a une répercussion immédiate sur le coût de l'étude, notamment pour les données pluviométriques. Il convient d'adapter l'approche au contexte de l'étude. Dans le cas des rivières de moyenne montagne, les crues sont très rapides, il est donc indispensable de travailler au pas de temps horaire. Pour les données hydrométriques on utilise le pas de temps variable, ainsi quand le débit varie peu on achète peu de données, par contre on a un pas de

temps plus fin pendant des crues. Le coût d'acquisition d'une année à pas de temps variable est indicatif (tableau 1). L'utilisation de données pluviométriques à pas de temps horaire est limitée par le faible nombre de stations automatiques existantes. En général on dispose de moins de 10 années de données de pluie horaires et d'un seul poste dans le bassin versant, alors que les données journalières sont disponibles sur au moins trente années et plusieurs postes.

Type de donnée	Durée et pas de temps	Coût au 01/01/2004
Météorologie	1 année au pas de temps horaire	325 €
	1 année au pas de temps journalier	14 €
Hydrologie	1 année à pas de temps variable	environ 15 €
	1 année au pas de temps journalier	0,33 €

Tableau 1 : coût indicatif d'acquisition des données hydro-météorologiques

Le coût d'acquisition des données hydro-météorologiques est en général dérisoire en regard du coût d'acquisition des données topographiques.

Coût des données topographiques

Le coût varie beaucoup en fonction de la méthode de lever choisie. Il en existe trois principales dont vous trouverez une description plus détaillée au chapitre 2.3.2 :

- Le lever terrestre, qui est la méthode traditionnelle : un géomètre relève manuellement la cote du terrain naturel au moyen d'un théodolite ou d'un GPS. Les levés pour les études hydrauliques se font en général par profils en travers plus ou moins espacés. Les ouvrages hydrauliques sont levés également.
- La photogrammétrie, qui consiste à déterminer l'altitude des lignes de rupture de pente à partir d'un couple stéréoscopique de photos aériennes. Cette méthode peut être automatisée, mais elle ne permet pas de déterminer l'altitude du terrain naturel lorsqu'il est masqué par la végétation. Les ouvrages hydrauliques et les zones cachées par la végétation doivent être levés manuellement.
- Le lever laser aéroporté, qui est une technique nouvelle permettant d'obtenir l'altitude du terrain naturel y compris sous la végétation. Ces levés doivent être complétés par le lever terrestre des ouvrages et parfois la bathymétrie.

Les levés photogrammétrique et laser produisent un semis de points régulier qu'on appelle Modèle Numérique de Terrain (MNT). Le coût des différentes techniques est assez difficile à comparer car le rendu n'est pas le même (CETMEF, 2001) (tableau 2).

Technique de lever	Type de rendu	Coût en 06/2001
Lever terrestre	1 profil en travers	de 100 à 300 €
Photogrammétrie	1 km ² de MNT	de 400 à 800 €
Laser aéroporté	1 km ² de MNT	de 300 à 600 €

Tableau 2 : coût indicatif d'acquisition des données topographiques (source CETMEF)

Si on considère qu'il faut en moyenne 5 à 10 profils en travers par km², on peut estimer le coût des levés terrestres entre 500 et 3000 €/km². Il faut ajouter que le coût de la photogrammétrie et du laser aéroporté dépend beaucoup de la superficie à lever. Les frais fixes sont tels que les entreprises qui proposent ces levés ne sont compétitives que s'il y a plusieurs dizaines de kilomètres carrés à lever. Nous avons mené une réflexion approfondie sur ce sujet car l'acquisition des données topographiques peut représenter plus du tiers du coût total d'une étude hydraulique (FARISSIER, 1993).

Coût des logiciels

Si la collectivité désire réaliser elle-même de telles études, il faut prévoir l'investissement dans les logiciels utiles à la mise en œuvre de la méthodologie. Il y a trois grands types de logiciels à considérer :

- Un logiciel d'hydrologie. Le marché est assez peu développé car beaucoup de modèles ont été conçus par des laboratoires de recherche et ils sont dans le domaine public. En général on y a accès gratuitement, mais il est rare de trouver des logiciels très aboutis.
- Un logiciel d'hydraulique. Il existe quelques logiciels bien implantés sur le marché et adaptés à la modélisation des écoulements en rivière. On peut par exemple citer le logiciel danois MIKE 11. Il existe également des logiciels libres de droits, dont le plus connu est HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System). Ce logiciel permet une modélisation 1D des écoulements en régime permanent ou transitoire.
- Un logiciel de SIG (Système d'Information Géographique). Ce logiciel permet de gérer différentes couches d'information spatialisée. Il existe une grande variété de logiciels commerciaux comme Arcview, Imagine, Mapinfo, Geoconcept... L'un ou l'autre de ces logiciels est en général déjà disponible dans la collectivité car les SIG sont utilisés depuis plusieurs années pour des applications très variées.

Le coût d'acquisition de chaque logiciel est très variable en fonction des options choisies, mais en général il faut compter plus de 10 000 € pour une licence monoposte. C'est pour cette raison que nous avons essayé de travailler avec des logiciels libres de droits.

Si la collectivité mandate un bureau d'étude pour réaliser le travail, il peut être intéressant de demander à ce que certains logiciels libres de droits soient utilisés. Ces logiciels sont disponibles gratuitement pour tous les bureaux d'études ainsi que pour la collectivité. Cela permet non seulement un meilleur contrôle de l'étude effectuée, mais aussi une utilisation plus facile des résultats de l'étude générale pour les études de détail ultérieures.

Temps de travail

Pour diminuer de façon significative le coût des études, il est indispensable de diminuer le temps de travail nécessaire à l'étude en évitant les tâches répétitives et les manipulations fastidieuses. La sélection d'événements de référence permet de limiter le nombre de simulations à réaliser. Nous avons également utilisé une association de logiciels qui facilite la transcription des résultats du modèle hydraulique en cartes d'inondation.

La modélisation des crues que nous proposons se veut cohérente, tant du point de vue de la précision des modèles aux différentes échelles que de la spatialisation des résultats. Nous avons été attentifs à la simplicité et à la robustesse des modèles employés, ainsi qu'à la convivialité des logiciels utilisés. Enfin, nous avons tenu compte des différents coûts occasionnés par l'étude dans le but de choisir une approche la plus économique possible. Nous avons tenu compte de ce cahier des charges à chaque étape de l'élaboration de la méthodologie.

1.3.3 Objectif n°2 : proposer une aide à la décision

Les études de risque d'inondation ont en général comme objectif la cartographie du risque pour aboutir à un zonage réglementaire de type PPR (Plan de Prévention des Risques). Cette approche permet d'informer la population sur le risque d'inondation et de réglementer l'urbanisation du lit majeur. Le zonage réglementaire peut soulever des questions ou des oppositions de la part de la population. Il faut donc être en mesure d'expliquer ce qui a motivé le classement en zone à risque et, si possible, proposer des solutions techniques à ce problème. Dans une première partie, nous montrons que les modèles peuvent constituer un support pédagogique pour expliquer la cartographie du risque (cf. § 1.3.3.1). Ensuite, nous proposons de compléter le diagnostic du risque par une approche prospective pour l'aide à la décision (cf. § 1.3.3.2). Enfin nous mettons en évidence le besoin d'une modélisation plus souple, permettant d'intégrer des scénarios de prospective variés (cf. § 1.3.3.3).

1.3.3.1 La modélisation comme support pédagogique

Avant de nous intéresser à la gestion intégrée du risque d'inondation, nous avons travaillé sur la cartographie du risque dans la basse vallée de la Thur, à l'aval du secteur étudié dans le cadre de la thèse (KREIS, 2001). Nous avons communiqué les résultats obtenus aux élus dans le cadre d'une réunion de syndicat de rivière. Cela nous a permis de mieux comprendre les attentes des acteurs. Ils apprécient tout particulièrement d'être associés à la construction de la cartographie.

Une méthodologie simple présentée pas à pas

La cartographie du risque que nous avons mise en œuvre sur la basse vallée de la Thur se voulait la plus simple possible. Nous avons utilisé la définition traditionnelle du risque qui consiste à comparer l'aléa et la vulnérabilité en un même point.

Pour présenter la cartographie de l'aléa, nous avons expliqué en termes simples la méthodologie suivie et l'enchaînement des différents modèles. La démarche est simple car elle peut être décrite pas à pas. Les modèles hydrologique, hydraulique et cartographique s'utilisent l'un après l'autre, en totale indépendance. Cela facilite la compréhension de la cartographie proposée.

Nous avons montré que la carte de vulnérabilité avait été établie objectivement, à partir de cartes d'occupation des sols dérivées d'images satellites. La comparaison du degré

d'aléa et du degré de vulnérabilité par l'intermédiaire d'un système d'information géographique (SIG) permet de proposer une cartographie objective du risque.

La présentation pas à pas de la méthodologie employée et la simplicité de la démarche permettent aux acteurs de s'approprier la cartographie du risque. Ils ne considèrent plus le zonage réglementaire comme une sentence, mais comme une estimation objective et réaliste de leur situation face aux crues.

La satisfaction de comprendre

Un acteur local connaît bien la rivière dont il a la charge car il la côtoie en toute saison, mais il a rarement une connaissance théorique approfondie. C'est pour cette raison qu'il faut adapter le discours scientifique au public informé, notamment lorsqu'on présente une approche abstraite comme la modélisation informatique. Le choix de modèles de conception simple permet de faciliter le transfert de connaissance en s'appuyant sur la perception pratique des acteurs.

Il est souhaitable que la présentation des modèles donne aux acteurs le sentiment d'avoir compris leur principe de fonctionnement (DE VAULX, 2002). Si cet objectif est atteint, la modélisation peut alors servir d'appui pédagogique pour dépasser le diagnostic.

Un modèle de rivière

Pour expliquer aux acteurs l'impact des différents aménagements de rivière et les orienter vers une gestion intégrée du risque d'inondation, il est utile de prendre du recul par rapport aux problématiques locales. Nous proposons pour cela de développer la modélisation sur une rivière générique simplifiée comparable à la rivière réelle étudiée. Ce modèle de rivière est virtuel, mais il permet de s'affranchir des enjeux locaux et des susceptibilités pour ne considérer que la gestion des volumes d'eau en crue.

La rivière n'est plus simplement un objet d'étude, elle devient elle-même un modèle à vocation pédagogique. La méthodologie que nous avons développée utilise abondamment les modèles numériques, ceux-ci peuvent servir de support pédagogique pour communiquer avec les acteurs locaux. Rappelons que cet objectif pédagogique rejoint un objectif purement scientifique (cf. § 1.2.3.4).

1.3.3.2 Une approche prospective

Dès lors que les acteurs ont bien compris le diagnostic, la première question qu'ils posent est : « Que peut-on faire ? ». C'est pour répondre à cette question que nous avons développé la méthodologie présentée ici. La première idée qui vient à l'esprit d'un ingénieur en hydraulique fluviale est de tester l'impact d'aménagements, comme l'endiguement ou bien la réouverture des champs d'expansion de crue. Cependant, l'évolution du risque dans un bassin versant n'est pas liée uniquement aux aménagements hydrauliques, il faut envisager les mutations à long terme et pour une large gamme de facteurs : c'est une approche prospective.

Définition de la prospective

Le Grand Dictionnaire Terminologique définit le terme *prospective* comme suit :

« *La prospective est une prévision active qui se propose d'influer sur l'avenir à long terme. Elle consiste à dégager les lignes prévisibles d'évolution d'une situation donnée et à étudier les mesures propres à l'infléchir dans un sens délibéré. Les décisions concernant l'aménagement du territoire, la natalité, l'emploi, etc., sont de nature prospective à plus ou moins long terme. Un plan quinquennal, décennal... est par nature « prospectif », et fait appel aux « prospectivistes ». Le terme est apparu vers 1950. »*

Appliqué à la protection de l'environnement, le même dictionnaire précise :

« *Ensemble des recherches visant à formuler des futurs possibles de façon à permettre aux responsables de mieux définir leurs objectifs et les moyens de les atteindre. »*

La prospective ne se limite pas à l'étude passive de l'évolution d'un système, elle vise également à proposer des actions qui permettent d'infléchir la trajectoire du système. La prospective n'est pas une prévision de l'avenir (DE JOUVENEL, 2000), c'est un **outil d'aide à la décision** pour les acteurs. Cette démarche pluridisciplinaire nous paraît bien adaptée pour faire émerger des projets de gestion intégrée.

La prospective environnementale est une démarche constructive qui s'appuie sur des méthodes clairement explicitées (méthodes de scénarios, de modélisation, de consultation d'experts...) et des hypothèses sur l'évolution d'un système, dans un contexte décisionnel controversé (MERMET et POUX, 2002).

Jeu de trajectoires complexes

Le risque d'inondation ne dépend pas d'un seul paramètre, il fait intervenir un certain nombre de facteurs dont l'évolution est plus ou moins indépendante.

Les aménagements hydrauliques modifient le risque de façon directe. C'est le cas des digues qui permettent d'isoler les habitations de l'inondation. Mais ils peuvent également modifier les crues à l'aval du secteur aménagé ou bien la morphologie du cours d'eau. Ces impacts indirects doivent être pris en compte pour que la prospective soit valable à long terme et à grande échelle.

Le changement climatique est une préoccupation nouvelle des hydrologues. On ne sait pas encore quelles seront les conséquences à l'échelle régionale, mais on commence à entrevoir les évolutions probables de la pluviométrie. Ce changement va avoir une conséquence directe sur les débits de crue, mais il faut également tenir compte des autres interactions possibles, comme l'augmentation de l'évapotranspiration, l'état de saturation des sols, l'évolution des températures et du manteau neigeux...

La société est également en perpétuelle évolution. On doit tenir compte de l'augmentation de la population, de l'évolution de l'urbanisation, des réglementations futures et même de l'évolution du rapport de l'homme à la nature. La culture du risque a beaucoup évolué, ce qui modifie la perception du risque.

Face à une telle variété de facteurs aux évolutions incertaines et interdépendantes, il est impossible d'envisager une prospective unique. Nous proposons de définir des scénarios

d'évolution simples mais variés, afin de dresser plusieurs tableaux du futur en fonction des contraintes extérieures au bassin versant et des choix d'aménagement.

Choix de scénarios exploratoires

Pour mieux comprendre l'impact des différents facteurs, tels que le changement climatique, les aménagements ou l'urbanisation, nous avons choisi d'étudier des scénarios ne faisant intervenir qu'un seul changement à la fois. Par exemple, pour tester l'impact du changement climatique on raisonne à urbanisation constante et sans nouvel aménagement. De même, lorsqu'on veut tester un schéma d'aménagement, on fait une hypothèse de stationnarité des conditions hydrologiques.

Dans la réalité il y a un ensemble de facteurs qui interviennent et leurs effets peuvent se cumuler comme ils peuvent se compenser. Nous avons tenté de mettre en évidence ces interrelations dans la critique des résultats, à défaut de pouvoir en tenir compte dans les modèles.

1.3.3.3 Une modélisation plus souple

Le but initial de la modélisation est de reproduire le plus fidèlement possible le fonctionnement du système auquel on s'intéresse. Dans le cas d'une approche prospective, on fait évoluer les modèles pour qu'ils anticipent le fonctionnement du système modifié selon des scénarios plus ou moins complexes. Les modèles doivent pouvoir intégrer des modifications prospectives, ce qui peut être difficile quand on ne peut pas définir *a priori* l'évolution des paramètres ou des données d'entrée.

Paramètres d'un modèle

Un même modèle peut s'adapter à des objets d'étude différents à condition d'adapter ses paramètres à chaque cas particulier. Nous traitons de problèmes où certains paramètres ne sont pas directement mesurables et nécessitent donc un calage. La première phase de modélisation est le calage du modèle. Le but du calage est de trouver le jeu de paramètres qui permet la reproduction la plus fidèle possible du fonctionnement du système étudié. Cela nécessite de disposer de suffisamment d'observations pour comparer les données observées et les résultats de la simulation. Un modèle calé permet de reproduire fidèlement les événements avec lesquels a été effectué le calage, mais pas nécessairement tous les événements. Le modèle doit être validé.

La validation consiste à tester la performance du modèle en utilisant le jeu de paramètres obtenu par calage pour simuler un événement observé différent de ceux utilisés pour le calage. Si la performance du modèle est satisfaisante, le modèle est dit validé. Il peut alors être utilisé en prédiction pour simuler des événements variés.

L'utilisation traditionnelle des modèles est basée sur la définition d'un jeu de paramètres optimal (voire de plusieurs jeux de paramètres). Lorsqu'on veut modéliser le fonctionnement d'un système modifié, on ne sait pas quel nouveau jeu de paramètres retenir. Le recours aux tests de sensibilité peut aider à mieux définir *a priori* les paramètres du modèle.

Test de sensibilité à la valeur des paramètres

Lorsqu'on veut comprendre comment fonctionne un modèle il est intéressant de tester sa sensibilité aux différentes valeurs de paramètres. Si le modèle possède peu de paramètres, il est assez rapide de définir quelques jeux de paramètres qui décrivent toute la plage de variation de chaque paramètre. Si le modèle comporte un nombre important de paramètres, il est plus simple de faire varier un seul paramètre en laissant les autres fixes.

Le test de sensibilité permet de savoir quels sont les effets produits par chaque paramètre. Ainsi, lorsqu'on veut modifier le modèle pour qu'il intègre un nouveau comportement, il sera plus simple d'identifier le paramètre à modifier. On pourra également adapter plus sûrement l'amplitude de la variation du paramètre à l'amplitude de l'effet attendu.

Un modèle dont on connaît bien la sensibilité permettra de simuler les modifications recherchées dans le cadre d'un scénario de prospective. Toutefois, le modèle ne peut pas prendre en compte toutes les modifications. Selon son principe ou selon sa structure, il y aura des phénomènes dont il ne pourra pas tenir compte. Par ailleurs, lorsqu'on travaille en prospective on ne peut pas effectuer de calage ni de validation, c'est pourquoi il est souhaitable de porter un regard critique sur les résultats obtenus. La prospective permet de dégager des tendances, ce n'est pas un outil de prévision.

Séparation des processus

Les modèles opèrent souvent une globalisation de processus. Par exemple, les modèles pluie-débit globaux représentent à la fois la production et le routage des crues. Il importe de choisir un niveau de globalisation compatible avec leur utilisation en prospective. Il est en effet plus facile de tester des scénarios de prospective lorsqu'on utilise des modèles de processus séparés, car les modifications apportées à l'un des modèles n'ont pas de répercussions sur les autres. Dans la réalité il y a des interactions entre les différents systèmes qu'il est difficile de reproduire avec les modèles numériques. Nous avons choisi des modèles relativement indépendants, mais nous aborderons souvent cette question par la suite. La géomorphologie nous est apparue comme l'une des interrelations les plus fortes. Le choix des événements de référence a également une grande importance.

La méthodologie que nous avons développée a pour but de dépasser une simple approche diagnostique. Nous voulons que les modèles utilisés participent avec pédagogie à l'information des acteurs sur le risque d'inondation. Les modèles doivent également être en mesure de donner un aperçu des évolutions possibles du risque d'inondation dans le cadre de scénarios prospectifs variés. Cette approche exploratoire des futurs possibles doit permettre l'aide à la décision auprès des acteurs afin de les orienter vers une gestion intégrée du risque d'inondation.

Les inondations apparaissent souvent comme un fléau contre lequel il faut lutter, mais dans l'objectif d'une gestion intégrée des cours d'eau on doit tenir compte de leurs aspects bénéfiques pour les hydrosystèmes. Une modélisation des crues à grande échelle et cohérente permettrait d'établir un diagnostic fiable du risque d'inondation, ainsi qu'une approche prospective aidant les élus dans la prise de décisions.

Partie 2 :

Méthodologie et modèles

2.1	ARCHITECTURE DE LA METHODOLOGIE	93
2.1.1	OBJECTIFS DE LA MODELISATION	93
2.1.2	PROCESSUS ET MODELES ASSOCIES	101
2.1.3	ORGANISATION DES MODELES	109
2.2	APPROCHE EVENEMENTIELLE SPATIALISEE DES CRUES	117
2.2.1	CHOIX DU MODELE PLUIE-DEBIT	117
2.2.2	LA METHODE SHYPRE	125
2.2.3	SELECTION DES EVENEMENTS DE REFERENCE	135
2.3	CARTOGRAPHIE DE L'ALEA A GRANDE ECHELLE	144
2.3.1	CONSTRAINTES DE MODELISATION ET CHOIX DU MODELE	144
2.3.2	ACQUISITION DES DONNEES TOPOGRAPHIQUES	152
2.3.3	MODELISATION DE L'ALEA ET CARTOGRAPHIE	170

2) Méthodologie et modèles

La méthodologie a été développée dans le contexte des rivières de moyenne montagne pour répondre aux nouveaux enjeux de la gestion intégrée des crues. La méthodologie s'appuie sur une modélisation dont l'architecture comprend plusieurs modèles échangeant des données variées. Nous avons été particulièrement attentifs à la cohérence de l'ensemble et à son caractère opérationnel. La modélisation permet une description fine de l'aléa inondation, mais elle doit également pouvoir intégrer les modifications envisagées dans les scénarios de prospective. L'objectif de cette partie est de présenter l'architecture de la méthodologie (cf. chapitre 2.1), puis l'approche événementielle spatialisée que nous avons menée (cf. chapitre 2.2) et enfin la cartographie des crues à grande échelle (cf. chapitre 2.3).

2.1 Architecture de la méthodologie

Pour construire l'architecture de la méthodologie, nous avons commencé par fixer les grands objectifs de la modélisation qui doit servir de base au diagnostic et à la prospective (cf. § 2.1.1). La déclinaison des différents processus qui mènent à l'inondation permet de choisir des modèles adaptés (cf. § 2.1.2). L'organisation technique et spatiale des modèles (cf. § 2.1.3) doit garantir la performance et la cohérence de la cartographie des crues.

2.1.1 Objectifs de la modélisation

Une des exigences de la gestion intégrée est l'approche par bassin versant. On se propose de modéliser un phénomène variable dans l'espace et dans le temps. Nous insistons sur la spatialisation (ou approche distribuée) qui est au cœur des problématiques scientifiques du travail (cf. § 2.1.1.1). Nous étudions également les crues de fréquence rare : leur prédétermination est complexe et nous en rappelons les principes (cf. § 2.1.1.2). Enfin, la modélisation doit pouvoir intégrer les modifications étudiées dans les scénarios de prospective, nous en présentons différents types (cf. § 2.1.1.3).

2.1.1.1 Approche spatialisée

Une crue ne peut pas être décrite à partir d'un seul point d'observation ou à un instant donné car c'est un phénomène variable dans l'espace et dans le temps. Or, les observations

hydrologiques classiques sont ponctuelles et donc localisées. Avant de préciser le processus d'élaboration d'une crue, il convient de définir les grandeurs utiles à représenter.

Variabilité spatio-temporelle des crues

Pour décrire un phénomène qui varie à la fois dans l'espace et dans le temps, on peut utiliser un observateur virtuel qui décrit le phénomène.

- Considérons dans un premier temps un observateur fixe, posté à un endroit donné le long du cours d'eau. Il perçoit la variabilité temporelle du débit de la rivière et de la hauteur d'eau. La variation du débit au cours du temps est appelée hydrogramme de crue (figure 37). Ce schéma peut aussi être décrit par une chronologie de processus.

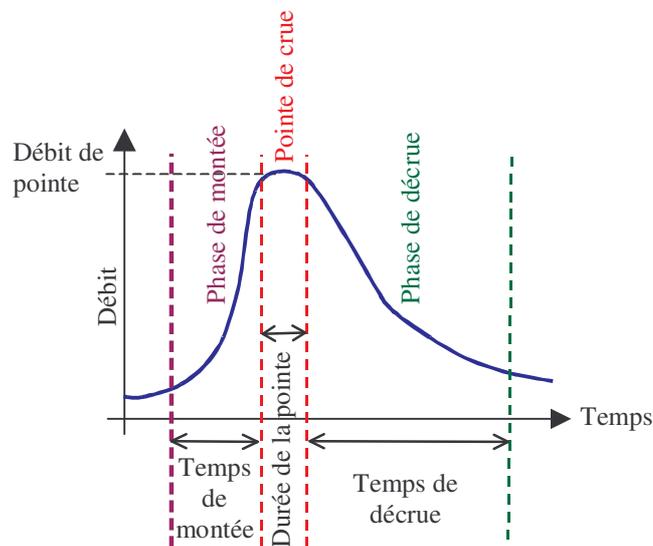


Figure 37 : les différentes phases d'une crue décrites par un hydrogramme

Au plus fort de la crue, le débit maximal de la rivière est appelé débit de pointe de la crue. Le débit de la rivière varie en permanence tout au long de la crue. La pointe de la crue correspond à un laps de temps limité, et difficile à définir précisément, par rapport à la durée totale de l'événement.

- Si on considère un observateur qui se déplace le long du cours d'eau, à la même vitesse que l'onde de crue, il décrit la variabilité spatiale du phénomène.

L'onde de crue se déplace le plus souvent de l'amont vers l'aval du bassin versant. Si l'observateur se déplace à la même vitesse que l'onde de crue, il constate que le débit de pointe augmente au fur et à mesure que les différents affluents viennent alimenter le cours d'eau principal.

La variabilité à la fois temporelle et spatiale de la crue implique qu'on ne peut pas la décrire complètement en un seul lieu et à un instant choisis *a priori*. Dans le cas des rivières de moyenne montagne, la variabilité spatio-temporelle est forte car les bassins versants sont plus hétérogènes en terme de géologie et de pluviométrie. Pour décrire un événement de crue en tout point du bassin versant une approche spatialisée est nécessaire, or la plupart des données disponibles sont localisées.

Des données localisées

Pour modéliser une crue, on utilise au moins deux types de données :

- Les stations limnimétriques, ou stations de jaugeage, mesurent la hauteur d'eau h dans le cours d'eau en continu. Elles permettent d'estimer le débit Q de la rivière par l'intermédiaire d'une courbe de tarage ($Q = f(h)$). Les courbes de tarages sont établies, par exemple, par mesure du profil de vitesse au travers de la section au moyen de moulinets. Le calcul du débit est moins précis pour les crues les plus fortes car, en l'absence de mesures pendant la crue, on extrapole la courbe de tarage. Selon l'emplacement de la station, une partie du débit peut ne pas être pris en compte. Les hydrogrammes des crues les plus fortes sont alors corrigés par une estimation du débit réel. Les stations limnimétriques sont implantées dans le bassin versant de manière à décrire régulièrement le débit de la rivière et de ses principaux affluents.
- Les stations météorologiques sont disséminées dans tout le bassin versant. Elles mesurent la pluviométrie, mais aussi la température, l'humidité de l'air... Le pas de temps de la mesure est le plus souvent journalier, avec un relevé des données manuel. Ce pas de temps est suffisant pour étudier la ressource en eau ou les crues des grands bassins versants. Les données à pas de temps horaire sont rares car il existe assez peu de stations automatiques.

Dans le cas de la vallée de la Thur, on dispose de 3 stations limnimétriques de bonne qualité, y compris en crue (figure 38). Deux d'entre elles mesurent le débit de la Thur et la troisième le débit du Wissbach, un petit affluent. Cette répartition est très intéressante car elle permet de décrire le débit pour 3 tailles de bassin versant : 25, 160 et 260 km². Nous verrons plus loin de quelle manière nous pouvons exploiter cette particularité.

Il y a également un grand nombre de stations météorologiques, mais une seule est automatique (entourée en rouge sur la figure 38) et permet d'obtenir la pluviométrie à pas de temps horaire. Les autres stations horaires du département sont trop éloignées pour être représentatives. Les crues de la Thur durent en général moins de 48 heures, les données de pluie journalières sont donc peu utilisables.

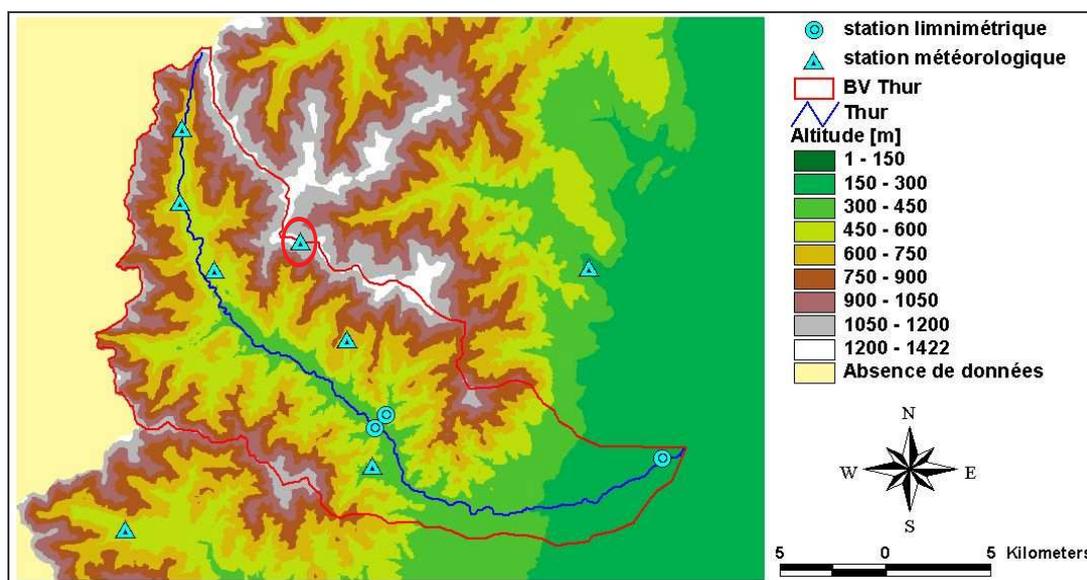


Figure 38 : carte de localisation des stations de mesure

On dispose de chroniques de débit à pas de temps variable longues d'une trentaine d'années, mais les données de pluie à pas de temps horaire ne sont disponibles que sur 8 années. L'approche spatialisée sera donc développée à partir d'une information pluviométrique unique et d'un historique limité.

Cartographie des crues

La carte est un outil privilégié pour représenter un phénomène qui varie dans l'espace. C'est aussi le support qui permet le mieux de comparer l'inondation et les enjeux menacés (GIVONE, 1998). La spatialisation des débits aboutit au final à une cartographie des **événements de référence** ou à une synthèse des différentes enveloppes. La carte décrit avant tout l'extension latérale de la crue, mais elle peut également décrire une variable hydraulique comme la hauteur d'eau ou la durée de submersion. Une carte ne pouvant représenter qu'une variable à la fois, il faut définir celles que l'on souhaite retenir pour l'évaluation du risque.

- La hauteur d'eau est la première variable qui vient à l'esprit quand on parle d'inondation car les dommages en dépendent.
- La durée de submersion a un impact significatif sur l'endommagement des biens dans le cas d'inondations de durée supérieure à 24 heures.
- La vitesse de l'écoulement peut être une variable complémentaire pour estimer les dommages, mais nous verrons plus loin qu'elle est assez difficile à modéliser en lit majeur.
- La direction de l'écoulement est parfois représentée sous forme de vecteurs vitesse, elle nécessite l'utilisation d'un modèle hydraulique bidimensionnel.
- La force tractrice pourrait être une information utile pour situer les zones susceptibles d'être fortement érodées.

Ces variables physiques sont utiles pour décrire de façon spatialisée l'intensité de la crue, nous retiendrons en particulier la hauteur d'eau. Le premier objectif de la modélisation est de décrire le plus finement possible l'inondation à l'échelle du bassin versant. Ce phénomène étant variable dans l'espace et dans le temps, il nécessite une approche spatialisée. Pour estimer un risque il faut par ailleurs tenir compte de la fréquence de l'événement étudié.

2.1.1.2 Fréquence d'une crue et crues de fréquence rare

Comme nous l'avons présenté au paragraphe 1.2.3.1, la fréquence d'une crue doit toujours être associée à la variable décrite. Dans la suite du texte, nous parlerons toujours de la fréquence du débit de pointe de la crue. L'attribution d'une fréquence à un événement donné étant relative au débit de pointe et celui-ci variant d'amont en aval, la fréquence du débit de pointe est elle-même variable dans l'espace.

Fréquence d'un événement dans l'espace

La fréquence du débit de pointe calculée localement n'a pas de signification ailleurs dans le bassin versant. En fonction de la répartition spatiale et temporelle de la pluie, la fréquence du débit de pointe en amont ou en aval peut être différente (figure 39) :

- Une pluie intense et courte produit une crue forte dans la partie amont du bassin versant, mais modérée à l'aval. La période de retour de cet événement est donc élevée à l'amont (fréquence faible) et faible à l'aval (fréquence forte).
- Une pluie modérée, longue et généralisée produit une crue modérée à l'amont et forte à l'aval. La période de retour est donc plus élevée à l'aval qu'à l'amont.

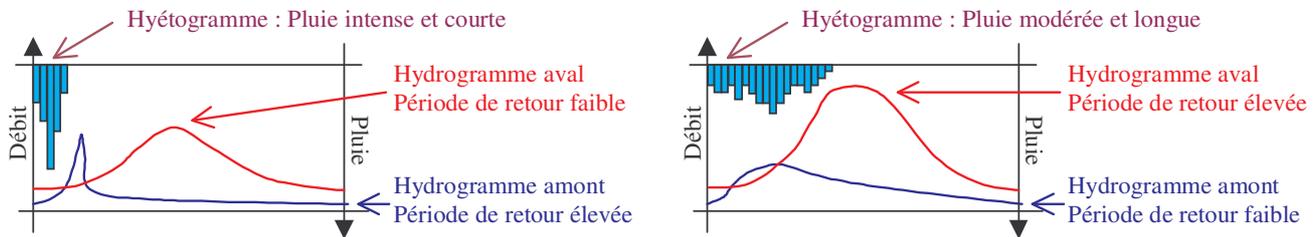


Figure 39 : influence de la structure de la pluie sur la fréquence d'une crue

La fréquence du débit de pointe d'une crue quelconque est liée au temps de concentration du bassin versant considéré. La durée de pluie la plus défavorable pour le bassin versant correspond au temps de concentration du bassin. La variabilité de fréquence est encore plus forte si on intègre la variabilité spatiale de la pluie dans le bassin versant. Par exemple, l'épisode de Nîmes d'octobre 1998 est localement de fréquence rare (presque centennal), mais si on l'observe à l'échelle du Languedoc-Roussillon, de tels épisodes se produisent en moyenne deux fois par an (MASSON et al.).

L'attribution de la fréquence de submersion en tout point du bassin versant peut s'envisager de deux manières différentes :

- Cartographier l'extension d'un grand nombre de crues et estimer statistiquement la fréquence de submersion en chaque point.
- Rechercher des événements de référence qui conservent la même fréquence en tout point du bassin versant.

Le choix entre ces deux options fait l'objet d'une discussion approfondie dans la suite du travail. La cartographie des crues rares fait appel à une prédétermination sur la base des événements observés.

Approche statistique et durée d'observation

La prise en compte des crues les plus rares nécessite une durée d'observation assez longue. En effet, d'après le calcul de la fréquence par la formule de Hazen : $F = (i - 0,5) / n$ (cf. 1.2.3.1), pour une durée d'observation n de 30 ans, la crue observée la plus forte a une fréquence de $(30 - 0,5) / 30 = 0,983$ soit une période de retour de 60 ans. Cette estimation est admise comme raisonnable en situation opérationnelle.

Les stations limnimétriques de la vallée de la Thur ont été implantées dans les années 70, ainsi les chroniques sont longues de 30 ans. Ces observations ne permettent pas d'obtenir une estimation du débit de pointe des crues de période de retour de 100 ou 200 ans par des ajustements statistiques directs.

Toutefois, l'ajustement statistique d'une loi de Gumbel à un échantillon de crues observées permet d'estimer avec une précision acceptable les crues dont la période de retour

n'excède pas trois fois la durée observée. Ainsi, avec un peu plus de trente années de mesures, on peut estimer le débit de pointe de la crue centennale, à condition de prendre en compte l'intervalle de confiance calculé sur l'échantillon (figure 40). En ingénierie on retient toujours la borne supérieure de l'intervalle de confiance qui permet de contenir toutes les données de l'échantillon.

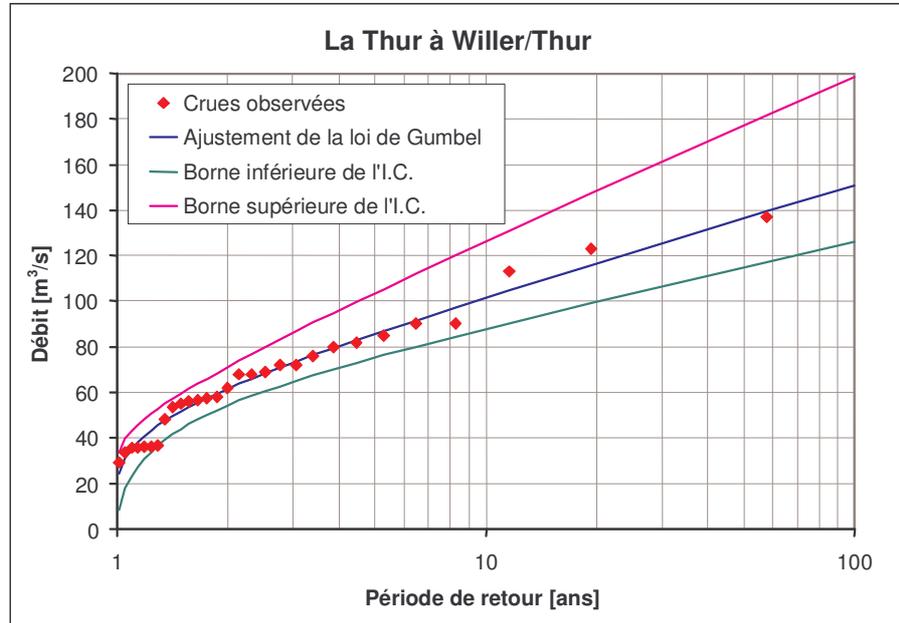


Figure 40 : ajustement d'une loi de Gumbel à l'échantillon de crues de Willer/Thur

Pour estimer le débit de pointe de crues de périodes de retour plus élevées, comme la crue bicentennale, on peut utiliser d'autres méthodes. Par exemple, la méthode du GRADEX (DUBAND et GUILLOT, 1968 ; CFGB, 1994) ou la méthode AGREGÉE (SAUQUET et al., 2003) qui permettent d'extrapoler les valeurs. Le problème de toutes ces méthodes d'ajustement statistique, c'est qu'elles permettent d'estimer le débit de pointe, mais elles ne donnent pas d'indication sur la forme de l'hydrogramme de crue. Elles sont bien adaptées pour une approche locale, mais pas pour une spatialisation des débits. Il faut donc s'orienter vers une approche qui intègre les aspects fréquentiels dans la construction des hydrogrammes.

Il existe différentes méthodes de construction d'hydrogrammes à partir de formes de crues prédéfinies (MICHEL, 1989) ou basées sur la conservation de la fréquence pour différentes durées (hydrogramme synthétique monofréquence, SAUQUET et al., 2003). Nous avons préféré une approche plus directe basée sur une simulation stochastique des pluies.

Approches stochastiques

Le Grand Dictionnaire Terminologique définit le terme *stochastique* de la façon suivante :

« Se dit des phénomènes qui relèvent de variables aléatoires, du calcul des probabilités. Stochastique s'oppose au terme déterministe. Une méthode, une analyse est dite déterministe si elle ne fait pas appel au calcul des probabilités. Le terme aléatoire est d'un emploi beaucoup plus général que stochastique même si ces deux termes sont souvent considérés comme des synonymes. »

Une approche stochastique tient compte de la distribution en fréquence des principales grandeurs (variables aléatoires) qui décrivent les événements pluvieux et les hydrogrammes, pour reconstituer par simulation des événements identiques en terme de distribution de probabilités (ARNAUD et LAVABRE, 2001a ; BLAZKOVA et BEVE N, 2004 ; LEVIANDIER et al., 2000).

Ce type d'approche permet d'enrichir l'échantillon de crues observées par un grand nombre de crues simulées qui peuvent être considérées comme équivalentes d'un point de vue probabiliste. On peut ainsi à la fois estimer avec une plus grande stabilité le débit de pointe aux fréquences rares, mais également disposer d'hydrogrammes de crue pour les événements extrêmes.

Cette approche ne permet pas directement la spatialisation, mais elle ouvre de nouvelles perspectives, car elle offre un grand choix d'événements parmi lesquels on pourra rechercher des événements de référence. La modélisation doit rendre compte des crues de fréquence rare pour offrir un diagnostic complet du risque, mais nous voulons également qu'elle soit en mesure d'intégrer les modifications envisagées dans le cadre d'une approche prospective.

2.1.1.3 Intégration des scénarios de prospective

La phase de diagnostic consiste à rechercher la meilleure modélisation possible des crues pour dresser un portrait objectif du risque d'inondation. L'intégration de modifications dans le cadre de la prospective ajoute une contrainte supplémentaire pour le choix des modèles. Ils doivent pouvoir intégrer l'évolution de l'occupation des sols, le changement climatique ou encore des aménagements hydrauliques.

Evolution de l'occupation des sols

La prospective peut dans un premier temps s'intéresser à l'évolution du risque sous la pression foncière dans la vallée. En Alsace par exemple, les vallées de moyenne montagne sont à la fois attractives du point de vue économique et du point de vue du cadre de vie. Le prix des terrains est moins cher qu'en proche banlieue et l'agriculture extensive des fonds de vallée n'entre pas en concurrence comme cela peut être le cas dans le vignoble. L'éloignement des grandes villes et la montagne toute proche offrent un environnement agréable qui attire les rurbains. La proximité de la rivière est souvent perçue comme un aspect très positif par l'agrément paysager qu'elle offre. Les vallées étant étroites et les coteaux étant raides, les vallées d'origine glaciaire comme la vallée de la Thur présentent un fond de vallée densément peuplé, notamment dans la partie aval. Aujourd'hui on observe une progression de ce front d'urbanisation vers l'amont.

Pour prendre en compte l'évolution de l'occupation des sols, il suffit de modifier la cartographie de la vulnérabilité. Ceci peut se faire indépendamment de la modélisation des crues, toutefois un scénario prospectif peut tenir compte d'une certaine régulation de la vulnérabilité par la connaissance du risque. L'utilisation d'un système d'information géographique (SIG) facilite la prise en compte de ce scénario (EPFL, 1997), c'est une raison supplémentaire pour promouvoir l'utilisation des SIG dans le cadre de la méthodologie.

Changement climatique

La prise en compte du changement climatique tant à se généraliser dans les études environnementales (MUZIK, 2002 ; MIDDELKOOP et KWADIJK, 2000 ; MENZEL et BURGER, 2002). Les conséquences régionales de ce changement global ne sont pas bien connues, mais il serait intéressant de tester des modifications simples comme une augmentation de la pluviométrie.

Pour intégrer cette modification dans la modélisation spatialisée des crues, il faut pouvoir intégrer un nouveau régime de pluviométrie. Ceci est assez facile si on utilise une modélisation stochastique, car on peut modifier la distribution statistique des variables aléatoires qui décrivent la pluie.

Cette méthode fait l'hypothèse que l'on peut modifier de façon indépendante les paramètres du modèle stochastique de pluie, ce qui est difficile à prouver, voire faux. L'interprétation des résultats doit se faire de façon vigilante.

Impact des aménagements

La méthodologie doit permettre d'éclairer les acteurs sur le risque d'inondation, mais elle doit également proposer des options d'aménagement qui permettent d'améliorer globalement la situation, tant du point de vue du risque que du point de vue des équilibres écologique et morphologique de la rivière. Les scénarios de prospective doivent explorer des options d'aménagement éprouvées ou bien innovantes dans le but de comparer leurs effets à grande échelle et à long terme (BRETON et MARCHE, 2001).

Les conséquences directes des aménagements, comme par exemple la protection d'une maison par une digue, sont faciles à prendre en compte. La géométrie de la rivière est modifiée ponctuellement et la cartographie de l'aléa intègre cette modification. Le risque est diminué localement, mais dans le cadre d'une approche intégrée il est indispensable de vérifier si cet aménagement a modifié l'aléa à plus grande échelle.

Les aménagements hydrauliques modifient principalement les conditions de laminage de la crue. Dans un modèle hydrologique, on appelle cela le routage. Pour que la modélisation tienne compte des aménagements à grande échelle, il faut que le modèle assurant le routage de la crue soit sensible aux aménagements envisagés.

La prise en compte de modifications du routage hydraulique des crues pose également la question du choix des événements de références retenus. Par exemple, un bassin de rétention est plus sensible au volume de la crue qu'à son débit de pointe. L'impact de cet aménagement peut être très variable selon l'événement retenu. Le choix de la modélisation du routage et des événements de référence est une question centrale de la thèse, nous examinerons plus en détail ces questions dans la suite du texte.

La méthodologie affiche des objectifs ambitieux tant du point de vue du diagnostic du risque que de l'approche prospective. La modélisation représente un moyen efficace pour les atteindre, mais elle doit tenir compte des exigences d'une approche à grande échelle. La cartographie de l'aléa repose sur la spatialisation des débits et sur l'estimation des crues de fréquence rare. La prise en compte des différents scénarios de prospective peut être envisagée, mais elle soulève des questions pointues sur l'indépendance des paramètres et la sensibilité des modèles, ainsi que sur le choix des événements de référence retenus pour les simulations.

Nous avons choisi des modèles qui tiennent compte de ces différents objectifs, tout en s'appuyant sur les différents processus qui génèrent les inondations.

2.1.2 Processus et modèles associés

Pour rendre la démarche de modélisation plus naturelle, nous avons choisi de décrire les processus physiques produisant la crue en même temps que les différents types de modèles existants. Ainsi nous commençons par la description de la pluie qui est, dans la grande majorité des cas, le phénomène à l'origine des crues (cf. § 2.1.2.1). La transformation de la pluie en débit (cf. § 2.1.2.2), puis l'écoulement dans la rivière (cf. § 2.1.2.3) peuvent mener à l'inondation (cf. § 2.1.2.4) dès lors que la capacité d'écoulement du lit mineur est dépassée. A cette chronologie de processus peut être associée une chaîne de modèles.

2.1.2.1 La pluie et sa modélisation

Dans le texte qui précède, nous avons déjà évoqué la répartition de la pluie dans le bassin versant et son incidence sur la fréquence des crues. La pluie est un phénomène variable dans le temps et dans l'espace.

Variabilité temporelle

En premier lieu la pluie peut être de durée très variable. La définition de la durée de la pluie est d'ailleurs elle-même variable selon le pas de temps d'observation du hyétogramme et selon ce que l'on définit comme critères pour isoler un épisode pluvieux. En effet, si on observe la pluviométrie au pas de temps journalier, il est possible d'observer fréquemment des épisodes qui durent plusieurs jours (pluie journalière non nulle plusieurs jours de suite). Si on observe le même épisode au pas de temps horaire, on constate le plus souvent que l'épisode est en fait composé de différentes averses séparées par des périodes sèches. Dans les vallées vosgiennes, les crues les plus fortes durent quelques heures, mais les épisodes pluvieux qui précèdent la crue peuvent durer plusieurs jours.

L'intensité de la pluie est également variable selon le pas de temps de l'observation. En effet, on calcule l'intensité en rapportant une lame d'eau à la durée d'observation, c'est pourquoi plus le pas de temps est long, moins l'intensité est importante. L'intensité moyenne

d'une pluie qui dure plusieurs jours est très différente de l'intensité maximale relevée pendant une heure.

Pour une durée donnée, on peut associer à l'intensité de la pluie observée une fréquence de non dépassement, comme on le fait pour les débits. On peut alors tracer des courbes IdF (intensité, durée, fréquence) (figure 41).

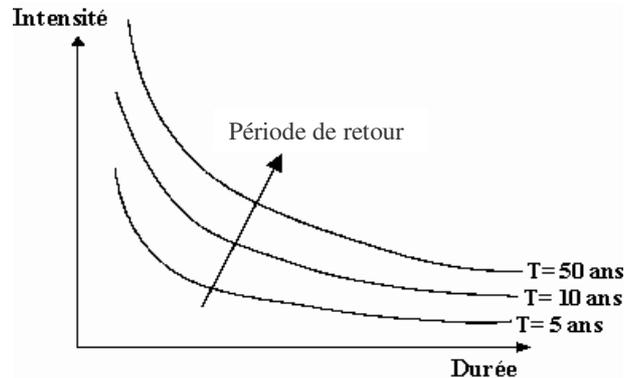


Figure 41 : exemple schématique de courbes IdF (intensité, durée, fréquence)

Cette description de la pluviométrie est très riche car elle permet d'associer une fréquence à un phénomène qui est variable dans le temps en intensité et en durée. On note que lorsque la durée augmente, l'intensité diminue.

Variabilité spatiale

Nous avons évoqué à plusieurs reprises la variabilité spatiale de la pluie et le peu d'information disponible à ce sujet dans la vallée de la Thur. Les stations météorologiques fournissant des données à pas de temps fin sont peu nombreuses et elle ne permettent de décrire que les conditions locales du site où elles sont implantées.

On peut toutefois s'appuyer sur les chroniques de pluie journalières plus nombreuses et réparties sur l'ensemble du bassin versant pour décrire la répartition de la pluviométrie moyenne annuelle (cf. § 1.3.1.2). Dans le cas des rivières de moyenne montagne, on observe souvent un gradient pluviométrique marqué en lien avec l'altitude : les courbes isohyètes épousent les courbes de niveau. Cette répartition de la pluviométrie annuelle est une indication utile, mais un épisode pluvieux particulier peut présenter une répartition totalement différente.

Pour décrire la répartition spatiale de la pluie au cours d'un événement pluvieux, il faut disposer d'images de radar météorologique. Ces instruments modernes permettent de décrire finement le champ pluvieux en cartographiant avec une bonne résolution les lames d'eau précipitées. Malheureusement, les radars météorologiques sont moins efficaces dans les zones de relief car les montagnes masquent une partie du champ pluvieux, c'est pourquoi il n'y a pas encore d'images radar sur la vallée de la Thur par exemple.

Pour tenir compte de la répartition spatiale de la pluie dans un modèle global, on crée le plus souvent une pluie de bassin. Cette pluie synthétique agrège l'information des différents postes pluviométriques du bassin versant en attribuant à chaque poste une part proportionnelle à sa représentativité spatiale. Lorsqu'on désire mettre en œuvre une approche semi-spatialisée, on crée plusieurs pluies de bassins correspondant aux différents sous bassins modélisés. La

pluie de bassin est représentative du champ pluvieux dans le cas d'épisodes généralisés à l'ensemble du bassin versant. Par contre, les épisodes localisés comme les orages d'été, sont mal représentés par une pluie de bassin.

Pour l'application à la vallée de la Thur, la modélisation de la pluie vise à reproduire des pluies de bassin à partir d'une seule série de pluies au pas de temps horaire et d'une cartographie de la pluviométrie moyenne annuelle.

Les modèles générateurs de pluie

Si on considère que la pluie est un processus stochastique, alors elle peut être décrite à partir de variables simples comme la durée de l'épisode ou l'intensité maximale sur un pas de temps. Ces grandeurs sont des variables aléatoires dont on peut définir les lois de probabilité. Chaque loi est caractérisée par des paramètres dont la valeur est calculée à partir des pluies observées (ARNAUD, 1997).

Un modèle stochastique de pluie fonctionne en générant des probabilités par la méthode de Monte-Carlo, puis en inversant la loi de probabilité pour obtenir la valeur de la variable aléatoire (figure 42). Par exemple :

On tire au hasard p entre 0 et 1

C'est une probabilité telle que $P(X=a) = p$

On cherche a : la valeur prise par la variable aléatoire X correspondant à la probabilité p .

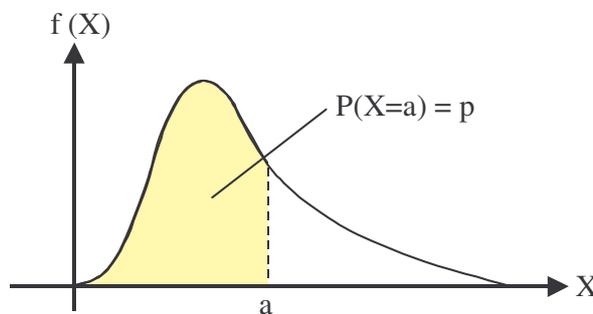


Figure 42 : inversion d'une loi de probabilité

La méthode de reconstitution d'un épisode pluvieux à partir des valeurs de variables aléatoires varie selon les modèles et le pas de temps choisis. Nous comparons ici deux méthodes, pour une synthèse bibliographique plus complète on se référera à ARNAUD (1997).

- Le hyètoگرامme à pas de temps horaire peut être généré à partir de l'agrégation de variables indépendantes : on tire au hasard la durée de l'épisode, puis on tire au hasard l'intensité de la pluie à chaque pas de temps (ARNAUD, 1997).
- La pluie totale de l'épisode peut être répartie en sous épisodes d'intensité constante : on tire au hasard la durée de l'épisode et la lame d'eau totale, puis on construit la forme du hyètoگرامme en tirant au hasard des paramètres définissant des *clusters* d'intensité constante (LEVIANDIER et al., 2000).

La première méthode est bien adaptée aux approches à pas de temps fin, pour des épisodes de durée assez courte, car l'indépendance des variables d'un pas de temps à l'autre est souvent vérifiée. La seconde méthode est plus efficace pour les épisodes de longue durée car elle ne fait pas les mêmes hypothèses d'indépendance des variables à chaque pas de temps.

La pluie est un phénomène complexe à modéliser car elle est variable à la fois dans l'espace et dans le temps. Une pluie de bassin permet de synthétiser l'information spatiale disponible. Les modèles générateurs de pluie s'appuient sur une description statistique des épisodes observés pour recréer des épisodes respectant la distribution en fréquence des grandeurs de la pluie observée. Ces modèles permettent de générer un grand nombre d'épisodes pluvieux qui doivent être transformés en débit.

2.1.2.2 La transformation de la pluie en débit

La formation des débits dans le cours d'eau résulte de la concentration d'une partie de l'eau de pluie au sein du réseau hydrographique. Les processus physiques qui aboutissent à la formation d'un débit dans la rivière sont variés. Il existe un grand nombre de modèles numériques de transformation de la pluie en débit parmi lesquels seuls quelques uns répondent aux critères que nous avons énoncés plus haut (cf. § 2.1.1).

Processus physiques de la transformation pluie-débit

Ces processus physiques obéissent principalement à la gravité : le débit se forme dans le talweg des vallées, là où s'écoule la rivière (AMBROISE, 1999). Les processus sont variés car les terrains traversés par l'eau sont hétérogènes tant du point de vue de leur perméabilité que du point de vue de leur distance au cours d'eau (figure 43a).

On distingue les écoulements de surface, ou ruissellement, des écoulements souterrains. Il est assez rare d'observer visuellement le ruissellement sur les bassins vosgiens. La perméabilité des sols est telle que se sont les zones les plus proches du cours d'eau qui alimentent la rivière par écoulement souterrain : ce sont les zones contributives. Pour une même pluie, le débit dans la rivière est variable selon l'état de saturation des zones contributives. Si les sols sont saturés en eau, la crue formée est beaucoup plus importante car la capacité de rétention de la zone contributive est moindre (figure 43b).

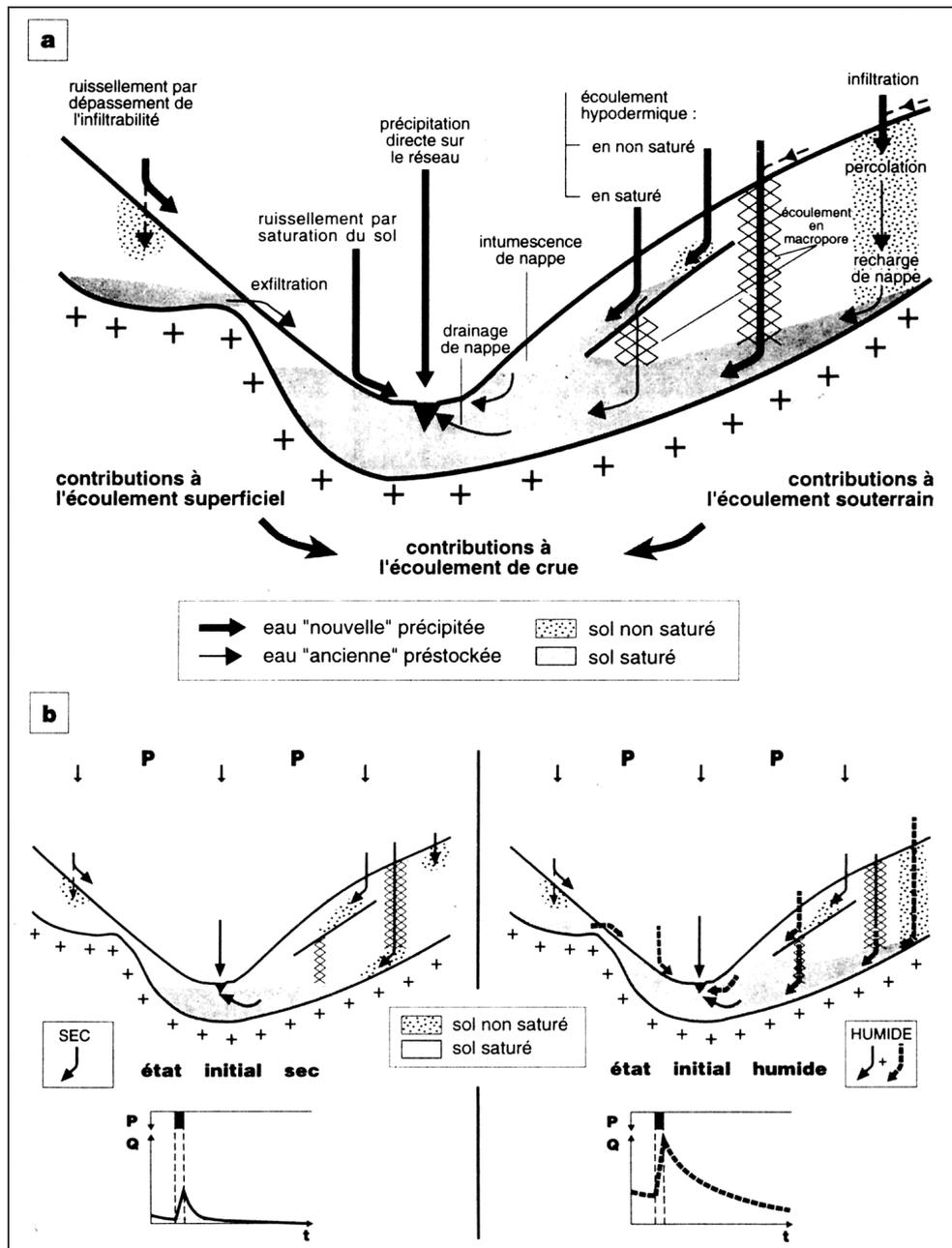


Figure 43 : processus physique de la transformation pluie-débit (source AMBROISE)

Les processus physiques de la transformation de la pluie en débit peuvent être pris en compte de manière plus ou moins détaillée dans les modèles hydrologiques. Les modèles pluie-débit sont très variés, ils peuvent être classés en différentes catégories.

Les différents types de modèles pluie-débit

AMBROISE (1999), à la suite de SINGH (1995) et MICHEL (1989), propose la classification suivante pour les modèles pluie-débit :

- **Déterministe** ou **stochastique**. Le modèle est déterministe si ses variables d'entrée et ses paramètres sont parfaitement connus. Il est stochastique si la plupart ou la totalité des entrées et des paramètres suivent une loi de probabilité.

- **Empirique** ou **physique**. Un modèle physique utilise les lois de la physique, tandis qu'un modèle empirique est un modèle de type « boîte noire » et emploie des relations mathématiques abstraites. Les modèles **conceptuels** (ou modèles à réservoirs) sont à la frontière de ces deux types de modèles.
- **Global** ou **spatialisé**. Un modèle global représente l'ensemble des processus pour produire un résultat à l'exutoire du bassin versant, tandis qu'un modèle spatialisé (ou distribué) représente les processus par petite unité spatiale et produit des résultats en tout point du bassin versant. Certaines approches sont dites **semi-spatialisées** car elles utilisent des approches globales sur plusieurs bassins versants imbriqués ou en arborescence (LEVIANDIER et al., 1994).
- **Cinématique** ou **dynamique**. Un modèle cinématique décrit l'évolution d'un phénomène dans le temps sans modification de sa propre structure, tandis qu'un modèle dynamique est capable d'intégrer des modifications de son fonctionnement.

En ingénierie hydrologique, les modèles les plus utilisés sont les modèles empiriques globaux et les modèles conceptuels globaux. Ils ont une structure simple et sont économes en paramètres (parcimonieux). Les modèles conceptuels doivent être calés à partir de données observées (PERRIN, 2000). Leur performance peut être évaluée en comparant les simulations aux données observées. On peut citer les méthodes basées sur l'hydrogramme unitaire (empirique global) (SHERMAN, 1932) et les modèles de la famille GR du Cemagref (conceptuel global).

Les modèles physiques sont par définition spatialisés. Ils ne nécessitent pas de calage car les lois physiques qui les régissent utilisent directement des données spatialisées sur la pédologie, la pente, la rugosité de surface ou la vitesse d'infiltration, dont certaines sont difficiles à obtenir. La performance de ces modèles est souvent moins bonne que celle que l'on obtient avec un modèle conceptuel global car en principe un modèle physique ne doit pas être calé. L'intérêt des modèles physiques est la spatialisation du débit et d'autres variables hydrologiques, mais leur mise en œuvre est fastidieuse et les résultats obtenus sont souvent décevants (PERRIN, 2000).

Les processus physiques qui accompagnent la transformation de la pluie en débit sont variés, tout comme les modèles qui la reproduisent. Leur approche spatiale, leur structure et le type de paramètres utilisés peuvent être très différents d'un modèle à l'autre. Nous avons privilégié les modèles conceptuels en raison de leur performance et de leur simplicité de mise en œuvre. Les hydrogrammes de crues produits alimentent les modèles d'écoulement en rivière.

2.1.2.3 Ecoulement en rivière

Une fois le débit formé, l'eau est progressivement évacuée vers l'aval par la rivière. Cet écoulement à travers le bassin versant peut modifier sensiblement la forme de la crue : c'est le routage hydraulique. Les modèles hydrauliques numériques permettent de simuler les écoulements à surface libre en résolvant les équations de la mécanique des fluides.

Routage hydraulique et régimes transitoires

Nous avons évoqué plus haut (cf. § 1.2.2) l'importance du routage hydraulique dans la compréhension du fonctionnement des rivières en crue. En effet, l'inondation du lit majeur du cours d'eau, dont la rugosité est souvent plus élevée que celle du lit mineur, provoque un ralentissement des écoulements. Une partie du volume de la crue est temporairement stockée dans la zone inondable, ce qui explique le laminage de la crue.

En matière de modélisation hydraulique, on distingue les simulations en régime permanent des simulations en régime transitoire (GRAF et ALTINAKAR, 2000) :

- En régime permanent uniforme, la simulation se fait à débit constant et en conditions stabilisées. On calcule donc une seule ligne d'eau qui dépend des conditions amont et aval du cours d'eau. Ce type de simulation ne permet pas de tenir compte de l'influence du routage hydraulique sur le laminage de la crue.
- En régime transitoire, le débit qui alimente le cours d'eau n'est pas constant. La ligne d'eau va donc varier à chaque pas de temps et ces variations se propagent de l'amont vers l'aval. Ce type de simulation permet de tenir compte du laminage des crues en lit majeur.

Quelle que soit l'approche retenue, le modèle hydraulique calcule les hauteurs d'eau en tout point du cours d'eau ainsi que les vitesses d'écoulement.

Calculs hydrauliques

Le calcul de la ligne d'eau se fait sur la base des équations de Saint-Venant. Celles-ci sont adaptées en fonction de l'approche choisie (CETMEF, 2002) :

- 1D : monodimensionnelle. On néglige les écoulements transversaux au cours d'eau pour ne considérer qu'un écoulement filaire, dans l'axe de la rivière. La plupart des modèles hydrauliques utilisent cette approche. La géométrie de la rivière est décrite par une succession de profils en travers qui déterminent le pas d'espace du modèle. La surface de l'eau est considérée comme horizontale sur un profil en travers et la vitesse d'écoulement est calculée en moyenne sur la section. Ces modèles ne peuvent pas donner une information fiable sur les vitesses d'écoulement en lit majeur et ils ont du mal à prendre en compte les pertes de charge dues aux échanges entre le lit mineur et le lit majeur. Par contre, les modèles 1D sont assez simples à caler car le seul paramètre du modèle est la rugosité moyenne de la section.
- 2D : bidimensionnelle. On prend en compte les écoulements latéraux, ce qui est fréquent dès que l'on est en présence d'un lit majeur assez large. Il faut distinguer les modèles filaires à casiers des modèles 2D. Les modèles filaires à casier associent une modélisation 1D de l'écoulement en lit mineur à un écoulement de casier en casier en lit majeur. Ces modèles sont fréquemment utilisés pour représenter les grandes inondations de plaine dont la dynamique est bien représentée par un système de casiers interconnectés. Les modèles 2D maillés sont plus rarement utilisés car ils font appel à une puissance de calcul importante. Les modèles 2D à casier ou maillé sont assez difficiles à caler car ils sont très sensibles

au choix de la rugosité en lit majeur (HORRITT et BATES, 2002). Par ailleurs on dispose souvent de peu de points de calage en lit majeur pour valider le modèle.

- 3D : ces modèles ne sont pas utilisés en hydraulique de rivière, sauf très localement pour étudier un ouvrage particulier (pont, seuil, turbine...).

Les écoulements en rivière sont turbulents, on distingue les calculs en régime fluvial des calculs en régime torrentiel (GRAF et ALTINAKAR, 2000). Lorsque la pente est faible, l'écoulement est presque toujours fluvial (nombre de Froude $\ll 1$), mais dès lors que la pente est plus forte, on peut observer de fréquents passages en régime torrentiel (nombre de Froude $\gg 1$). Les simulations en régime permanent traitent facilement les passages de torrentiel en fluvial (ressaut) car la géométrie des cours d'eau est assez simple. En régime transitoire, il est plus difficile de prendre en compte ce phénomène, c'est pourquoi ce type de modélisation est peu utilisé pour les rivières de forte pente.

Le modèle hydraulique que nous allons utiliser fonctionne en régime transitoire pour tenir compte du laminage des crues. Le choix d'une approche 1D ou 2D sera discuté plus loin. La dernière étape de modélisation est le report cartographique de l'inondation à partir des simulations hydrauliques.

2.1.2.4 Inondations et modèles numériques de terrain

L'inondation du lit majeur survient dès lors que le débit du cours d'eau dépasse la capacité d'écoulement du lit mineur. L'inondation dépend de la topographie de la vallée qui peut être modélisée sous la forme d'un modèle numérique de terrain. La cartographie de l'inondation s'appuie sur la comparaison du modèle numérique de terrain avec le modèle numérique de surface de l'inondation simulée.

Modèles Numériques de Terrain (MNT)

La topographie de la rivière et du lit majeur est le plus souvent décrite par des profils en travers. Ceux-ci peuvent être espacés de plusieurs centaines de mètres si la forme de la rivière varie peu. Ainsi entre deux profils il n'y a aucune information topographique disponible. On peut créer artificiellement une information topographique spatialisée en construisant un modèle numérique de terrain. On distingue deux grands types de modèles numériques de terrain :

- Les modèles **raster** sont les plus simples. Il s'agit d'une image dont chaque pixel a la même dimension : plus le pixel est petit, meilleure est la résolution (par exemple 1 mètre). Chaque pixel a une valeur d'altitude, on peut donc obtenir en tout point une altitude. Si le MNT a été construit à partir de données topographiques de moins bonne résolution, on détermine l'altitude des nouveaux points par interpolation.
- Les modèles **TIN** (Triangular Irregular Network) sont construits à base de points et d'arêtes. Les points de topographie connue sont reliés entre eux pour former un réseau de triangles. Sur les arêtes, l'altitude d'un point est calculée en interpolant à partir des deux sommets aux extrémités de l'arête. Au niveau des triangles, l'altitude est calculée à partir de l'altitude des trois sommets du triangle. Ce type

de MNT permet de limiter le nombre de points à mémoriser, car dans les zones très plates il suffit de quelques triangles pour décrire la topographie de grandes étendues. La résolution des TIN est variable selon l'irrégularité du terrain.

Il existe des méthodes de construction optimisées pour la modélisation hydraulique (FARISSIER, 1993), mais elles ne sont malheureusement pas accessibles à un large public. Les MNT permettent d'exploiter une information topographique très riche. Leur manipulation est facilitée par le développement des logiciels de systèmes d'information géographique (SIG) qui proposent le plus souvent un module « 3D ».

Cartographier l'inondation

Grâce à la modélisation hydraulique on dispose de lignes d'eau calculées par le modèle hydraulique. Le modèle numérique de terrain décrit quant à lui la topographie de la vallée. Pour délimiter l'inondation on cherche l'intersection entre le modèle numérique de surface de l'eau, créé à partir de la ligne d'eau calculée par le modèle hydraulique, et le modèle numérique de terrain (figure 44). En tout point on compare la cote de la ligne d'eau et la cote du terrain. Si la première est supérieure à la seconde, il y a inondation.

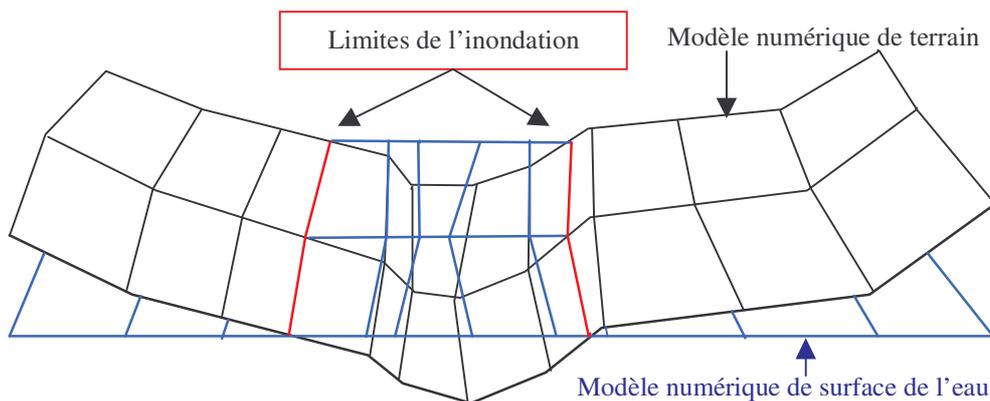


Figure 44 : délimitation de l'inondation à partir de modèles numériques de surface

Les modèles numériques de terrain et de surface sont très utiles pour cartographier les inondations, ils sont également utilisés en amont de la méthodologie pour extraire les profils en travers à destination de la modélisation hydraulique.

Les processus physiques qui mènent à l'inondation sont variés, mais il existe d'ores et déjà un grand nombre de modèles qui permettent de les reproduire. Il faut choisir des modèles adaptés et organiser leur mise en œuvre en veillant à la cohérence de la méthodologie et au respect des contraintes de modélisation formulées plus haut.

2.1.3 Organisation des modèles

Les différents modèles présentés ci-dessus sont en interrelation. Leur orchestration au sein de la méthodologie dépend des échanges qu'ils entretiennent. Nous avons donc choisi de présenter en premier lieu les données échangées entre modèles (cf. § 2.1.3.1). La

méthodologie de modélisation peut ensuite être décrite soit par le chaînage des modèles (cf. § 2.1.3.2), soit par leur intégration spatiale (cf. § 2.1.3.3).

2.1.3.1 Echanges de données entre modèles

Pour déterminer le type de données nécessaires à chaque étape de la modélisation, nous avons décrit la méthodologie en ordre inverse. On part de la cartographie des crues pour remonter au générateur de pluie. Les échanges de données sont résumés sur le schéma suivant (figure 45).

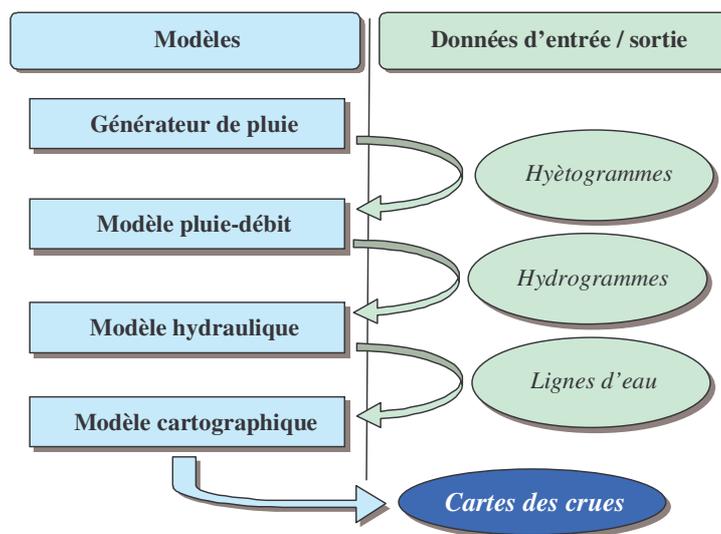


Figure 45 : schéma des échanges de données entre modèles

Données d'entrée pour la cartographie de l'aléa

Dans le paragraphe qui précède, nous avons vu que la cartographie de l'inondation repose sur la comparaison d'un modèle numérique de surface de l'eau et du MNT de la vallée. Il faut donc disposer de deux sources de données différentes.

Le **modèle numérique de terrain à haute résolution** est construit à partir des données topographiques dont les différentes méthodes d'acquisition sont présentées plus loin (cf. § 2.3.2). La résolution de ce MNT doit être adaptée à la taille du cours d'eau étudié et la précision altimétrique doit être au moins décimétrique (FRHYMAP, 2002). On peut visualiser un tel MNT de différentes façons, la plus démonstrative étant la vue ombrée proposée par la plupart des SIG (figure 46). On simule l'éclairage naturel pour faire ressortir les reliefs par des jeux d'ombre et de lumière. On distingue ainsi le lit de la rivière et les constructions, pour la plupart des bâtiments industriels et commerciaux. Le MNT à haute résolution occupe une place importante dans la méthodologie.

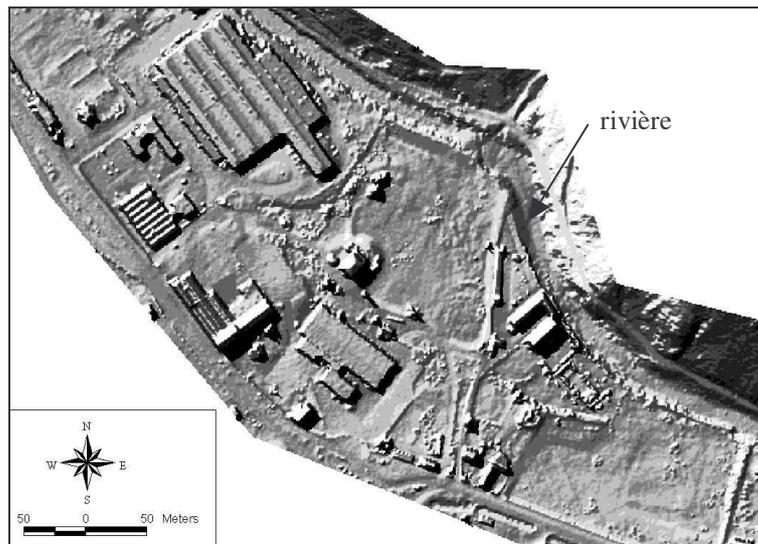


Figure 46 : exemple de MNT de haute résolution en vue ombrée

Le **modèle numérique de surface de l'eau** est construit à partir de la ligne d'eau calculée par le modèle hydraulique. Il ne s'agit pas d'une ligne d'eau prise à un instant quelconque de la crue, mais de la ligne d'eau maximale atteinte en chaque point pendant la crue. Cette cote est atteinte à des dates différentes de l'amont vers l'aval. Le modèle numérique de surface doit présenter la même résolution que celle du MNT du fond de vallée. La **ligne d'eau maximale de la crue** est la donnée d'entrée permettant la cartographie de l'aléa.

Données d'entrée pour le calcul de la ligne d'eau maximale

Le calcul de la ligne d'eau maximale est effectué par le modèle hydraulique utilisé en régime transitoire. Le modèle hydraulique nécessite une description fine de la topographie.

Le **modèle numérique de terrain à haute résolution** présenté ci-dessus permet d'extraire l'information topographique sous forme de profils en travers utilisables par le modèle hydraulique. Pour garantir la cohérence des calculs hydrauliques et de la cartographie de l'aléa, il est souhaitable que la topographie utilisée dans ces deux phases de modélisation soit issue du même MNT. Pour plus de détails sur l'acquisition des données, la construction du MNT et l'extraction des profils en travers, reportez-vous au paragraphe 2.3.2.

Pour réaliser des simulations en régime transitoire, l'alimentation en eau du modèle hydraulique nécessite de connaître les **hydrogrammes de crue** des différents sous-bassins versants qui alimentent la rivière. Si on désire modéliser des crues de périodes de retour variées, il faut réaliser plusieurs simulations. Nous verrons plus loin comment choisir les événements à simuler pour pouvoir affecter une fréquence d'inondation en tout point du bassin versant.

Données d'entrée pour la simulation des hydrogrammes de crue

Les hydrogrammes de crue simulés sont obtenus en sortie du modèle pluie-débit pour chaque sous-bassin versant. Il y a donc plusieurs modèles pluie-débit qui fonctionnent en parallèle.

La première donnée d'entrée nécessaire est la superficie du sous-bassin versant. Pour déterminer la superficie de chaque sous-bassin versant, il faut tracer le contour des bassins versants des différents affluents. L'utilisation d'un **modèle numérique de terrain à basse résolution (50 m)** de l'ensemble de la vallée permet de délimiter de manière automatique le contour des sous-bassins versants (figure 47).

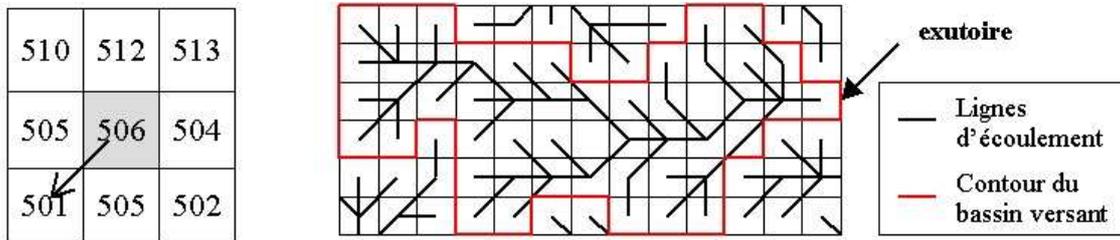


Figure 47 : délimitation automatique d'un bassin versant à l'aide d'un MNT raster

La première étape de la délimitation automatique est le tracé des lignes d'écoulement pixel par pixel. Ensuite le bassin versant est tracé de manière à entourer un arbre complet de lignes d'écoulement. Cette délimitation automatique peut bien sûr être amendée par l'utilisateur. On peut par exemple choisir de grouper plusieurs petits sous-bassins versants en un seul, ou bien de regrouper les bassins versants de deux affluents, l'un en rive gauche, l'autre en rive droite, lorsque leurs confluences sont proches. Ces regroupements permettent d'obtenir des sous-bassins versants de taille et de caractéristiques homogènes, dans le but de faciliter la transposition du modèle pluie-débit d'un sous-bassin versant à l'autre.

Le modèle pluie-débit doit également être alimenté par des **épisodes de pluie**. Les **hyétogrammes** sont issus du générateur de pluie. La pluie simulée est une pluie de bassin qui synthétise la variabilité spatiale de la pluie réelle. On ne peut pas tenir compte de la répartition spatiale d'un événement particulier, mais par contre on peut intégrer le gradient pluviométrique annuel.

Les données nécessaires à chaque modèle sont toujours issues d'un seul modèle à l'amont de la méthodologie. L'organisation des modèles est très simple : on parle de **chaînage des modèles**. Les MNT interviennent à tous les stades de la méthodologie, c'est un élément essentiel pour la modélisation des crues.

2.1.3.2 Le chaînage des modèles

Pour rendre plus explicite l'agencement des différents modèles dans la chaîne de modélisation, nous proposons de schématiser la démarche (figure 48). Pour faciliter la compréhension du schéma, nous rappelons les différentes phases d'une modélisation rigoureuse.

Calage, validation, simulation, transposition

La plupart des modèles ne peuvent être utilisés qu'une fois calés. Ils doivent être adaptés aux conditions locales pour optimiser la simulation.

Le **calage** consiste à rechercher, pour un ou plusieurs événements connus, un jeu de paramètres permettant au modèle de reproduire fidèlement la réalité observée. La performance des modèles peut être évaluée numériquement en quantifiant les différences qui existent entre l'événement simulé et l'événement observé.

La **validation** est également une phase d'évaluation de la performance du modèle. On se place sur le même site, avec le même jeu de paramètres que celui retenu après calage, mais pour un événement différent. La performance peut également être évaluée numériquement. L'erreur commise par le modèle en validation est indicative de l'erreur potentielle du modèle utilisé en simulation.

La **simulation** correspond à l'utilisation du modèle sur des événements pour lesquels on n'a pas de données observées, il n'est donc pas possible de déterminer l'erreur commise par le modèle. Les simulations peuvent servir de données d'entrée à d'autres modèles.

La **transposition** d'un modèle est l'utilisation d'un jeu de paramètres optimisés sur un site pour lequel on dispose d'observations, à un autre site de caractéristiques comparables, mais pour lequel on ne dispose pas d'observations. La performance du modèle en transposition ne peut pas être évaluée *a posteriori*.

Dans le schéma suivant, on distingue la phase calage/validation de la phase transposition/simulations car la première utilise uniquement des données observées tandis que la seconde n'utilise que des données simulées.

Schéma de chaînage des modèles

L'emploi successif des différents modèles fait penser à une chaîne plutôt qu'à un couplage car il n'y a pas de rétroaction d'un modèle sur un autre. C'est pour cette raison que nous utilisons le terme « chaînage ». Chaque maillon de la chaîne est représenté par un modèle, ils sont liés les uns aux autres par les échanges de données simulées (figure 48).

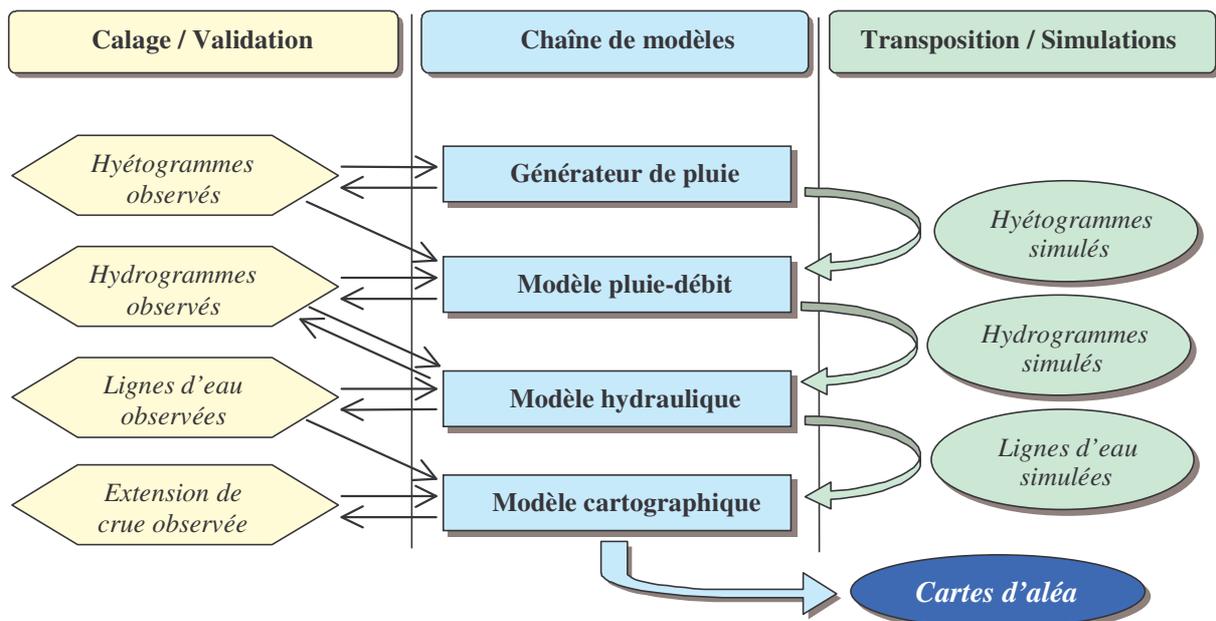


Figure 48 : schématisation du chaînage des modèles

Pendant la phase de calage, il y a utilisation de données observées, mais aussi comparaison entre les observations et les simulations, c'est ce que nous avons voulu

représenter par la double flèche. Durant la phase de simulation, les résultats du modèle sont utilisés directement comme données d'entrée dans le modèle suivant. La démarche est simple car il n'y a pas de rétroactions entre les modèles. L'aboutissement des différentes simulations est la cartographie de l'aléa en fonction des caractéristiques retenues (fréquence, hauteur d'eau...). Les modèles prennent place au sein d'une chaîne de modélisation, mais ils ont également chacun leur propre intégration spatiale.

2.1.3.3 Intégration spatiale des modèles

Les processus décrits n'ont pas tous la même extension spatiale : la pluie de bassin est homogène sur l'ensemble du bassin versant, les hydrogrammes sont calculés par sous-bassins versants, puis propagés par routage hydraulique le long du cours d'eau (figure 49). La méthodologie fait intervenir des approches globales et spatialisées dont il faut assurer la cohérence.

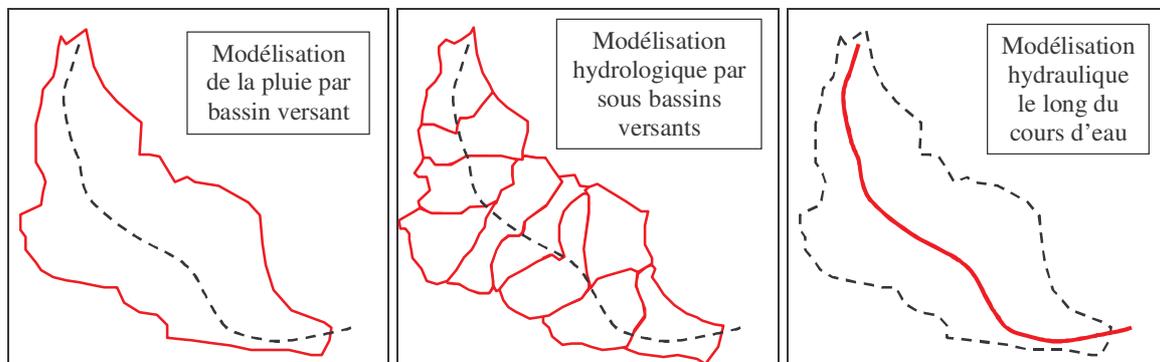


Figure 49 : intégration spatiale des différents modèles

Des apports semi-spatialisés

L'alimentation de la rivière par les différents affluents est modélisée par l'injection d'hydrogrammes de sous-bassins versants dans le modèle hydraulique. La modélisation pluie-débit est donc menée par sous-bassins versant (figure 50).

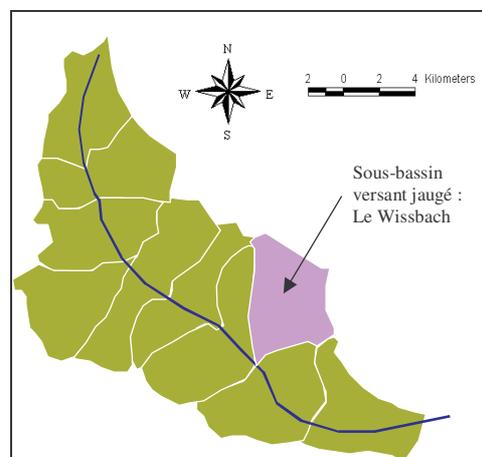


Figure 50 : les sous-bassins versants délimités pour la Thur

Les sous-bassins versants retenus rassemblent chacun plusieurs petits affluents. Il y a en général un affluent de rive gauche groupé avec un affluent de rive droite. Les regroupements ont été réalisés dans le but d'obtenir des sous-bassins versants dont la taille est voisine de celle du sous-bassin versant jaugé du Wissbach, soit environ 22 km². Au total on dénombre 10 sous-bassins versants dont certains sont semblables du point de vue de la pluviométrie moyenne annuelle, de l'altitude moyenne et de la géologie (roches cristallines et métamorphiques) (figure 51).

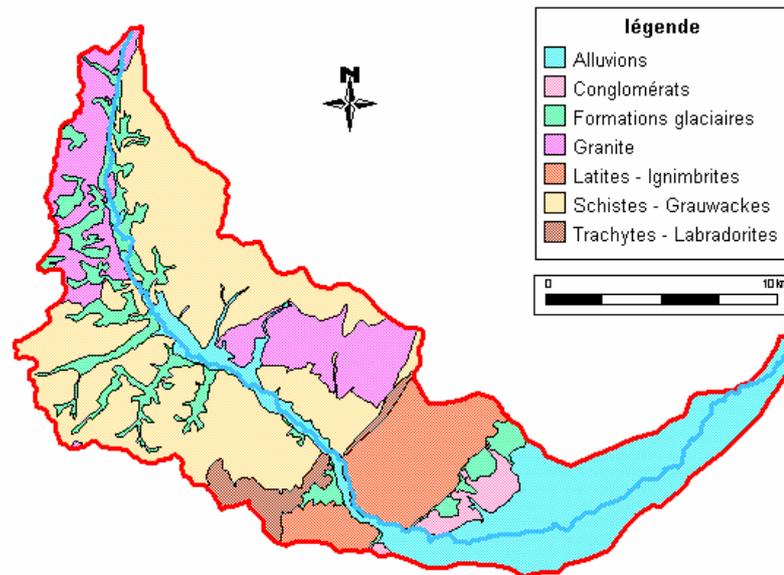


Figure 51 : géologie de la vallée de la Thur (d'après BRGM)

La modélisation pluie-débit est semi-spatialisée par sous-bassins versants homogènes. Cela doit améliorer la transposition du modèle pluie-débit du sous-bassin versant jaugé aux autres sous-bassins versants.

Approches spatialisée et globale menées en parallèle

La Thur est équipée de deux stations de jaugeage à Willer/Thur et à Staffelfelden. Ces stations correspondent à des bassins versants de 150 et 260 km² (figure 52). On peut obtenir les hydrogrammes de crue à l'exutoire de ces deux bassins versants de deux manières différentes :

- Par approche spatialisée : on extrait du modèle hydraulique les hydrogrammes calculés en régime transitoire. Ces hydrogrammes sont générés par routage des hydrogrammes de sous-bassins versants. Ils intègrent explicitement le laminage des crues lié à l'inondation du lit majeur.
- Par approche globale au moyen du modèle pluie-débit calé pour chacune des deux stations. Les hydrogrammes obtenus tiennent compte implicitement du laminage des crues car le modèle a été calé sur des hydrogrammes observés.

Les résultats obtenus par les deux approches doivent être comparables. La cohérence de la méthodologie peut être contrôlée en comparant les hydrogrammes obtenus par approche globale et approche spatialisée.

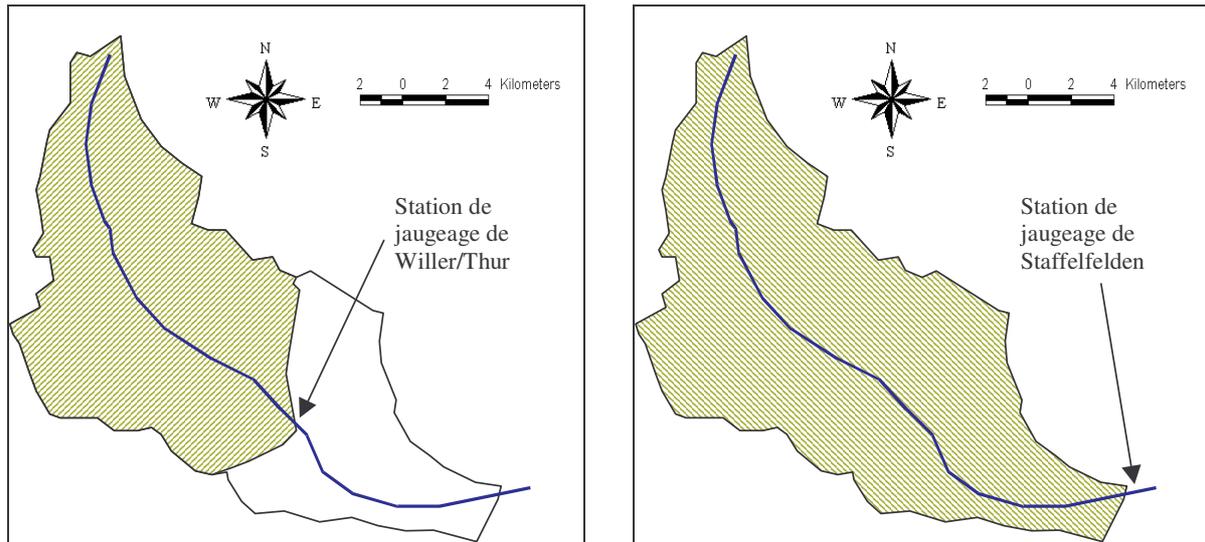


Figure 52 : les deux bassins versants de contrôle pour la Thur

Les approches globale et spatialisée sont complémentaires. Elles permettent de réfléchir à la sélection des événements de référence pour la modélisation des crues à l'échelle du bassin versant.

Le chaînage des modèles et les différents degrés de spatialisations permettent la cartographie d'une crue quelconque, mais pour cartographier l'aléa il faut pouvoir attribuer une fréquence à l'événement en tout point du cours d'eau. Cette information est cruciale pour mener une approche probabiliste telle que celle du risque d'inondation. Nous proposons une réflexion approfondie sur le choix des événements de référence à simuler.

2.2 Approche événementielle spatialisée des crues

La méthodologie repose sur le choix des événements de référence utilisés en simulations. Ils permettent l'attribution d'une fréquence de submersion en tout point du cours d'eau. Le choix du modèle hydrologique doit tenir compte de contraintes que nous explicitons dans un premier paragraphe (cf. § 2.2.1). Nous présentons ensuite la méthode SHYPRE qui a été adoptée pour générer un grand nombre d'événements (cf. § 2.2.2). Enfin, la sélection des événements de référence fait l'objet d'une discussion approfondie (cf. § 2.2.3).

2.2.1 Choix du modèle pluie-débit

Les contraintes de modélisation sont définies au regard des objectifs de la méthodologie et du contexte particulier des rivières de moyenne montagne. Toutefois, certaines contraintes sont d'ordre général et elles pourraient être reprises dans d'autres contextes géographiques. Nous présentons dans un premier temps les objectifs et le principe de l'approche événementielle (cf. § 2.2.1.1), puis la modélisation spatialisée (cf. § 2.2.1.2). Enfin, nous justifions le choix du modèle pluie-débit GR3 et nous le présentons (cf. § 2.2.1.3).

2.2.1.1 Approche événementielle

Quel que soit le contexte géographique auquel on s'intéresse, la spatialisation des débits par simulation hydraulique en régime transitoire nécessite l'utilisation d'hydrogrammes de crue. Leur modélisation est obtenue grâce au modèle pluie-débit.

Production d'hydrogrammes

Le modèle hydrologique doit produire un hydrogramme de crue pour chaque sous-bassin versant. Ces hydrogrammes sont utilisés comme données d'entrée du modèle hydraulique en régime transitoire qui calcule un hydrogramme de crue en tout point du cours d'eau.

Tous les modèles hydrologiques ne permettent pas de fournir des hydrogrammes de crue. En effet, certains modèles empiriques globaux, comme la méthode CRUPEDIX ou les abaques SOGREAH, ne donnent accès qu'au débit de pointe décennal. Ces méthodes sont peu précises, mais elles ont l'avantage d'être régionalisées au niveau national et elles permettent donc d'estimer le débit de pointe décennal sur des bassins versants non jaugés.

La méthode SOCOSE est un peu plus sophistiquée. Elle permet en effet de construire un hydrogramme simplifié en définissant la durée caractéristique D . Celle-ci correspond à la durée pendant laquelle le débit est supérieur à la moitié du débit décennal.

Les modèles de transformation pluie-débit permettent d'obtenir des hydrogrammes en réponse à un épisode pluvieux. C'est ce type de modèles qu'il convient de retenir pour la modélisation hydrologique.

Choix du pas de temps

Les crues des rivières de moyenne montagne sont rapides pour deux raisons :

- Les épisodes pluvieux sont plus intenses en montagne en raison de l'altitude et de phénomènes météorologiques particuliers comme l'effet de fœhn (PAUL, 1981).
- Le temps de concentration des bassins versants de moyenne montagne est court, car la pente moyenne est forte et la densité de drainage est élevée (HUMBERT et CORBONNOIS, 2000).

Lorsqu'on observe les fortes crues dans la vallée de la Thur, on constate que leur durée est relativement courte (figure 53).

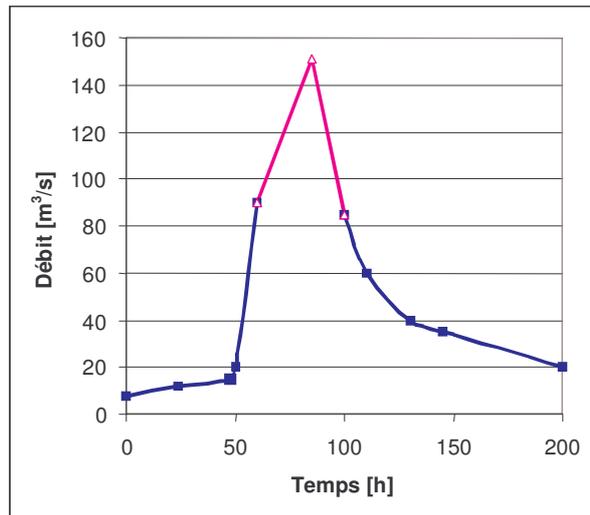


Figure 53 : hydrogramme de la crue de 1990 à Willer/Thur

La crue de février 1990 a été si violente qu'elle a partiellement détruit la station de jaugeage de Willer/Thur. Le débit de pointe de crue est donc un débit estimé. Dans la réalité, la pointe de crue n'est pas aussi aiguë. La durée de la crue excède rarement 48 heures au total et la durée pendant laquelle la rivière est une menace (cote d'alerte dépassée) dure moins de 24 heures. Ainsi les crues doivent être décrites en détail pendant cette période.

Il est évident que pour décrire finement un phénomène qui dure moins de 24 heures, le pas de temps journalier est inadapté. La pluviométrie étant accessible au pas de temps horaire pour les stations automatiques, nous avons choisi de retenir le **pas de temps horaire** pour les simulations hydrologiques. Ce choix a une incidence directe sur la masse de données utilisées et produites par le modèle pluie-débit, ce qui appelle une adaptation de la modélisation hydrologique.

Simulation événement par événement

Nous nous intéressons à la modélisation des crues, or la rivière n'est en crue que quelques jours dans l'année. Même s'il existe des modèles de simulation continue (BLAZKOVA et BEVEN, 2004), on préfère en général ne simuler la transformation de la pluie en débit que pendant les crues (ARNAUD, 1997 ; LEVIANDIER et al., 2000). Cette approche événementielle permet de réduire sensiblement la masse de données à gérer lorsqu'on simule à pas de temps fin et de se concentrer sur la simulation des crues. Toutefois, l'approche événementielle demande une réflexion approfondie sur différents aspects :

- On ne connaît pas l'état initial de saturation des sols au début de la crue, or nous avons montré plus haut (cf. § 2.1.2.2) que ce paramètre est déterminant pour comprendre la réponse du bassin versant à un épisode de pluie.
- L'approche événementielle permet souvent de s'affranchir de la prise en compte de l'évapotranspiration. Elle est négligeable en regard de la pluviométrie pendant toute la durée de la crue.
- Les crues peuvent être d'ampleur très variée. Il faut mettre au point une règle de sélection des événements à prendre en compte. Cette règle peut porter sur le débit, mais également sur la pluie qui génère l'événement.

Pour répondre aux objectifs généraux de la méthodologie, le modèle pluie-débit doit permettre une simulation événementielle des crues à pas de temps fin. Nous avons également intégré la contrainte supplémentaire de la spatialisation.

2.2.1.2 Approche spatialisée

La modélisation pluie-débit est envisagée pour des bassins versants de tailles variées. Or l'utilisation d'un modèle hydrologique quel qu'il soit doit tenir compte de son domaine de validité (AMBROISE, 1999).

Domaine de validité

Tous les modèles ne sont pas utilisables pour toutes les tailles de bassin versant. En effet, le comportement d'un petit bassin versant de quelques kilomètres carrés et celui d'un bassin versant de plusieurs milliers de kilomètres carrés ne sont pas comparables. Les modèles conceptuels globaux les plus utilisés sont très souples. Ils s'adaptent à des bassins de quelques kilomètres carrés aussi bien qu'à de grands bassins fluviaux.

Nous avons montré plus haut que notre approche utilise une série de simulations sur des sous-bassins versants d'une vingtaine de kilomètres carrés. Mais nous utilisons aussi des simulations globales à plus grande échelle (160 et 260 km²). Le modèle pluie-débit retenu dans la méthodologie doit présenter un domaine de validité suffisamment large pour convenir aux différentes échelles de simulation.

Modélisation semi-spatialisée

L'approche que nous avons retenue est semi-spatialisée. En effet, même si les sous-bassins versants portent tous des débits différents, leur modélisation est globale. La performance du modèle est calculée pour chaque bassin versant jaugé, ce qui permet un contrôle intermédiaire de la qualité de la modélisation. Nous avons recherché un modèle global qui soit à la fois très souple et suffisamment performant.

Les modèles conceptuels globaux utilisent des cascades de réservoirs pour représenter les différents processus intervenant dans la formation des débits. Les paramètres de ces modèles jouent le plus souvent sur la taille des réservoirs qui composent le modèle. Ces modèles ont fait l'objet d'une comparaison quasiment exhaustive (PERRIN, 2000). Il a été montré que les performances de ces modèles sont le plus souvent satisfaisantes pour une large gamme de tailles de bassins versants. Les modèles étudiés ont des architectures parfois très différentes, mais au final on obtient des performances comparables. La principale différence vient du nombre de paramètres à caler.

Modèle parcimonieux

Les modèles ayant un faible nombre de paramètres (3 ou 4) compensent souvent leur moins grande souplesse par une facilité de calage supérieure. Le souci de parcimonie est un point de vue philosophique ancien (le rasoir d'Occam, XIV^e siècle, THORBURN (1915)), renouvelé par les théories de l'information (AKAIKE, 1973). Il ne vise pas à la meilleure description de la réalité, mais à une description validée empiriquement.

L'histoire des modèles hydrologiques montre le plus souvent que l'on part d'un modèle ayant un grand nombre de paramètres, puis on constate qu'un certain nombre d'entre eux peuvent être remplacés par des constantes et on aboutit à un modèle plus parcimonieux. Le développement des modèles GR par le Cemagref a suivi un chemin inverse (MICHEL, 1989). Au départ le modèle se contentait de deux paramètres caractérisant le volume de deux réservoirs. Pour adapter le modèle à des bassins versants plus grand on a dû ajouter un troisième paramètre.

Les modèles parcimonieux sont plus faciles à caler, leur fonctionnement est plus simple et on peut plus facilement appréhender la sensibilité du modèle. Ils permettent également d'obtenir de bons résultats en régionalisation (SIEFFERT, 1999) et en transposition (cf. § 2.2.1.3). Les **modèles conceptuels globaux parcimonieux** nous semblent être les mieux adaptés à l'approche semi-spatialisée que nous nous proposons de mettre en œuvre. Le modèle **GR3** développé par le Cemagref en France est un bon exemple de ce type de modèles.

2.2.1.3 Présentation du modèle GR3

Le modèle GR3 est un modèle conceptuel à 2 réservoirs et 3 paramètres. Son architecture est simple car elle décrit deux processus majeurs de la transformation de la pluie en débit. Les tests de sensibilité permettent de mieux comprendre le rôle de chaque paramètre du modèle. Pour que la méthodologie fonctionne, le modèle pluie-débit doit être efficace en transposition d'un bassin versant jaugé à un bassin versant non jaugé.

Architecture du modèle GR3

Le premier réservoir est appelé réservoir « sol ». Il contrôle la répartition entre l'eau de rétention et l'eau gravitaire qui va former le débit : c'est la fonction de production (figure 54). C'est également à ce niveau qu'intervient la prise en compte de l'évapotranspiration lorsque le modèle est utilisé en simulation continue. Le paramètre A représente la capacité totale du réservoir en lame d'eau (mm) et le niveau de remplissage est appelé S. Lorsque le modèle fonctionne en simulation événementielle, le taux de remplissage initial du réservoir sol est appelée S_0/A .

Le deuxième réservoir est le réservoir « eau gravitaire » ou réservoir de routage, il assure la fonction de transfert. Il est alimenté par 90 % de l'eau gravitaire sous forme d'un hydrogramme unitaire (HU1) et sa loi de vidange est d'ordre 5. La capacité totale du réservoir est notée B et s'exprime en lame d'eau (mm), c'est le deuxième paramètre du modèle. Les 10 % d'eau gravitaire restants rejoignent directement l'exutoire sous forme d'un deuxième hydrogramme unitaire (HU2). La durée de l'hydrogramme unitaire est appelée C, elle est exprimée en heures, c'est le troisième paramètre du modèle.

Le modèle GR3 a donc 3 paramètres notés A, B et C. Ce modèle a initialement été développé pour des simulations au pas de temps journalier, mais il a été montré qu'il peut-être utilisé avec la même architecture pour simuler au pas de temps horaire (ARNAUD, 1997 d'après YANG, 1993). La méthode d'optimisation du modèle est efficace pour ce pas de temps, le modèle horaire est appelé GR3H.

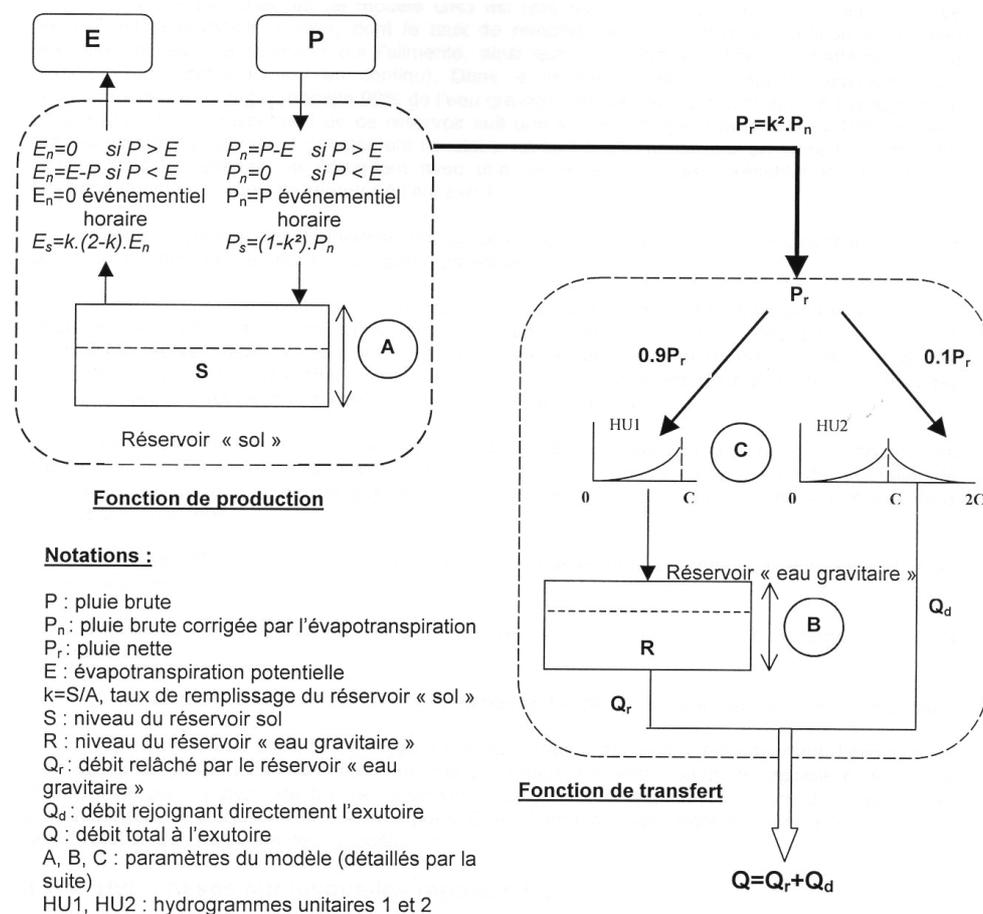


Figure 54 : schéma de l'architecture de GR3 (d'après ARNAUD, 1997)

Le modèle GR3H est un modèle global. Il prend en compte une pluie de bassin et une évapotranspiration moyenne. La seule perte en eau du modèle est l'évapotranspiration. Le modèle ne tient donc pas compte des échanges souterrains. Pour la modélisation événementielle des crues, il semble que trois paramètres soit le minimum requis pour traiter le problème à plusieurs échelles différentes. Dans le modèle GR3H, S_0/A peut être considéré comme un quatrième paramètre, mais le modèle peut tout de même être qualifié de parcimonieux.

Pour mieux comprendre le rôle des différents paramètres dans le fonctionnement du modèle on peut réaliser un test de sensibilité.

Test de sensibilité de GR3H

Pour tester la sensibilité du modèle à un paramètre donné, on réalise plusieurs simulations différentes en faisant varier la valeur du paramètre étudié, les autres étant fixés à une valeur moyenne (PAYAN, 2003). On peut réaliser ce test pour chaque paramètre en balayant une gamme réaliste de valeurs. Les paramètres de GR3H ne sont pas directement A, B et C, mais $\ln(A)$, $\ln(B)$ et $\ln(C-0,5)$. S_0/A , le taux de saturation initiale, peut être exprimé en pourcentage. La crue modélisée ici est la crue du 10 février 1997 à Willer/Thur.

A est le paramètre de la fonction de production. Il caractérise le réservoir sol représentant la capacité de rétention du bassin versant. Plus le paramètre A a une valeur élevée, plus la rétention est efficace (figure 55). La crue simulée est donc moins forte lorsque A est grand. Le paramètre A contrôle l'amplitude de la crue.

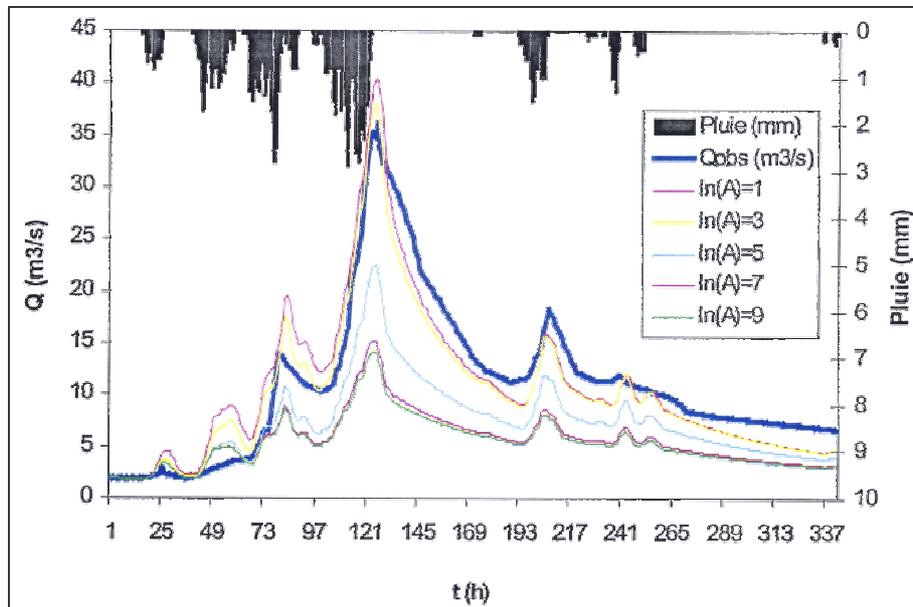


Figure 55 : test de sensibilité à la valeur du paramètre A (par J.-L. Payan)

Le paramètre B influence à la fois la forme et l'amplitude de la crue (figure 56). Plus la valeur de B est faible, plus la montée de la crue est brusque. B est représentatif de l'effet tampon du réservoir de routage. Pendant la crue, le réservoir de routage assure également un rôle de production en se vidant progressivement. La valeur de B a donc également un impact sur l'amplitude de la crue.

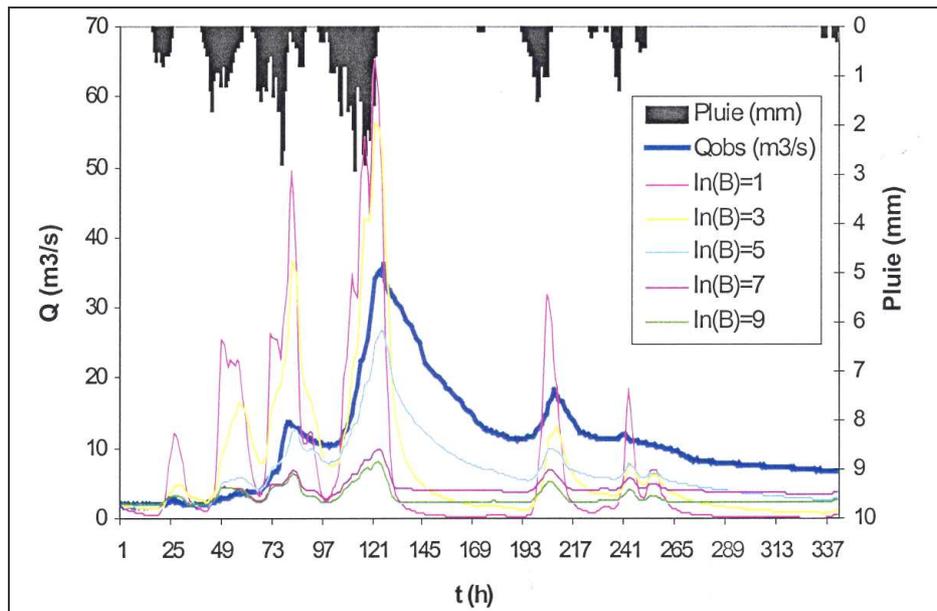


Figure 56 : test de sensibilité à la valeur du paramètre B (par J.-L. Payan)

Le paramètre C représente le décalage temporel entre la pluie et le débit. Plus C est grand, plus le décalage est important (figure 57). On observe également, lorsque C est assez grand, que la pointe de crue est lissée. En effet, le paramètre C contrôle la durée des hydrogrammes unitaires HU1 et HU2 (figure 54). Plus la durée de l'hydrogramme unitaire est grande, plus la pluie est étalée dans le temps, ce qui a pour effet de lisser les pointes de crue.

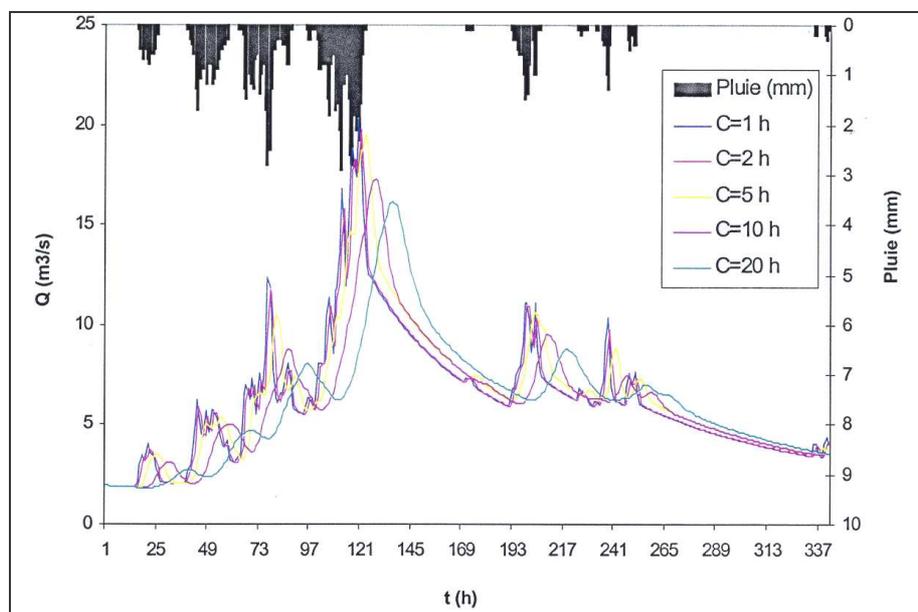


Figure 57 : test de sensibilité à la valeur du paramètre C (par J.-L. Payan)

Le remplissage initial du réservoir sol a un effet important sur l'amplitude de la crue (figure 58). En effet, selon le taux de remplissage initial du réservoir sol, la rétention dans le réservoir sol est plus ou moins efficace : S_0/A a le même rôle que le paramètre A. Ainsi, en mode événementiel, on fixe souvent la valeur du paramètre A à 330 mm, soit $\ln(A) = 5,8$. Cette valeur correspond à la valeur médiane obtenue par Edijatno en prenant en compte 110 bassins versants français (EDIJATNO, 1991).

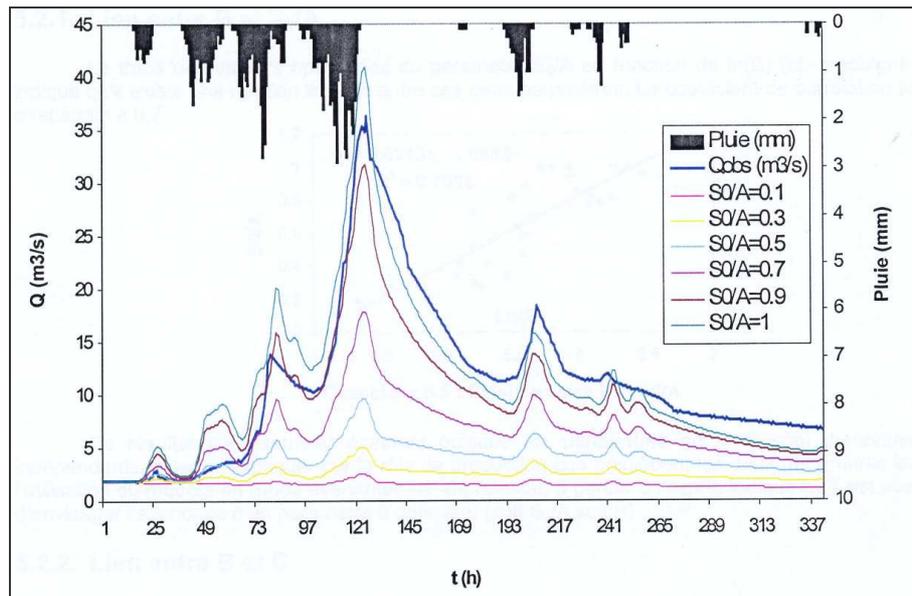


Figure 58 : test de sensibilité à la valeur de S_0/A (par J.-L. Payan)

Les tests de sensibilité montrent qu'avec seulement trois paramètres le modèle GR3H peut fournir des hydrogrammes de formes diverses. Il peut donc reproduire le fonctionnement de bassins versants aux caractéristiques très variées.

Aptitudes de GR3H en transposition

Pour que le modèle réponde parfaitement aux objectifs de la méthodologie, il faut qu'il soit transposable d'un bassin versant jaugé à un bassin versant non jaugé de caractéristiques similaires. Le modèle MHR (LEVIANDIER et al., 1994) a une architecture assez proche de celle des modèles GR. L'utilisation de ce modèle en régionalisation donne de bons résultats. On a pu mettre en évidence un lien entre la valeur des paramètres et la composition géologique du bassin versant (SIEFFERT, 1999 ; DROGUE et al., 2002). On peut ainsi établir que deux bassins versants de tailles similaires et de géologie comparable ont le même jeu de paramètres. La transposition d'un bassin versant à l'autre en conservant le même jeu de paramètres doit être efficace si on se trouve dans des conditions géologiques et topographiques comparables. Les expériences de régionalisation des modèles de type GR ayant été menées avec succès, nous estimons que ce modèle est bien adapté à une transposition locale.

Le modèle GR3H permet de répondre aux contraintes d'une modélisation événementielle semi-spatialisée. C'est un modèle éprouvé et simple. Son aptitude à la transposition dans un même contexte géologique semble bonne. Utilisé de façon indépendante, GR3H permet, à partir d'un épisode pluvieux, de produire un hydrogramme auquel nous souhaitons attribuer une fréquence. Une modélisation stochastique associant un modèle de pluie au modèle pluie-débit permettrait d'attribuer une fréquence à tout hydrogramme simulé.

2.2.2 La méthode SHYPRE

La méthode SHYPRE (Simulation d'Hydrogrammes pour la PRedétermination / Simulated Hydrographs for flood PRobability Estimation) a été développée par le Cemagref d'Aix-en-Provence. Il s'agit du couplage d'un générateur stochastique de pluie horaire et du modèle GR3H (CERNESSON, 1993 ; ARNAUD, 1997). L'objectif de cette méthode est la prédétermination des crues et notamment des événements les plus rares. SHYPRE permet la prédétermination du débit de pointe, mais également des débits supérieurs à un seuil. La méthode a été développée dans l'arc méditerranéen, puis elle a été étendue aux milieux tropicaux et tempérés. L'application de SHYPRE à la vallée de la Thur fait partie des derniers développements de la méthode. Dans une première partie, nous présentons le principe de fonctionnement de SHYPRE (cf. § 2.2.2.1). Ensuite, nous présentons le générateur de pluie horaire (cf. § 2.2.2.2), puis une application de la méthode sur la Thur (cf. § 2.2.2.3).

2.2.2.1 Principe de fonctionnement de SHYPRE

Le chaînage d'un générateur stochastique de pluie et d'un modèle pluie-débit permet la simulation d'un grand nombre d'événements de crue. La méthode SHYPRE vise à exploiter l'information pluviométrique disponible pour compléter les événements de crue observés par des événements simulés dont les variables suivent les mêmes distributions de probabilités. Cette méthode permet une estimation des crues de fréquence rare peu sensible à l'échantillonnage.

Architecture de la méthode

La méthode SHYPRE met en œuvre un modèle de pluie horaire, qui fait office de générateur de pluie, et GR3H qui assure la transformation pluie-débit au pas de temps horaire (ARNAUD, 1997).

La première étape de la modélisation est la phase de calage du modèle de pluie et du modèle pluie-débit à partir des événements observés. Pour ces derniers, on doit disposer à la fois de données de pluies horaires et d'hydrogrammes à pas de temps horaire.

Une fois les deux modèles calés, on procède à la simulation d'un grand nombre d'épisodes de pluie qui sont transformés en hydrogrammes de crue par GR3H.

La phase de validation consiste à vérifier que les événements de crue simulés suivent les mêmes distributions de probabilités que les événements observés. Si la méthode est validée, on peut utiliser les événements simulés pour prolonger les distributions de probabilités jusqu'à des périodes de retour élevées (figure 59).

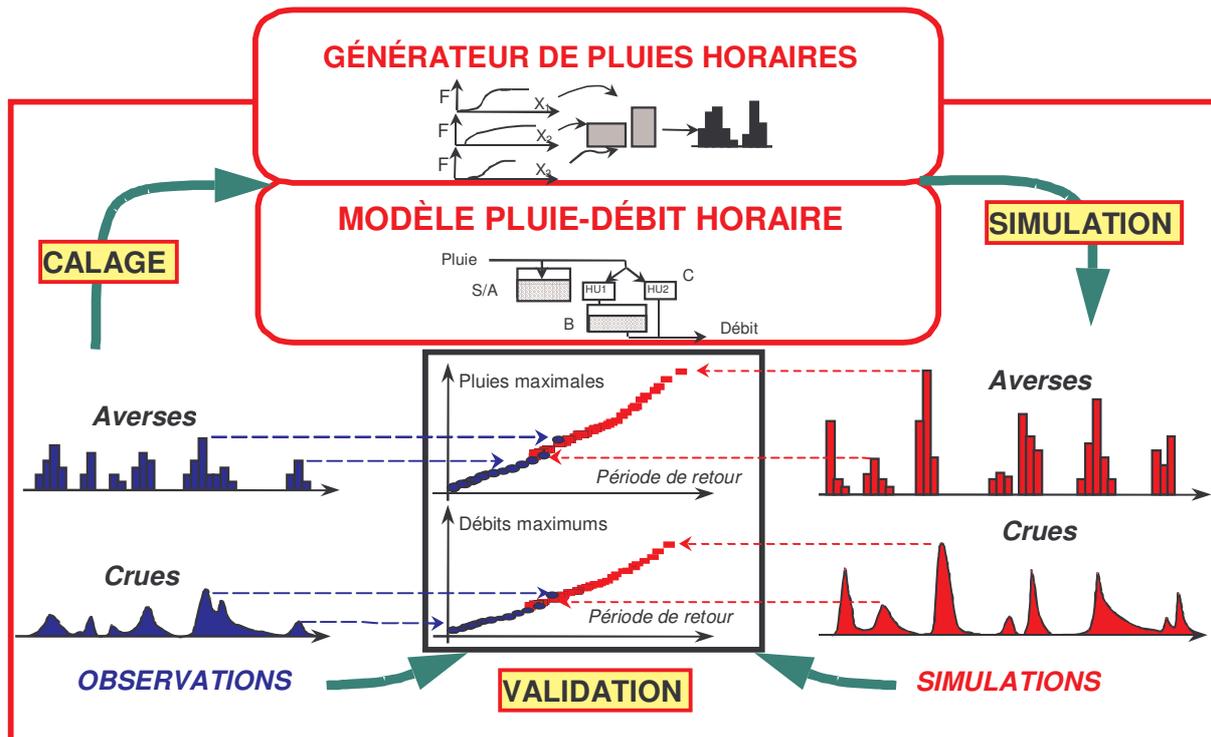


Figure 59 : schéma de fonctionnement de la méthode SHYPRE (ARNAUD *et al.*)

La méthode SHYPRE a une architecture relativement simple à comprendre car elle utilise une approche directe pour la simulation de la pluie. Un utilisateur néophyte peut facilement suivre les différentes étapes de la modélisation et valider visuellement la performance de chaque modèle.

Estimation des crues de fréquence rare

La méthode SHYPRE permet de prédéterminer la distribution des débits de crue pour des périodes de retour très élevées. En effet, en réalisant un grand nombre de simulations (par exemple 1000 fois 1000 ans), on peut étendre la distribution de probabilités à des périodes de retour de 1000 ou 10 000 ans. Il est difficile d'estimer l'erreur commise lorsqu'on atteint de telles périodes de retour, d'autant que la méthode SHYPRE donne des estimations souvent plus élevées que les approches traditionnellement utilisées (GRADEX et AGREGEE). Des travaux sont en cours pour assortir les estimations de SHYPRE d'un intervalle de confiance.

Dans le cadre de notre travail, nous ne souhaitons pas aller au-delà d'une période de retour de 200 ans, car la méthode SHYPRE est a priori réputée fiable pour la prédétermination des crues de période de retour inférieure ou égale à 100 ans. Au delà, les débits estimés doivent être considérés avec plus de prudence. Toutefois, la méthode SHYPRE a l'avantage de présenter une bonne stabilité des estimations par rapport à l'échantillonnage.

Stabilité des estimations par rapport à l'échantillonnage

Les approches statistiques classiques se heurtent souvent à la durée limitée de l'observation des débits. En l'absence de longues chroniques de débit, l'estimation des crues de fréquence rare est très sensible aux événements observés les plus forts. On peut ainsi

calculer des distributions de probabilités très différentes lorsqu'on intègre quelques années d'observations supplémentaires comportant des crues fortes. La méthode SHYPRE est moins sensible à la durée d'observation car elle est basée sur une description de la pluie. On n'utilise pas une seule crue par an, mais plusieurs épisodes intenses chaque année. La stabilité par rapport à l'échantillonnage est manifeste sur certaines stations dont on fait varier la durée d'observation (figure 60).

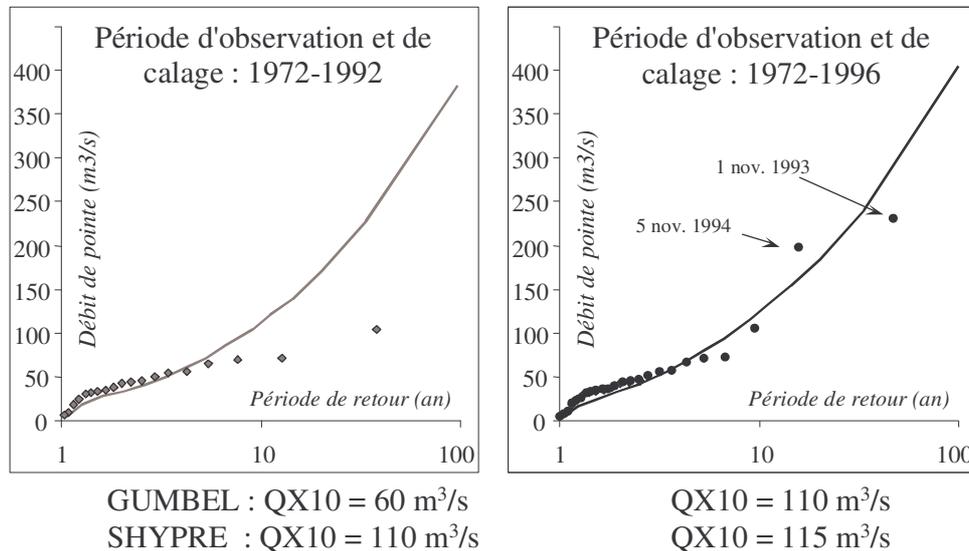


Figure 60 : stabilité par rapport à l'échantillonnage, bassin du Bevinco (ARNAUD *et al.*)

On constate que la distribution de probabilités tracée grâce à la méthode SHYPRE est peu sensible à l'ajout de 4 années d'observation. Sur la première figure on pourrait croire que le modèle fonctionne mal car la distribution simulée est mal ajustée aux données observées. En fait, avec 4 années d'observations supplémentaires comportant 2 crues fortes, on constate que le modèle a anticipé la tendance surexponentielle de la distribution. Il reproduit parfaitement la nouvelle distribution observée. Ces résultats ont été observés sur plusieurs bassins versants du Sud de la France (ARNAUD, 1997).

La méthode SHYPRE permet de tracer une distribution de probabilités stable par rapport à l'échantillonnage. La prédétermination des crues de fréquence rare est donc plus fiable qu'avec un ajustement statistique traditionnel.

2.2.2.2 Générateur de pluie horaire

Il existe différentes méthodes de génération de pluie horaire. Une revue bibliographique complète est proposée par ARNAUD (1997) à la suite de CERNESSON (1993). La méthode SHYPRE utilise une « approche directe » basée sur une description géométrique du signal.

Variables descriptives retenues

Le modèle de pluie a été développé par CERNESSON (1993) et ARNAUD (1997), la pluie est considérée comme un processus aléatoire et intermittent fait d'une succession d'états

secs et pluvieux. L'évolution de ces états décrit des lois de probabilité dont il faut dans un premier temps déterminer la nature et les paramètres.

L'observations de 50 stations pluviométriques du pourtour méditerranéen français a permis de déterminer 8 variables **indépendantes** descriptives de la pluie horaire (CERNESSON et al., 1996), elles suivent des lois de probabilité variées (tableau 3).

Variables décrivant la pluie	Lois de probabilité associées
Nombre d'épisodes par année	Loi de Poisson
Nombre de périodes pluvieuses (groupe d'averses sans période sèche) par épisode	Loi Géométrique
Nombre d'averses (hyétogrammes ayant un seul maximum) par période pluvieuse	Loi Géométrique
Durée de l'averse	Loi de Poisson
Intensité moyenne de l'averse	Loi Exponentielle
Position relative de l'intensité maximale	Loi Normale tronquée entre 0 et 1
Rapport intensité maximale / intensité moyenne de l'averse	Loi Exponentielle
Durée sèche entre deux averses (vaut zéro si deux averses sont groupées)	Loi Géométrique

Tableau 3 : variables descriptives de la pluie horaire et lois de probabilités associées

Les huit lois de probabilités sont définies par 21 paramètres au total. Ceux-ci doivent être calés pour chaque poste pluviométrique. Le calage est réalisé sur les épisodes pluvieux dont le cumul journalier est supérieur à 20 mm.

Les hyétogrammes horaires sont générés par tirage aléatoire des variables dans leurs lois de probabilités, en suivant une méthode de Monte Carlo et dans un ordre précis. Dans les faits, ARNAUD (1997) a montré que seuls 5 paramètres doivent être calés. Les autres paramètres peuvent être fixés régionalement car soit ils sont peu variables, soit le modèle est peu sensible à leur fluctuation.

Calage du modèle pour la vallée de la Thur

La vallée de la Thur est mal équipée en stations météorologiques automatiques. Seule la station du Markstein (cf. § 2.1.1.1) présente une chronique suffisamment longue. Nous avons utilisé les données horaires sur 8 années, de 1994 à 2002.

Le calage est effectué sur les 76 épisodes dont la pluie journalière est supérieure à 20 mm. On distingue deux saisons : l'été de juin à novembre et l'hiver de décembre à mai. Une fois les différentes simulations réalisées, on peut comparer les distributions observées et simulées pour différentes durées de pluie. Ci-dessous on a représenté la pluie maximale en 1 heure, 6 heures et 24 heures (figure 61).

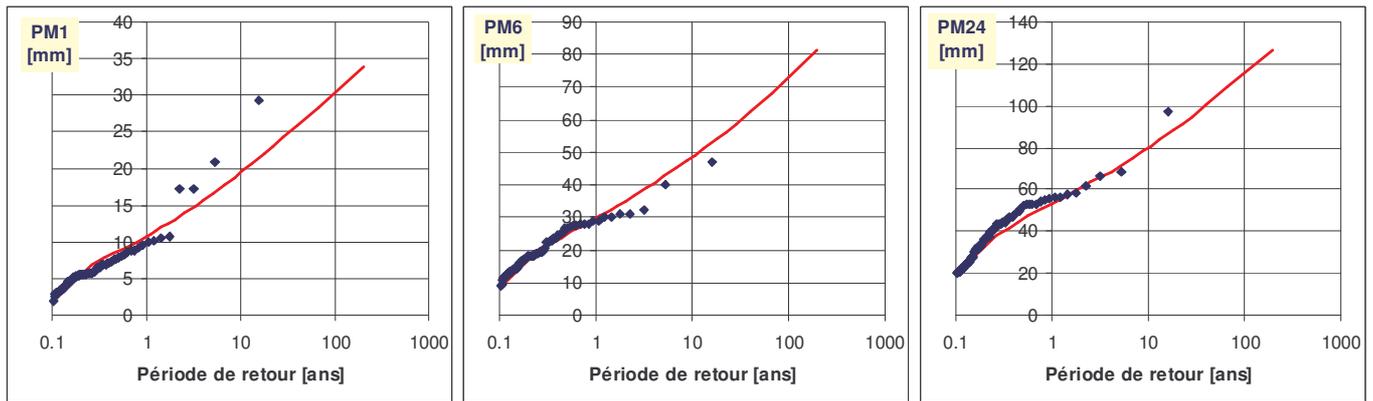


Figure 61 : distributions observées et simulées de la pluie maximale en 1 h, 6 h et 24 h

On constate que le modèle de pluie reproduit fidèlement la pluie maximale en 6 heures et 24 heures. La pluie maximale en 1 heure, qui est l'intensité maximale d'une averse, est sous-estimée pour les périodes de retour les plus élevées. Nous avons tenté de modifier le modèle pour qu'il reproduise mieux cette intensité maximale, mais cela modifiait aussi la pluie maximale de durée 6h et 24h. Les résultats présentés constituent le meilleur compromis que nous avons trouvé.

Le générateur de pluie étant calé et validé, il est désormais possible d'obtenir un grand nombre d'épisodes pluvieux statistiquement équivalents à ceux de la station du Markstein. Ces épisodes simulés sont utilisés pour la prédétermination des crues de la vallée de la Thur.

2.2.2.3 Application à la vallée de la Thur

Pour transformer la pluie en débit, il faut procéder au calage événement par événement du modèle GR3H. L'utilisateur peut visualiser l'ensemble des événements dont la pluie journalière est supérieure à 20 mm (76 événements sur la Thur) et choisir ceux qui seront retenus pour effectuer le calage. En effet, il vaut mieux ne pas tenir compte des événements pour lesquels les chroniques sont incomplètes, ni ceux pour lesquels la station pluviométrique n'est pas représentative (pluie localisée ne donnant pas de débit dans l'ensemble du bassin). Nous avons effectué le calage pour les trois stations de jaugeage du bassin : le Wissbach, Willer/Thur et Staffelfelden. On retient en moyenne une soixantaine d'événements observés pour faire le calage. Nous avons corrigé la pluie de chaque événement observé afin de tenir compte du gradient pluviométrique important dans la vallée.

Prise en compte du gradient pluviométrique

Le gradient pluviométrique dans la vallée de la Thur est très marqué, nous avons donc décidé de le prendre en compte. La seule information disponible sur la répartition de la pluie est la pluviométrie moyenne annuelle (cumulée) calculée par Météo-France (données AURELHY) (figure 62).

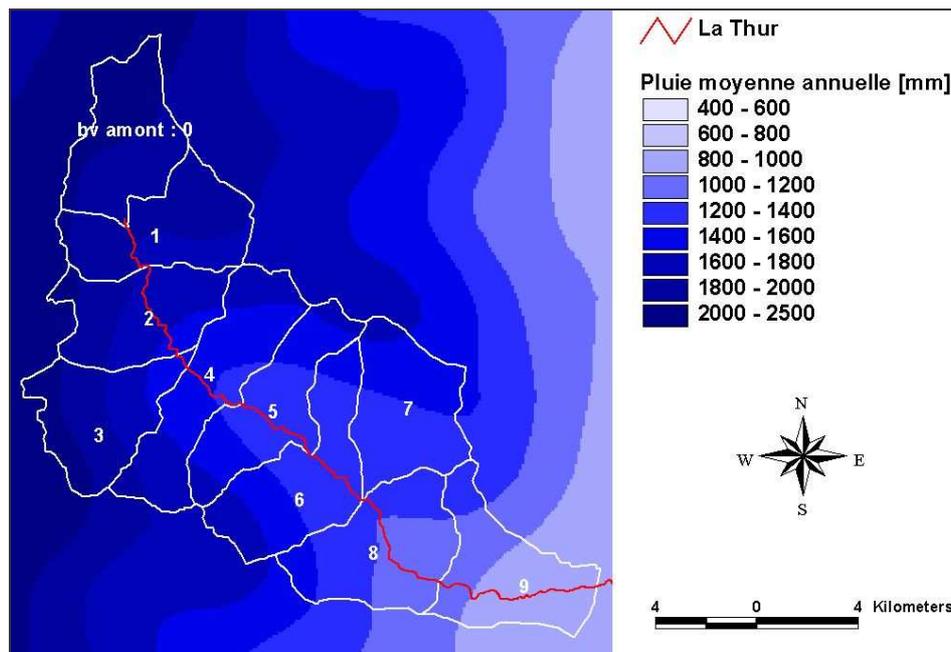


Figure 62 : carte permettant le calcul de la pluie moyenne annuelle pour les sous-bassins

Code Bassin	Superficie [km ²]	Altitude moyenne [m]	Pluie moyenne annuelle			Plage [mm]	Coefficient correcteur
			Moyenne [mm]	Minimale [mm]	Maximale [mm]		
0	22	888	1992	1838	2088	250	1.193
1	22	843	1855	1715	2035	320	1.111
2	21	733	1768	1491	2092	601	1.059
3	21	728	1859	1475	2115	641	1.113
4	26	718	1575	1358	1919	561	0.943
5	21	664	1443	1243	1721	478	0.864
6	25	669	1416	1213	1726	513	0.848
7	22	781	1398	1208	1666	458	0.837
8	25	540	1234	1051	1575	524	0.739
9	22	415	1008	868	1344	476	0.604
Willer/Thur	158	747	1690	1213	2115	903	1.012
Staffelfelden	262	657	1468	768	2119	1351	0.879

Tableau 4 : pluviométrie moyenne annuelle des différents bassins versants

A l'aide du SIG, nous avons calculé pour chaque bassin versant la pluviométrie moyenne annuelle (tableau 4) et nous l'avons comparée à celle enregistrée à la station du Markstein (1670 mm). Le coefficient correcteur de la pluie est le rapport de la pluviométrie moyenne annuelle du bassin versant sur la pluviométrie moyenne annuelle de la station Markstein.

Pour le calage du modèle pluie-débit aux stations Wissbach (sous bassin versant 7), Willer/Thur et Staffelfelden, nous avons appliqué le coefficient correcteur calculé ci-dessus aux hyétogrammes observés de la station du Markstein. Grâce à cette correction partielle de la pluie en entrée du modèle on obtient un jeu de paramètres plus représentatif de la capacité de rétention du bassin versant.

Calage événement par événement

Le modèle pluie-débit est calé événement par événement. C'est-à-dire que pour chaque événement on recherche le jeu optimal de paramètres (A, B, C et S_0/A). Dans la pratique la valeur de A est fixée ($\ln(A) = 5,8$) et on laisse S_0/A libre. Pour chaque événement, on calcule le débit initial à l'exutoire Q_{initial} à partir du premier débit observé. Le logiciel développé pour la mise en œuvre de SHYPRE permet de visualiser événement par événement la qualité du calage (figure 63). L'événement simulé est représenté en pointillés.

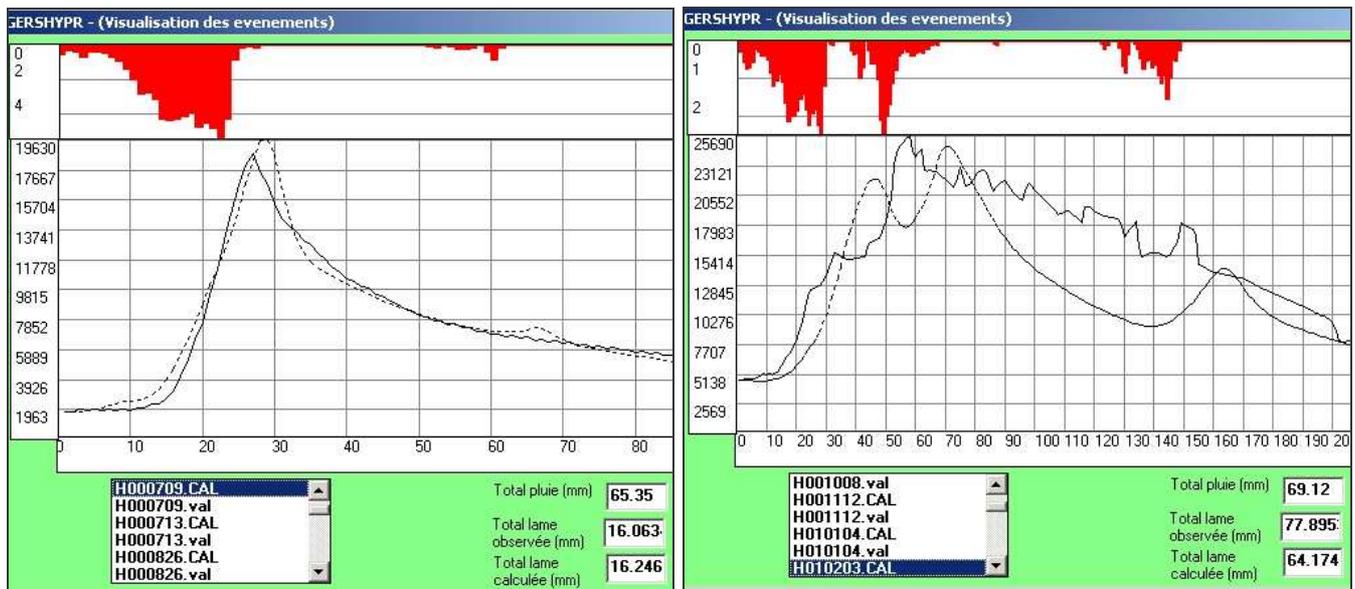


Figure 63 : contrôle du calage du modèle par visualisation des événements

Les deux exemples ci-dessus sont représentatifs des difficultés du calage événement par événement. L'événement présenté à gauche est très simple à modéliser car il y a un seul épisode de pluie de forme simple et probablement représentatif de la pluie de bassin réelle. L'événement de la figure de droite ne peut pas être simulé de façon satisfaisante car le hyétoGRAMME d'entrée est très découpé. Le modèle tente de lisser l'information pluviométrique, mais, même après optimisation, il subsiste trois pointes de crue qui correspondent aux trois intensités maximales de l'épisode pluvieux. On peut donner deux explications plausibles :

- La pluie observée à la station du Markstein est peut-être peu représentative de la pluie réelle ayant touché le bassin versant car nous disposons d'un seul poste pluviométrique.
- La décroissance lente du débit est parfois mal reconstituée par le modèle.

La performance du modèle pluie-débit est calculée pour chaque événement, mais on recherche surtout une performance globale satisfaisante. Le critère de performance du modèle est le critère de Nash (ARNAUD, 1997). La performance optimale vaut 100 (tableau 5).

Bassin versant	Nash mini	Nash maxi	Nash moyen	Nash médian
Wissbach	-136.9	95.3	64.9	81.5
Willer/Thur	-222.0	96.9	64.2	82.2
Staffelfelden	-273.8	97.5	59.5	80.0

Tableau 5 : performance du modèle au calage pour les trois bassins versants jautés

Le critère de Nash moyen n'est pas représentatif de la qualité du calage, car quelques événements très difficiles à reproduire ont un critère de Nash catastrophique (valeurs négatives). Le critère de Nash médian est plus juste de ce point de vue et on peut constater que celui-ci est assez bon (plus de 80) et homogène pour les trois bassins versants. Avec une valeur de critère de Nash au-delà de 80 on peut estimer que le modèle pluie-débit est bien calé (ARNAUD et al., 2001a).

Le calage événement par événement produit un jeu de paramètres pour chaque événement. On définit le jeu de paramètres optimal de chaque bassin versant en calculant la valeur médiane de chaque paramètre pour deux saisons distinctes : l'été de juin à novembre et l'hiver de décembre à mai (tableau 6). On calcule également les écart-types des valeurs des paramètres qui seront utiles pour paramétrer leurs lois de probabilités. On obtient un jeu de paramètres pour chaque bassin versant et pour chaque saison. A est fixé ($\ln(A) = 5,8$).

Saison	Superficie [km ²]	LnA	LnB	Ln(C-0.5)	Q _{initial} [m ³ /s]	S ₀ /A	Coef. pluie	sLnA	SLnB	s(Ln(C-0.5))	s(S ₀ /A)
hiver	22	5.8	5.76	2.48	0.31	0.73	0.84	0	0.76	0.63	0.2
	159	5.8	5.93	2.31	4.02	0.98	1.01	0	0.67	0.48	0.2
	249	5.8	5.74	2.76	4.98	0.95	0.88	0	0.56	0.42	0.17
été	22	5.8	4.55	1.57	0.1	0.34	0.84	0	1.15	0.85	0.16
	159	5.8	5.64	1.88	2.14	0.49	1.01	0	1.05	0.5	0.23
	249	5.8	5.43	2.61	2.01	0.53	0.88	0	0.8	0.34	0.2

Tableau 6 : jeux de paramètres retenus pour les trois bassins versants jaugés

On observe que la valeur de saturation initiale du réservoir sol (S_0/A) est très élevée en hiver car les bassins versants de la Thur sont saturés par des épisodes de pluie longs et rapprochés. La réaction des bassins versants au signal pluvieux sera plus rapide et intense en hiver qu'en été. Les crues historiques les plus fortes se sont en général produites entre décembre et mai.

Résultats des simulations

Pour simuler les événements de crue on utilise les hyétogrammes simulés générés par le modèle de pluie. Le modèle pluie-débit ne fonctionne pas avec des paramètres fixes. Pour chaque événement, on tire aléatoirement une valeur de paramètre dans sa loi de probabilités. Le paramètre S_0/A suit une loi normale tronquée entre 0 et 1. C suit une loi lognormale. On a mis en évidence une liaison linéaire entre $\ln(B)$ et S_0/A (ARNAUD, 1997), la valeur de B est donc déduite de celle de S_0/A en tenant compte de la distribution de probabilité du coefficient de détermination de la relation (r^2).

La validation de la méthode SHYPRE peut se faire par comparaison des distributions observées et simulées du débit de pointe, mais aussi des lames d'eau ruissellées pour différentes durées (ARNAUD, 1997). La distribution simulée du débit de pointe est tracée point par point à partir de l'analyse statistique du grand nombre d'événements simulés (figure 64).

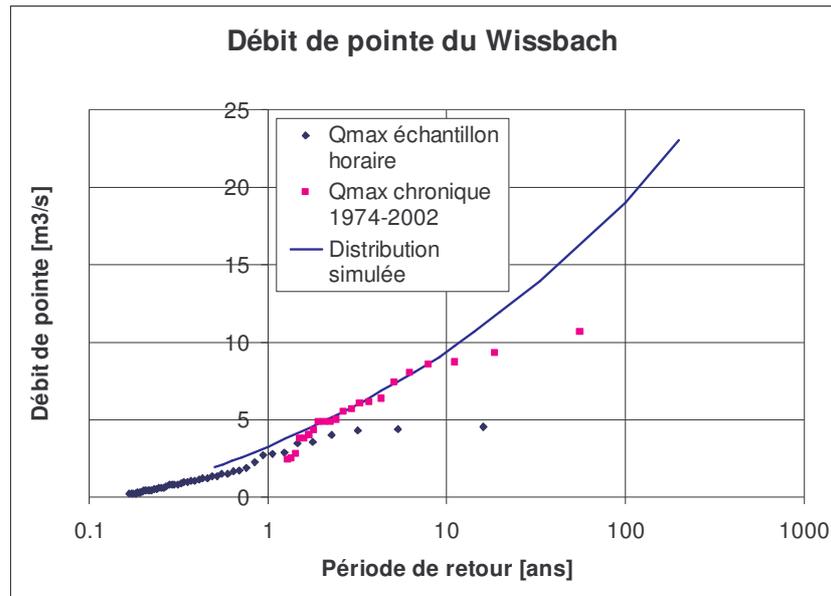


Figure 64 : distributions observées et simulée pour le Wissbach

Deux distributions observées sont tracées car on peut utiliser soit le débit maximum annuel (chronique de 1974 à 2002), soit le débit de pointe des événements utilisés pour caler le modèle pluie-débit (échantillon horaire de la période 1994-2002). Les différences entre les deux distributions proviennent du fait que certains événements très forts (1983 et 1990) ne figurent pas dans l'échantillon horaire.

Concernant la validation de SHYPRE, on observe que la distribution simulée suit bien la distribution observée jusqu'à la période de retour 10 ans. Ensuite, la distribution simulée a une tendance « surexponentielle » (c'est-à-dire des quantiles plus forts que ceux d'une loi de Gumbel lorsque la période de retour augmente). Ce comportement est comparable à celui des pluies simulées, mais la distribution de probabilités des débits observés ne présente pas cette caractéristique. Cependant, il suffirait d'observer un événement fort supplémentaire pour que la distribution observée soit différente. Or, nous avons vu plus haut (cf. § 2.2.2.1) que SHYPRE est plus stable qu'un ajustement statistique pour les périodes de retour élevées. On l'observe ici : bien que le modèle ait été calé sur la période d'observation 1994-2002, il reproduit de façon satisfaisante la distribution observée sur la période 1974-2002. Nous validons la distribution simulée pour le bassin versant du Wissbach.

Les résultats obtenus sur la Thur à Willer/Thur (figure 65) sont comparables à ceux obtenus pour le Wissbach. La station de jaugeage est sans doute plus fiable car on n'observe pas de palier pour les périodes de retour les plus fortes. Le débit centennal estimé avec la méthode SHYPRE est compris dans l'intervalle de confiance à 90 % de l'ajustement d'une loi de Gumbel (valeur centrale 150, intervalle de confiance [125 ; 200]). Ceci ne constitue en aucun cas une preuve de la qualité de l'estimation, mais cela permet de montrer que les débits de crue calculés par SHYPRE sont réalistes.

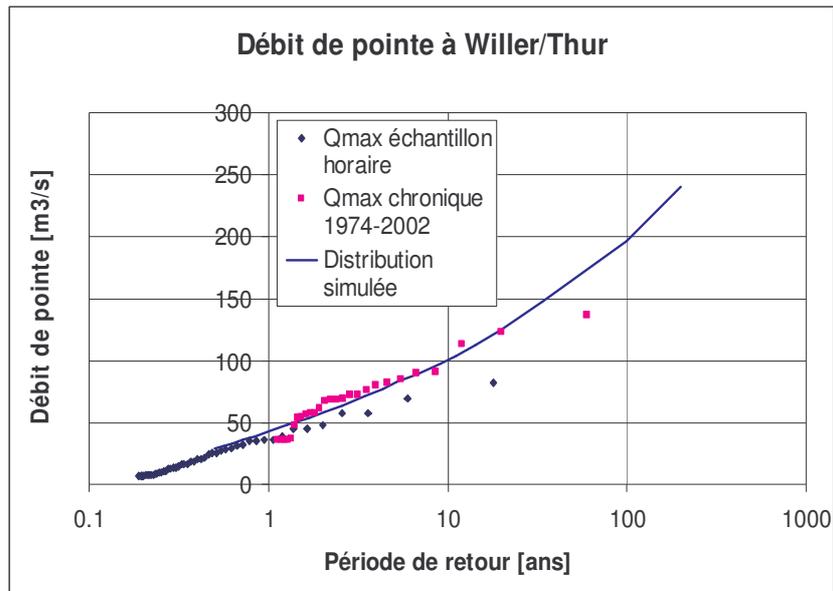


Figure 65 : distributions observées et simulée à Willer/Thur

Les résultats obtenus à Staffelfelden confirment l'efficacité de la méthode SHYPRE appliquée à la Thur (figure 66). La reconstitution du débit de pointe est satisfaisante. Nous verrons plus loin que nous attachons beaucoup d'importance à cette variable dans la méthodologie.

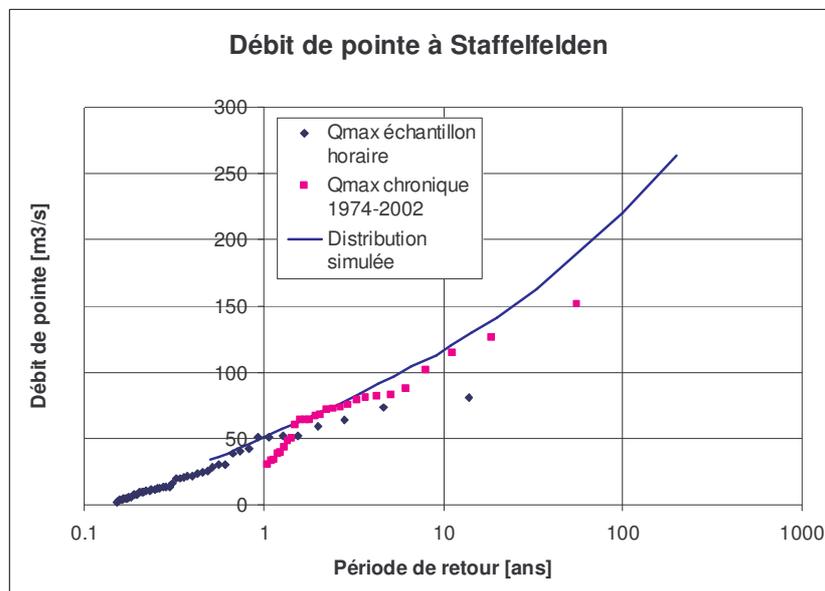


Figure 66 : distributions observées et simulées à Staffelfelden

Le débit de pointe des crues semble simulé de manière satisfaisante, mais il faut également vérifier si le volume de la crue est reconstitué correctement. Pour visualiser la qualité de la simulation des volumes de crue, on observe les lames ruissellées en 1 heure, 6 heures et 24 heures (figure 67). Ces durées ont été choisies car elles correspondent aux durées pour lesquelles on a validé le modèle de pluie.

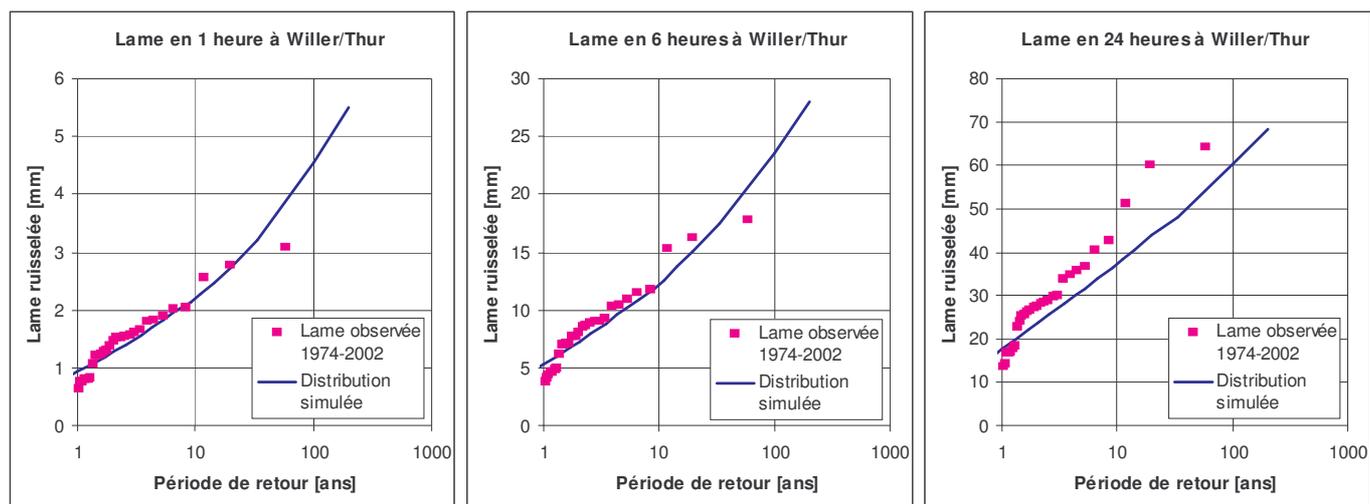


Figure 67 : lames ruisselées en 1 heure, 6 heures et 24 heures à Willer/Thur

La lame ruisselée en 1 heure est très bien reconstituée, cela rejoint les constatations faites sur le débit de pointe qui est une variable relativement proche. La lame ruisselée en 6 heures est également bien reconstituée, mais la lame ruisselée en 24 heures est sous-estimée. Les résultats complets pour les trois stations de jaugeage sont disponibles en **Annexe 1**. On constate que seule la station de Willer/Thur présente une sous-estimation des lames ruisselées. Le calage du modèle pluie-débit ayant été assez difficile pour cette station, il est probable que ce soit cette partie de la modélisation qui dégrade les résultats.

En **Annexe 1**, nous avons représenté simultanément la distribution de la pluie simulée et la distribution de la lame ruisselée, afin de comparer les deux distributions pour les fréquences rares. La tendance « surexponentielle » de la distribution des lames ruisselées est visiblement liée au comportement similaire de la pluie aux différentes durées.

La méthode SHYPRE permet la prédétermination des crues pour les fréquences rares. Elle présente une bonne stabilité des estimations par rapport à l'échantillonnage. Après calage du modèle de pluie et du modèle pluie-débit, on obtient de bons résultats sur les trois stations de la vallée de la Thur, notamment du point de vue de la simulation du débit de pointe. Nous pouvons donc utiliser les hydrogrammes simulés par la méthode SHYPRE pour alimenter le modèle hydraulique. Les événements doivent être choisis soigneusement car on ne connaît leur fréquence qu'aux trois stations de jaugeage.

2.2.3 Sélection des événements de référence

L'objectif final de la modélisation est de produire une cartographie de l'aléa en fréquence de submersion. Le calcul direct d'une fréquence de submersion en tout point du bassin versant nécessite soit un long historique des submersions, soit un grand nombre de cartes d'inondations simulées. On ne dispose pas de données historiques suffisantes, c'est pourquoi la simulation est incontournable. Réaliser un grand nombre de simulations hydrauliques en régime transitoire suivies d'une cartographie n'est pas envisageable en l'état actuel du développement des outils informatiques. Pour limiter le nombre de simulations, on

sélectionne au préalable des événements de référence aux caractéristiques particulières. Dans un premier temps, nous choisissons une variable hydrologique représentative de la crue (cf. § 2.2.3.1). Ensuite, nous proposons une méthode de sélection des événements de référence (cf. § 2.2.3.2) qui est appliquée à la vallée de la Thur (cf. § 2.2.3.3).

2.2.3.1 Variable représentative de la crue

Nous avons déjà montré (cf. § 1.2.3.1) que la fréquence d'une crue dépend de la variable hydrologique considérée. Pour simplifier la sélection des événements de référence, nous avons défini la variable la plus représentative de la crue dans le contexte des rivières de moyenne montagne.

Choix du débit de pointe

Selon que l'on s'intéresse au débit de pointe, aux lames ruissellées ou encore au volume de la crue, on peut attribuer plusieurs périodes de retour à un même événement. Cette question a été abordée dans le cadre de la méthode Inondabilité (GILARD, 1998a). Les concepteurs y ont répondu par la modélisation des hydrogrammes synthétiques monofréquences. Ces hydrogrammes sont construits à partir de l'observation des pluies, de telle sorte que les lames ruissellées aient la même fréquence quelle que soit la durée considérée. Cette approche est très intéressante lorsqu'on s'intéresse à un problème localisé dans l'espace, car on dispose d'un événement ayant **localement** une seule fréquence quelle que soit la variable considérée.

Dans notre cas, nous désirons mener une approche spatialisée. Or, un hydrogramme synthétique monofréquence ne conserve pas nécessairement la même fréquence d'amont en aval. Il n'est pas évident qu'il puisse mathématiquement exister un événement à la fois monofréquence pour toutes ses variables et en tout point de l'espace. Toutefois, s'il existe, sa probabilité d'occurrence est très faible. Il est donc peu probable qu'il fasse partie des événements simulés aléatoirement par la méthode SHYPRE, même en augmentant le nombre de simulations. Notre objectif principal étant une approche spatialisée, nous avons réduit les contraintes de sélection en choisissant de ne retenir que la variable hydrologique la plus représentative de la crue.

Nous choisissons le débit de pointe, car nous faisons l'hypothèse que le débit de pointe coïncide avec la hauteur maximale de la crue et donc avec l'extension géographique maximale de l'inondation. C'est une approximation car dans la réalité la relation entre la hauteur d'eau et le débit ne suit pas la même relation pendant la montée de la crue et pendant la décrue (GRAF et ALTINAKAR, 2000).

Un observateur fixe d'une crue voit successivement passer (figure 68) :

1. d'abord le maximum de vitesse (V_{\max})
2. puis le maximum de débit (Q_p)
3. et enfin le maximum de hauteur d'eau (h_{\max}).

La courbe $Q = f(h)$, décrite dans une section donnée pendant une crue, montre un « découplage » entre la montée de la crue et la décrue. On appelle ce phénomène une *hystérésis* (figure 68).

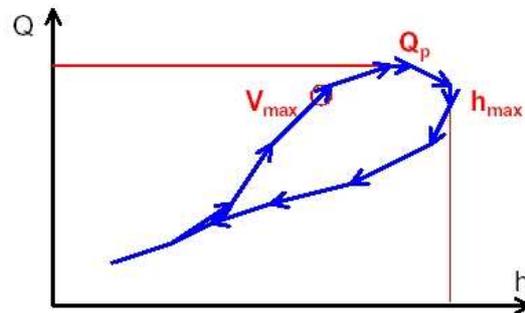


Figure 68 : hystérésis d'une crue (CETMEF, 2002)

Dans le cas des rivières de moyenne montagne, l'*hystérésis* est beaucoup moins marquée car la pente du cours d'eau est élevée : les ondes de crues sont cinématiques et la relation $Q = f(h)$ est biunivoque. L'hypothèse que nous faisons ici sera vérifiée par modélisation hydraulique (cf. § 2.3.3.2).

Variabilité spatiale du débit de pointe

L'attribution d'une fréquence à un événement en ne considérant que le débit de pointe est aisée. On peut rapidement montrer qu'une crue observée ou simulée a une période de retour variable selon la station considérée (figure 69).

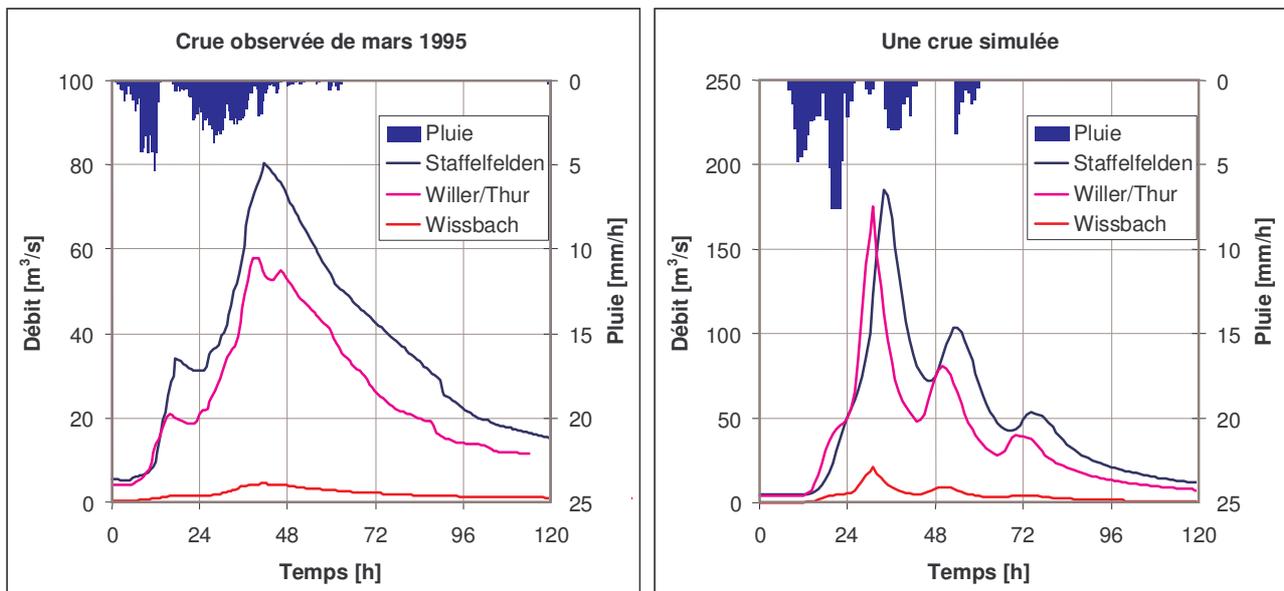


Figure 69 : une crue observée et une crue simulée sur les trois bassins versants

A l'aide des distributions du débit de pointe simulées aux trois stations de la vallée de la Thur (figures 64, 65 et 66), on peut estimer la période de retour de l'événement pour chaque station (tableau 7).

Bassin versant	Crue observée de mars 1995		Une crue simulée	
	Débit de pointe [m ³ /s]	Période de retour [ans]	Débit de pointe [m ³ /s]	Période de retour [ans]
Wissbach	4.4	1	20.5	100
Willer/Thur	57.8	2	175.5	70
Staffelfelden	80.5	4	185.3	50

Tableau 7 : variabilité spatiale de la fréquence du débit de pointe

Les deux événements présentés ci-dessus sont d'ampleurs très différentes, mais ils montrent tous deux que la fréquence d'une même crue peut varier d'un endroit à l'autre du bassin versant. Il y a plusieurs explications à ce phénomène :

- La répartition de la pluie dans le bassin versant n'est pas toujours homogène, ainsi on peut parfois observer une crue de période de retour plus forte à l'aval qu'à l'amont ou inversement.
- La crue simulée a été calculée avec une pluie de bassin, ce n'est donc pas la variabilité spatiale de la pluie qui peut expliquer la variabilité spatiale de la fréquence, mais la structure du hyétogramme. La pluie à l'origine de la crue simulée est intense et courte : elle est plus défavorable aux bassins versant ayant un temps de concentration court. Ainsi, les bassins versants amont (Wissbach et Willer/Thur) produisent une crue plus forte que le bassin versant aval (Staffelfelden). L'événement de mars 1995 présente une pluie peu intense, mais relativement longue. La crue est donc plus forte à l'aval que dans les bassins versants amont.

La fréquence du débit de pointe de la crue en différents endroits du bassin versant est étroitement liée à la structure de la pluie.

2.2.3.2 Méthode de sélection des événements de référence

Pour calculer la fréquence de submersion en tout point du bassin versant, la méthode la plus directe serait de prolonger la méthode SHYPRE par une modélisation hydraulique de tous les événements simulés, puis par leur cartographie.

Objectif de la sélection d'événements de référence

Grâce à la méthode SHYPRE on peut réaliser 100 ou 1000 ans de simulations pour obtenir un échantillon de plusieurs milliers de crues simulées qui respectent la distribution en fréquence des événements observés. On peut envisager de poursuivre la démarche par une modélisation hydraulique de **tous** les événements générés par SHYPRE. On pourrait exploiter les simulations hydrauliques de deux manières différentes :

- En un point donné du cours d'eau, on relève tous les débits de pointe atteints par les événement simulés et on calcule statistiquement la distribution de probabilité du débit de pointe. En reproduisant cette approche en plusieurs points du cours d'eau, on peut obtenir une distribution du débit de pointe spatialisée. On peut ensuite simuler en régime permanent les différentes crues de référence (périodes de retour de 1 an à 200 ans) puis les cartographier.

- On peut aller plus loin dans la simulation exhaustive des événements en produisant autant de cartes d'inondation qu'il y a d'événements simulés par SHYPRE. Ensuite, à l'aide d'un Système d'Information Géographique, on calcule en tout point de l'espace le nombre d'inondations observées. On détermine la fréquence de submersion en tout point de l'espace en calculant pour chaque point le rapport du nombre d'événements inondant par rapport au nombre total d'événements simulés.

Ces approches par simulation exhaustive sont pour l'instant limitées par la puissance de calcul des ordinateurs de bureau dont nous disposons. En effet, nous verrons plus loin que les simulations hydrauliques en régime transitoire demandent un temps de simulation important et un contrôle des résultats soigné. Cela ne permet pas d'envisager la simulation de milliers d'événements. La transcription cartographique d'un grand nombre d'événements nécessite des manipulations de fichiers fastidieuses et un espace mémoire de stockage colossal. Chaque carte d'inondation peut représenter plusieurs centaines de Mega-octets de mémoire.

Pour limiter le nombre de simulations hydrauliques et le nombre de cartes d'inondation à tracer, nous avons entrepris de rechercher des événements de référence particuliers.

Événements de référence homogènes en fréquence

La méthode SHYPRE permettant de générer un très grand nombre d'événements, nous avons choisi d'exploiter le vaste échantillon de crues simulées pour sélectionner 8 événements de référence correspondant aux 8 périodes de retour étudiées (1 an, 2 ans, 5 ans, 10 ans, 20 ans, 50 ans, 100 ans et 200 ans).

Pour déterminer la fréquence de submersion en tout point d'une crue simulée, la méthode la plus directe est de simuler **un événement qui conserve la même fréquence d'amont en aval**. Cet événement particulier n'est pas un hydrogramme synthétique monofréquence car on ne s'intéresse qu'au débit de pointe. Il est peu probable de trouver ces 8 événements parmi l'échantillon de crues observées car ils sont peu nombreux, notamment pour les fréquences les plus rares. Par contre, parmi les milliers d'événements simulés par la méthode SHYPRE, il en existe qui présentent cette caractéristique de par la structure de la pluie simulée.

Le critère de sélection d'un événement est simple : **l'événement est retenu si le débit de pointe a la même fréquence pour chacun des bassins versants simulés**.

Dans le cas de la vallée de la Thur, nous disposons idéalement de trois bassins versants jaugés de tailles complémentaires (22 km², 160 km² et 250 km²). On peut donc rechercher des événements de référence dont le débit de pointe est homogène en fréquence pour les trois bassins versants. Pour déterminer les quantiles de chaque bassin versant, on utilise les distributions simulées par la méthode SHYPRE.

Nota : un quantile de débit est la valeur de débit correspondant à une période de retour ou à une fréquence usuelle. Par exemple, le débit décennal est le quantile correspondant à une période de retour de dix ans.

2.2.3.3 Événements de référence retenus pour la Thur

La spatialisation des débits entreprise dans la vallée de la Thur repose sur la transposition du modèle pluie-débit aux sous-bassins versants qui alimentent le modèle hydraulique. On peut sélectionner les événements de référence parmi le grand nombre d'hydrogrammes générés simultanément sur des bassins versants de tailles différentes. La première étape consiste à déterminer les quantiles de débit de pointe à atteindre pour chaque bassin versant.

Prédétermination des quantiles de débit de pointe

Nous avons montré plus haut que les sous-bassins versants de la Thur présentent des caractéristiques physiques très proches de celles du Wissbach (même superficie, même géologie). Les différences principales sont l'altitude moyenne et la pluviométrie moyenne annuelle. Nous avons constitué trois groupes de sous-bassins versants de caractéristiques assez homogènes. Pour chaque groupe, nous avons calculé la superficie moyenne et le coefficient correcteur de pluie moyen (tableau 8). Le Wissbach fait partie du deuxième groupe de sous-bassins versants. Les paramètres du modèle pluie débit de chaque groupe sont ceux calés pour le Wissbach.

Saison	Bassins versants	Superf. [km ²]	Ln(A)	Ln(B)	Ln(C-0,5)	Q ₀ [m ³ /s]	S ₀ /A	Coef. cor. pluie
hiver	0, 1, 2, 3	21.5	5.8	5.76	2.48	0.31	0.73	1.12
	4, 5, 6, 7	23.7	5.8	5.76	2.48	0.31	0.73	0.88
	8, 9	23.9	5.8	5.76	2.48	0.31	0.73	0.67
	Willer/Thur	160	5.8	5.93	2.31	4.02	0.98	1.01
	Staffelfelden	250	5.8	5.74	2.76	4.98	0.95	0.88
été	0, 1, 2, 3	21.5	5.8	4.55	1.57	0.1	0.34	1.12
	4, 5, 6, 7	23.7	5.8	4.55	1.57	0.1	0.34	0.88
	8, 9	23.9	5.8	4.55	1.57	0.1	0.34	0.67
	Willer/Thur	160	5.8	5.64	1.88	2.14	0.49	1.01
	Staffelfelden	250	5.8	5.43	2.61	2.01	0.53	0.88

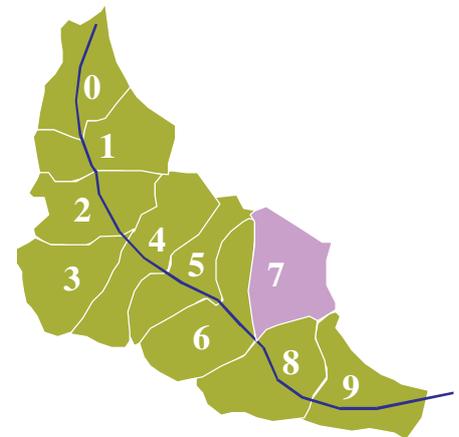
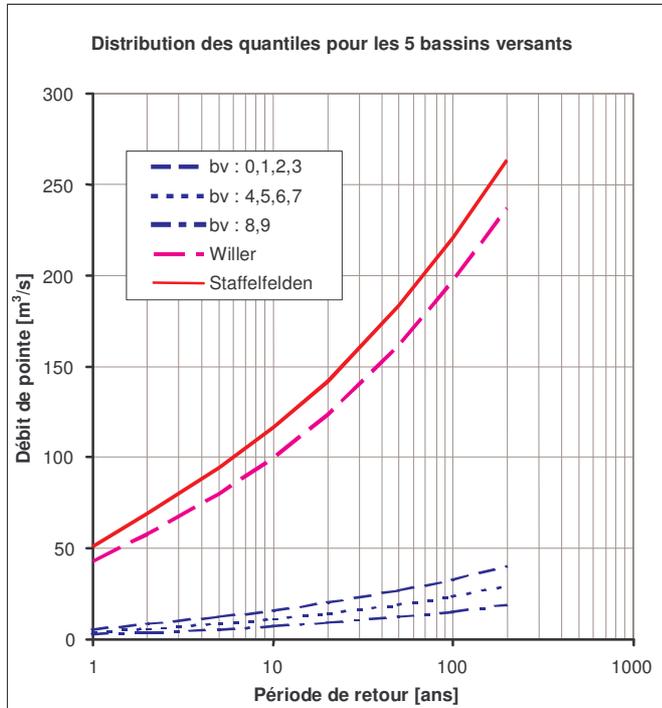


Tableau 8 : paramètres du modèle pluie-débit utilisés pour la Thur

La première étape de la simulation consiste à calculer la distribution du débit de pointe pour les cinq bassins versants à l'aide de la méthode SHYPRE (figure 70 et tableau 9).

On remarque que bien que les superficies des bassins versants de Willer/Thur et Staffelfelden soient très différentes (160 km² et 250 km²), leurs quantiles sont très proches. Cela est dû au fait que les sous-bassins versants à l'aval de Willer/Thur ont une pluviométrie moyenne annuelle plus faible. Leurs pointes de crues sont également moins concomitantes avec celle de la Thur, ce qui explique leur faible contribution au débit de pointe.

Les quantiles des sous-bassins versants obtenus avec les mêmes paramètres pluie-débit, mais une pluie de bassin corrigée, ont des valeurs très différentes. Cela indique que le gradient pluviométrique a une incidence importante sur la spatialisation des quantiles dans les bassins versants de moyenne montagne.



Période de retour [ans]	Bassins 0,1,2,3 [m³/s]	Bassins 4,5,6,7 [m³/s]	Bassins 8,9 [m³/s]	Willer/Thur [m³/s]	Staffelfelden [m³/s]
1	6	4	3	43	51
2	8	6	4	58	69
5	12	9	6	80	94
10	16	11	7	100	117
20	20	14	9	123	142
50	27	19	12	161	183
100	33	24	15	197	220
200	41	29	19	234	264

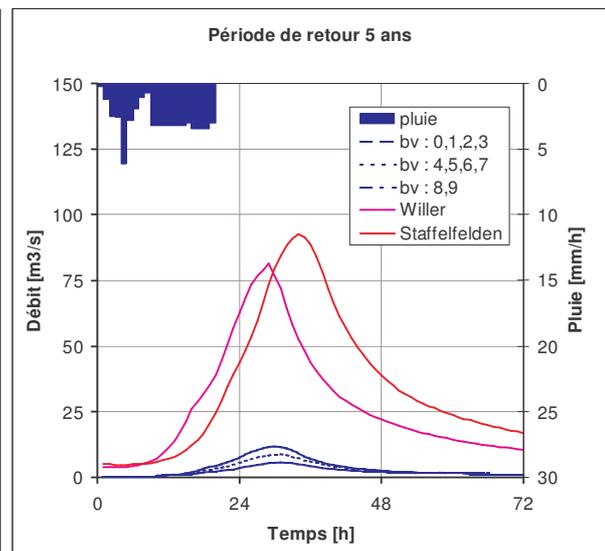
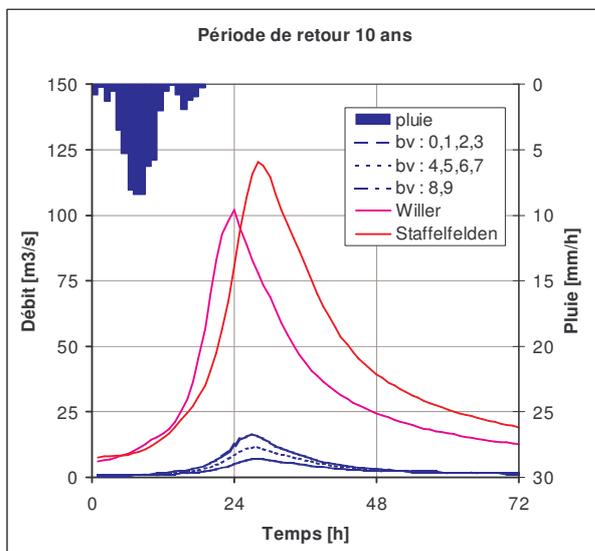
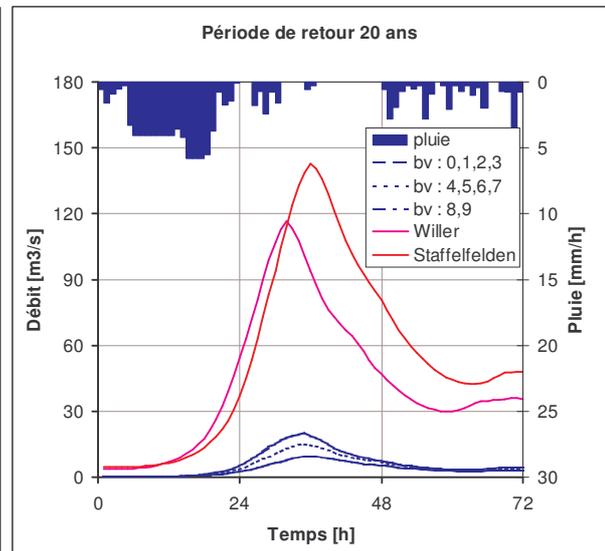
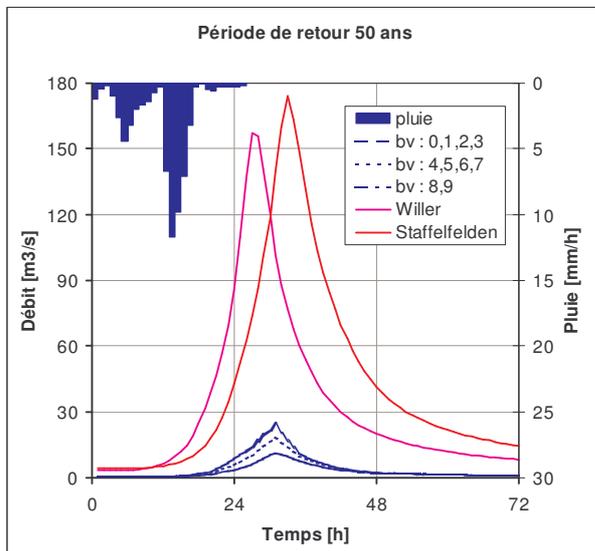
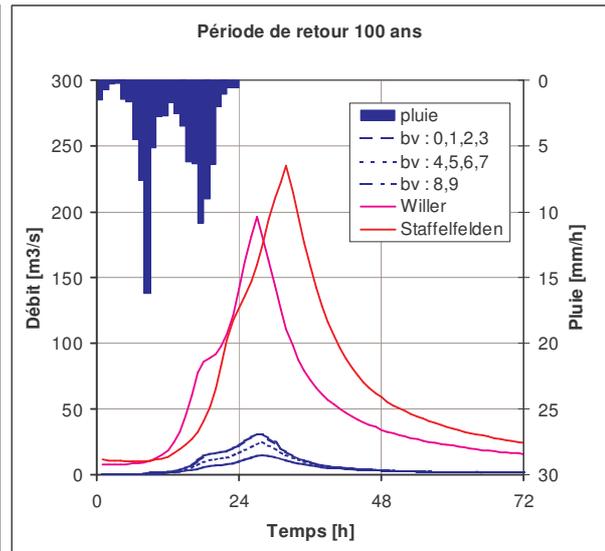
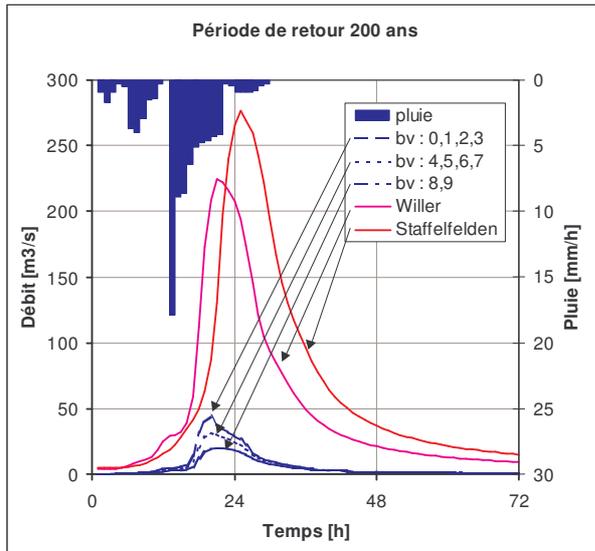
Tableau 9 : quantiles de débits prédéterminés avec la méthode SHYPRE

Figure 70 : distribution des quantiles pour les cinq classes de bassins versants

Sélection des événements de référence

La prédétermination des quantiles de référence permet d'indiquer les valeurs de débit de pointe attendues pour chaque classe de bassin versant. Le modèle simule aléatoirement des crues de forme et d'ampleur très variées. Nous lui indiquons de sélectionner les événements pour lesquels le débit de pointe atteint la même période de retour dans tous les bassins versants simultanément. Nous avons toléré 5% d'erreur autour du débit de pointe.

Les événements de période de retour inférieure à 10 ans sont très nombreux parmi les simulations, car leur probabilité d'apparition est forte. Quelques années de simulations suffisent pour obtenir les événements recherchés. Pour obtenir des événements de fréquence rare nous avons simulé plusieurs milliers d'années (200 fois 200 ans). Parmi les événements sélectionnés nous avons retenu les hydrogrammes qui présentent la forme la plus simple (une seule pointe de crue). Ci-dessous (figure 71) sont présentés les 8 événements retenus. Les échelles de débit changent d'une ligne à l'autre, mais l'échelle des pluies est identique pour tous les événements, afin de faciliter leur comparaison.



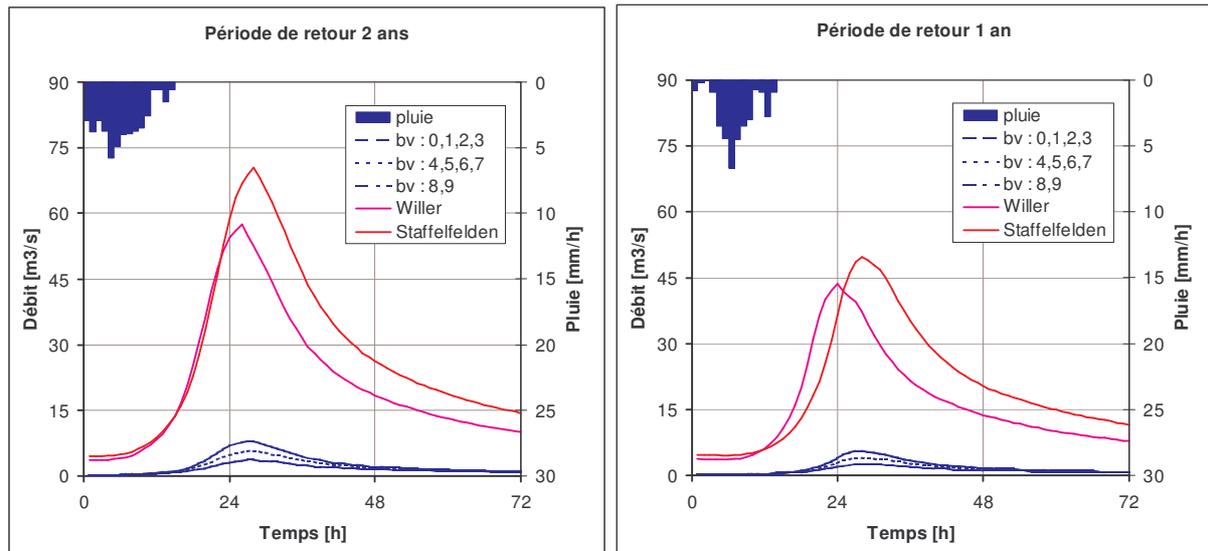


Figure 71 : hyétogrammes et hydrogrammes des 8 événements de référence

Les événements de référence retenus remplissent le critère d'homogénéité en fréquence sur les 5 bassins versants. On peut toutefois observer un problème de décalage des débits dans le temps. En effet, pour certains événements on constate que la pointe de crue arrive plus tôt à Willer/Thur qu'à l'exutoire des sous-bassins versants amont. Ce décalage est lié au tirage aléatoire de la valeur du paramètre C (cf. 2.2.1.3). Or, c'est elle qui contrôle le décalage temporel des hydrogrammes simulés. Cela n'est pas gênant pour les simulations hydrauliques ultérieures, puisqu'on n'utilise que les hydrogrammes de sous-bassins versants. Nous reviendrons sur cette question lors de la validation du modèle hydraulique.

Remarquons que nous ne connaissons pas les conditions d'existence d'une solution, question qui implique les sous-modèles probabilistes des états initiaux des différents sous-bassins versants. Ceci est particulièrement vrai pour les bassins versants de plusieurs milliers de kilomètres carrés, dont le régime hydrologique peut-être différent à l'amont et à l'aval. On ne peut peut-être pas reconstituer un événement de fréquence rare en même temps à l'amont et à l'aval.

L'approche événementielle spatialisée que nous avons développée produit des événements de référence ayant une fréquence de submersion unique en tout point du bassin versant. Cette approche repose sur l'hypothèse d'une relation univoque entre la hauteur d'eau maximale et le débit de pointe qui doit être vérifiée dans le contexte des rivières de moyenne montagne. La deuxième phase de modélisation est la cartographie de l'aléa à l'échelle du bassin versant.

2.3 Cartographie de l'aléa à grande échelle

Les hydrogrammes de référence des sous-bassins versants sont utilisés comme données d'entrée du modèle hydraulique. Le choix du type de modèle hydraulique et du logiciel qui permet de le mettre en œuvre est une étape importante. Il faut en effet garder à l'esprit que la méthodologie proposée ici se veut opérationnelle. Elle doit donc tenir compte des difficultés techniques d'une modélisation hydraulique à grande échelle. L'acquisition et la valorisation des données topographiques est également une problématique très importante dans l'objectif d'une cartographie de l'aléa à grande échelle. Nous présentons dans un premier temps les contraintes de la modélisation hydraulique et le modèle que nous avons retenu (cf. § 2.3.1). Ensuite, nous abordons la question des leviers topographiques et de leur exploitation pour la modélisation hydraulique (cf. § 2.3.2). Enfin, nous donnons les résultats obtenus pour la vallée de la Thur (cf. § 2.3.3).

2.3.1 Contraintes de modélisation et choix du modèle

La modélisation hydraulique a pour but le calcul des hauteurs d'eau pour la cartographie de l'aléa. Il s'agit d'une étape importante dans l'évaluation du risque, car les aménagements et les réglementations ultérieures se référeront aux cotes et aux enveloppes de crues issues de la modélisation hydraulique. Nous définissons tout d'abord l'exigence de la modélisation en terme de représentation des écoulements (cf. § 2.3.1.1). Nous présentons ensuite les contraintes de la modélisation en régime transitoire (cf. § 2.3.1.2), puis le logiciel que nous avons retenu (cf. § 2.3.1.3).

2.3.1.1 Représentation des écoulements

La cartographie des crues est réalisée dans le but de produire un diagnostic du risque d'inondation. Les cartes sont donc susceptibles d'être utilisées dans un cadre réglementaire. La définition des variables cartographiées et de leur précision permet de choisir un modèle hydraulique adapté aux objectifs de la modélisation.

Extension des inondations

Les cartes d'aléa sont à la base des zonages réglementaires du risque d'inondation. Le contour de la crue de référence, le plus souvent la crue centennale, est retenu pour délimiter le périmètre des zones inconstructibles. Lorsque la pression foncière est forte et lorsque le parcellaire est très découpé, l'épaisseur du trait de la carte de zonage représente des dizaines de milliers d'euros de manque à gagner pour les propriétaires des terrains. Dans les vallées de moyenne montagne, le fond de vallée est en grande partie urbanisé, mais il subsiste des espaces non bâtis qui intéressent de plus en plus les propriétaires privés et les communes.

Dans la vallée de la Thur, la proximité d'une grande ville comme Mulhouse augmente encore la demande de terrains résidentiels à lotir.

La modélisation de l'aléa doit en premier lieu privilégier une bonne précision sur l'extension géographique des inondations. Nous verrons plus loin que cela nécessite une bonne description de la topographie du lit mineur et du lit majeur.

Variables cartographiées

Pour analyser le risque, le débit de pointe de la crue ne constitue qu'une donnée intermédiaire permettant la modélisation hydraulique. On s'intéresse aux variables qui caractérisent physiquement l'inondation. Les variables intéressantes sont les suivantes (TORTEROTOT, 1994) :

- La **hauteur d'eau** est la première variable à considérer. En effet, une inondation dont la hauteur d'eau est d'une vingtaine de centimètres ne représente pas le même danger qu'une inondation présentant des hauteurs d'eau de plus de 1 m. On peut déterminer des seuils de hauteurs d'eau qui ont une signification en terme de dégâts potentiels. Cette variable doit donc être connue avec une précision raisonnable de l'ordre de 10 centimètres.
- La **vitesse du courant** est une variable importante également. Il existe des gammes de vitesses pour lesquelles l'impact de la crue sera différent. Toutefois, cette variable est beaucoup plus difficile à modéliser que la hauteur d'eau. La cartographie de cette variable n'est pas envisageable à grande échelle.
- La **durée de l'inondation** est une variable intéressante dans le cas des crues qui durent plusieurs jours. Les dégâts occasionnés au bâti et les coûts de séchage sont variables selon la durée de submersion. La prise en compte de la durée implique la prise en compte des volumes de crue en plus du débit de pointe. Dans le contexte des rivières de moyenne montagne, les crues durent moins de 24 heures. Cette variable n'est donc pas déterminante pour le diagnostic du risque d'inondation.

La méthodologie que nous développons est appliquée aux rivières de moyenne montagne, ainsi nous ne nous sommes intéressés qu'à la **hauteur maximale de submersion**.

Comparaison de modèles hydrauliques 1D et 2D

Nous avons vu (cf. § 2.1.2.3) qu'il existe des modèles hydrauliques monodimensionnels (1D) et bidimensionnels (2D). HORRITT et BATES (2002) ont testé, sur une même rivière, trois modèles hydrauliques différents utilisés en régime transitoire :

- Un modèle **1D filaire** avec le logiciel HEC-RAS du US Army Corps of Engineers
- Un modèle **pseudo-2D** raster avec le logiciel LISFLOOD-FP
- Un modèle **2D maillé** avec le logiciel TELEMAC-2D de EDF

La modélisation a porté sur un tronçon de la rivière Severn (UK) de 60 km de long. La topographie est décrite par 19 profils en travers et un modèle numérique de terrain (MNT). La

résolution du MNT est de 50 m et sa précision altimétrique est inférieure à 15 cm. Deux méthodes de calage et de validation ont été utilisées :

- Reproduction de l'**extension de la crue**, grâce à des images satellites délimitant l'extension de deux crues (octobre 1998 et novembre 2000).
- Reproduction des **hydrogrammes observés** pour les deux crues, notamment de la vitesse de déplacement de la pointe de crue.

Le paramètre de calage d'un modèle hydraulique est le coefficient de rugosité de Manning (*e.g.* : GRAF et ALTINAKAR, 2000). Celui-ci est en principe caractéristique de la rugosité du cours d'eau, mais on peut observer que selon le modèle utilisé, on trouve des valeurs sensiblement différentes. Par ailleurs, seuls les paramètres du modèle 1D HEC-RAS varient peu d'une méthode de calage à l'autre : les valeurs obtenues sont celles que l'on peut trouver dans les tables classiques d'hydraulique à surface libre. Les deux modèles 2D ont des jeux de paramètres différents selon la méthode de calage. De plus les valeurs de coefficient de Manning sont assez éloignées des valeurs tabulées classiques. Les trois modèles donnent de bons résultats après calage, mais le calage des modèles 2D est plus complexe que celui du modèle 1D. La mise en œuvre de modèles 2D nécessite un grand nombre de points de calage.

Les auteurs ont également testé les trois modèles en validation (*prediction*). On effectue le calage du modèle sur une crue donnée et selon une des deux méthodes de calage. On vérifie ensuite si le modèle est capable de simuler :

- La même crue mais du point de vue de l'extension si on a fait un calage sur les hydrogrammes et vice versa.
- Une crue différente du point de vue de l'extension et des hydrogrammes.

Les résultats donnent à nouveau le modèle 1D HEC-RAS supérieur aux deux modèles 2D quels que soient la méthode de calage et le type de validation. HEC-RAS apparaît nettement plus performant que LISFLOOD-FP (BATES et DE ROO, 2000). HEC-RAS est aussi sensiblement meilleur que TELEMAC-2D lorsqu'il s'agit de simuler une crue différente de la crue de calage du point de vue de l'extension.

Les modèles hydrauliques 1D sont les modèles les plus utilisés dans le monde et ce n'est pas un hasard. Ils sont effectivement faciles à caler et leur performance est satisfaisante tant que l'écoulement ne présente pas un caractère 2D marqué (grandes plaines d'inondation présentant des diffluences et des confluences multiples). On peut ajouter que les modèles 1D peuvent être utilisés maillés pour représenter des diffluences localisées. La plupart des logiciels permettent l'optimisation de la répartition des débits à la diffluence.

Dans le cas des rivières de moyenne montagne, le lit majeur est relativement étroit et la pente du fond de vallée est importante. Les écoulements sont manifestement monodimensionnels, ainsi **nous avons retenu un modèle 1D**.

2.3.1.2 Prise en compte des régimes transitoires

Le fonctionnement des rivières en crue est influencé par les apports des différents sous-bassins versants, mais aussi par les zones de rétention dans le lit majeur. Le régime d'écoulement des rivières est en général turbulent, fluvial et non permanent. La modélisation

hydraulique en régime transitoire est délicate : l'utilisateur doit choisir des pas d'espace et de temps adaptés aux conditions hydrauliques de l'écoulement.

Régime permanent et régime transitoire

Lorsque les caractéristiques d'écoulement (hauteur, vitesse...) d'un cours d'eau ne varient pas dans le temps, le régime d'écoulement est qualifié de permanent. Cela se traduit mathématiquement par la nullité de toutes les dérivées partielles des grandeurs par rapport au temps. Le régime est dit non-permanent ou transitoire lorsque les caractéristiques de l'écoulement varient dans le temps (*e.g.* : GRAF et ALTINAKAR, 2000). Ceci peut être lié à une perturbation instantanée ou plus étalée dans le temps (une ouverture de vanne, une régulation de barrage, une crue lente ou rapide, une rupture d'ouvrage hydraulique, un pompage...).

Dans la réalité, le régime permanent ne se rencontre quasiment jamais. Mais lorsqu'on s'intéresse, par exemple, à la modélisation d'une pointe de crue dont le débit est stabilisé pendant plusieurs heures, on peut faire l'hypothèse de permanence du régime.

Dans le cas des rivières de moyenne montagne, et plus encore dans le cas de la vallée de la Thur, nous avons vu que les crues sont très rapides. Le débit de pointe est maintenu pendant une courte durée et la variation de débit et de hauteur d'eau est brutale. On ne peut pas représenter correctement l'extension maximale de la crue à l'échelle du bassin versant si on ne tient pas compte des phénomènes transitoires. En effet, le laminage d'une crue en lit majeur est lié à des phénomènes de rétention transitoires qui ne peuvent pas être modélisés en régime permanent. De plus, en prospective, on veut intégrer des modifications du laminage des crues, par exemple par des endiguements. Pour en tenir compte, la modélisation hydraulique doit être réalisée en régime transitoire.

Écoulement fluvial, critique ou torrentiel

Pour tout écoulement hydraulique on peut calculer le nombre de Froude $F = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}}$.

V est la vitesse de l'écoulement et h la **hauteur d'eau** (synonyme de profondeur dans la suite du texte). Si $F < 1$, l'écoulement est fluvial. Si $F > 1$, l'écoulement est torrentiel. Pour $F = 1$, l'écoulement est dit critique.

Pour visualiser si un écoulement est fluvial ou torrentiel, il suffit de créer une perturbation en plongeant un bâton dans l'eau par exemple. Si l'onde provoquée par la perturbation remonte le courant, l'écoulement est fluvial. Si l'onde est propagée vers l'aval, l'écoulement est torrentiel. Un écoulement fluvial est influencé par la ligne d'eau aval, tandis qu'un écoulement torrentiel est influencé par la ligne d'eau amont. Les rivières présentent le plus souvent un écoulement fluvial, mais les torrents de montagne (pente supérieure à 1%) peuvent présenter des écoulements torrentiels. On observe également un passage en écoulement torrentiel sur les seuils (chutes artificielles), dont la pente du coursier peut varier de 10 à 50 %.

Lorsqu'un écoulement torrentiel rejoint un écoulement fluvial, il y a formation d'un ressaut hydraulique qui dissipe beaucoup d'énergie. C'est le remous que l'on peut observer au

ped des seuils. Les modèles hydrauliques en régime permanent peuvent le plus souvent effectuer les calculs en fluvial comme en torrentiel, même si le calcul du ressaut n'est pas toujours fait de façon optimale. Par contre, il est plus difficile de simuler un écoulement torrentiel en régime transitoire. Certains modèles utilisent une approximation du régime torrentiel, mais la performance de la modélisation n'est pas garantie. Le calcul de la ligne d'eau sur les seuils peut être réalisé à l'aide d'une loi empirique pour simplifier les calculs.

Dans le cas des rivières de moyenne montagne, la pente du cours d'eau peut être assez importante dans la partie amont (6 à 8 ‰). Ainsi, pour les crues les plus fortes, on est proche d'un écoulement torrentiel. Toutefois, on fait l'hypothèse que l'écoulement reste fluvial.

Pas d'espace et pas de temps de calcul

Dans les modèles hydrauliques 1D, la géométrie du cours d'eau est décrite par un ensemble de profils en travers dont l'espacement moyen constitue le pas d'espace de calcul. Pour chaque profil en travers, le modèle calcule les caractéristiques de l'écoulement (hauteur, vitesse, périmètre et section mouillés...). Pour contrôler la justesse des calculs, le modèle vérifie que la ligne d'énergie ($h + V^2/2.g$) ne varie pas trop brutalement d'un profil à l'autre. Lorsqu'une variation trop importante est détectée, le modèle demande un pas d'espace plus fin. Ainsi, pour les rivières de plaine dont la vitesse d'écoulement et la hauteur d'eau varient peu, on pourra se contenter d'un pas d'espace de 100 à 200 m. Par contre, à proximité des ouvrages, le pas d'espace doit être réduit car la ligne d'énergie peut varier fortement (USACE, 2001).

Dans le cas des rivières de moyenne montagne, la forte pente du cours d'eau et les variations rapides de section obligent à prendre un **pas d'espace de 10 à 20 m**. Le nombre de profils en travers nécessaires à la description de la géométrie du cours d'eau est très important. Ainsi, on crée parfois artificiellement des profils en travers supplémentaires par interpolation des profils levés sur le terrain.

Les simulations en régime transitoire posent aussi la question du **pas de temps de calcul**. En effet, si le débit varie fortement d'un calcul à l'autre, la ligne d'énergie varie également beaucoup. Le pas de temps de calcul dépend de la vitesse de l'onde de crue et du pas d'espace des profils en travers (USACE, 2001).

La condition théorique est la suivante : $\Delta t \leq \frac{\Delta x}{V_{onde}}$

Δt est le pas de temps, Δx le pas d'espace et V_{onde} la vitesse de l'onde de crue.

La vitesse de l'onde de crue peut être estimée à partir de la vitesse moyenne de l'écoulement : $\frac{V_{onde}}{V_{moy}} = 1,5$. Sur la vallée de la Thur, on peut estimer la vitesse moyenne de l'écoulement à 2 m/s, donc la vitesse de l'onde de crue vaut environ 3 m/s.

Le pas de temps théorique doit ainsi être inférieur à 7 secondes, ce qui est très court. Dans la pratique, pour des rivières de taille moyenne, on peut obtenir de bons résultats avec un pas de temps plus grand égal à $t_{montée}/20$. Le temps de montée de la crue est de l'ordre de 5 à 10 heures selon les crues. On obtient un pas de temps de calcul de 15 à 30 minutes qui semble élevé par rapport au pas de temps théorique.

Comme on peut le voir ci-dessus, il n'y a pas de pas de temps de calcul bien défini. La méthode la plus simple consiste à choisir un pas de temps de calcul assez fin (10 secondes par exemple), puis à l'allonger jusqu'à obtenir un pas de temps de calcul plus grand, tout en conservant une bonne performance de simulation. Le but est de minimiser la durée des calculs qui est inversement proportionnelle au pas de temps de calcul.

2.3.1.3 Recherche d'un logiciel simple et efficace

Parmi les dizaines de logiciels de modélisation hydraulique 1D qui existent de par le monde, nous en avons testé 3 :

- Talweg-Fluvia du Cemagref donne de bons résultats en régime permanent mais il ne permet pas les calculs en régime transitoire. Par ailleurs, son interface est désuète, elle a été améliorée depuis (logiciel SIC).
- MIKE11 est un logiciel danois à la réputation mondiale. Il permet des simulations en régime transitoire ainsi que le couplage avec un SIG. C'est un excellent logiciel commercial à l'ergonomie aboutie.
- HEC-RAS a été développé par le US Army Corps of Engineers. Ce logiciel permet des simulations en régime transitoire et le couplage avec le logiciel de SIG Arcview de ESRI. L'interface du logiciel est moderne et l'ergonomie irréprochable. Ce logiciel est dans le domaine public, il est donc gratuit.

Nous avons choisi le logiciel HEC-RAS car il est performant, convivial et gratuit.

Présentation de HEC-RAS

Le logiciel est organisé de façon très claire ce qui simplifie beaucoup la modélisation. L'utilisateur travaille par projets. Chaque projet peut contenir plusieurs fichiers de géométrie et plusieurs fichiers d'hydrologie correspondant aux différents événements de référence. Chaque simulation est un *plan* qui associe un fichier de géométrie et un fichier d'hydrologie. Un projet peut contenir jusqu'à 99 *plans* différents.

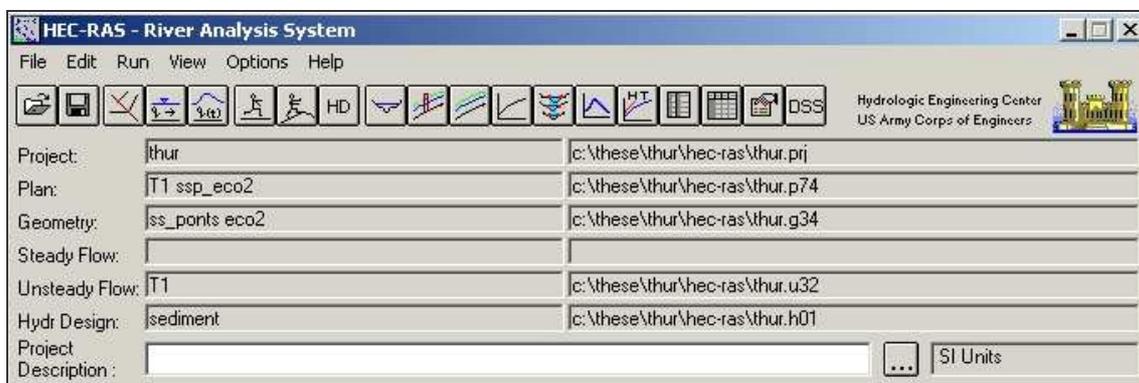


Figure 72 : fenêtre principale de HEC-RAS

Dans l'exemple ci-dessus (figure 72), l'utilisateur travaille dans le projet « thur » avec la géométrie « ss_ponts eco2 » et le fichier d'hydrologie en régime transitoire (*Unsteady Flow*) « T1 ». La simulation réalisée (*plan*) s'appelle « T1 ssp_eco2 ». A droite on trouve le chemin d'accès de chaque fichier du projet.

Les résultats peuvent être visualisés d'un grand nombre de manières différentes : profils en travers, profil en long, vue en 3D, tableaux, courbes de variation spatiale et temporelle des caractéristiques de l'écoulement. Pour les simulations en régime transitoire, on peut animer les différents graphiques pour visualiser l'évolution des paramètres au fil du temps. On peut même enregistrer des vidéos de ces animations pour illustrer un exposé.

HEC-RAS est accompagné d'une documentation abondante relative à l'utilisation du logiciel (*Users Manual : USACE, 2001a*) et aux méthodes de modélisation (*Hydraulic Reference et Application Guide : USACE, 2001b*). De nombreux exemples de modélisations sont fournis avec le logiciel pour illustrer des situations de modélisation très variées. Sur Internet, il existe des forums d'utilisateurs qui échangent leur expérience du logiciel.

D'un point de vue technique, les simulations en régime transitoire se font par la résolution des équations 1D de Saint-Venant en régime transitoire :

$$(1) \quad \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial \phi Q}{\partial x_{\min}} + \frac{\partial (1-\phi)Q}{\partial x_{\max}} = 0$$

$$(2) \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_{\min}} \left(\frac{\phi^2 Q^2}{S_{\min}} \right) + \frac{\partial}{\partial x_{\max}} \left(\frac{(1-\phi)^2 Q^2}{S_{\max}} \right) + g S_{\min} \left(\frac{\partial z}{\partial x_{\min}} + j_{\min} \right) + g S_{\max} \left(\frac{\partial z}{\partial x_{\max}} + j_{\max} \right) = 0$$

$$(3) \quad \phi = \frac{K_{\min}}{K_{\min} + K_{\max}} \quad \text{avec} \quad K = \frac{S^{5/3}}{nP^{2/3}}$$

$$(4) \quad j_{\min} = \frac{\phi^2 Q^2 n_{\min}^2}{R_{\min}^{4/3} S_{\min}^2} \quad \text{et} \quad j_{\max} = \frac{(1-\phi)^2 Q^2 n_{\max}^2}{R_{\max}^{4/3} S_{\max}^2}$$

Les variables utilisées sont les suivantes :

Q, Q_{\min}, Q_{\max} : débit total, lit mineur, lit majeur

S, S_{\min}, S_{\max} : section mouillée totale, lit mineur, lit majeur

x_{\min}, x_{\max} : distances lit mineur, lit majeur (pour tenir compte de la sinuosité)

P : périmètre mouillé et R : rayon hydraulique (S/P)

n : rugosité de Manning

j : perte de charge linéaire

ϕ : répartition des débits entre lit mineur et lit majeur

K_{\min}, K_{\max} : débitance du lit mineur, lit majeur

Les équations sont discrétisées par la méthode des différences finies et la résolution se fait par une méthode implicite.

Limites du logiciel

La première limite du logiciel, pour un utilisateur francophone, c'est qu'il n'existe pas de version française du logiciel. Il faut cependant peu de temps pour maîtriser le vocabulaire technique nécessaire. Il est par contre plus difficile de se plonger dans la documentation technique, même si elle est très bien illustrée. On pourra utilement mettre à profit le glossaire international d'hydrologie disponible en ligne (www.cig.ensmp.fr/~hubert/glu/aglo.htm).

Une limite importante de HEC-RAS est la non prise en compte des échanges de masse et des échanges turbulents entre le lit mineur et le lit majeur. Ces phénomènes sont responsables d'une perte de charge très importante. Elle est implicitement intégrée dans les coefficients de Manning pendant le calage. Il y a deux erreurs possibles :

- Soit on réalise le calage sur un écoulement débordant, auquel cas on obtient des coefficients de Manning surestimés (rugosité plus importante qu'elle ne l'est en réalité). Dans ce cas on surestime les hauteurs d'eau des écoulements non-débordants.
- Soit on réalise le calage sur des écoulements non-débordants et ainsi on obtient des coefficients de Manning réalistes. Dans ce cas on sous-estime les hauteurs d'eau des écoulements débordants.

Nous avons choisi la deuxième solution (repères de crue situés dans des zones où la rivière ne déborde pas), la rugosité en lit majeur étant choisie dans les tables. Pour améliorer la modélisation des débordements, nous avons utilisé les coefficients de contraction et d'expansion proposés par HEC-RAS. Ils permettent de tenir compte grossièrement des pertes de charges singulières pendant l'inondation et la vidange du lit majeur.

Couplage avec le SIG Arcview d'ESRI

Les ingénieurs du Hydrological Engineering Center ont travaillé avec ESRI pour mettre au point une extension de Arcview 3.x. Elle permet l'échange de données entre un modèle numérique de terrain (MNT) à haute résolution et HEC-RAS (USACE, 2000). Cette extension est gratuite, par contre elle nécessite l'achat de Arcview 3.x et des extensions Spatial Analyst et 3D Analyst.

Le couplage des deux logiciels facilite beaucoup le travail de modélisation. Il suffit de tracer les profils en travers à l'écran et le SIG extrait l'information topographique du MNT sous la forme d'un fichier que l'on importe dans HEC-RAS. L'utilisateur peut alors ajouter des ouvrages hydrauliques et réaliser des simulations en régime permanent ou en régime transitoire. Ces simulations peuvent être exportées vers le SIG pour tracer la vue en plan de l'inondation, les hauteurs d'eau atteintes...

Le couplage d'un modèle hydraulique monodimensionnel et d'un SIG permet de disposer d'un outil précis et performant pour cartographier l'aléa à grande échelle. La modélisation hydraulique nécessite une information topographique abondante et de grande qualité.

2.3.2 Acquisition des données topographiques

Pour mener des études hydrauliques à grande échelle, il est utile de définir les besoins en données et de considérer les nouvelles techniques de levés existantes. L'exploitation informatique des données permet de valoriser la richesse de l'information topographique tout en limitant les manipulations. Cette étape est cruciale pour garantir la qualité de la cartographie de l'aléa. Après avoir précisé les besoins en données topographiques (cf. § 2.3.2.1), nous présentons les différentes techniques de lever et le choix que nous avons fait (cf. § 2.3.2.2). Nous définissons ensuite des règles simples pour optimiser l'exploitation des données topographiques en vue de la simulation hydraulique (cf. § 2.3.2.3).

2.3.2.1 Besoins en données topographiques

On peut décliner les besoins en données topographiques sous trois axes : l'extension géographique, la résolution et la précision. Ces trois critères conditionnent le choix de la technique de lever.

Extension géographique des levés

La simulation hydraulique des crues des rivières s'appuie sur la connaissance de la géométrie du cours d'eau. Une rivière naturelle présente une structure en lits imbriqués, chaque lit correspondant à un régime d'écoulement particulier. Pendant les périodes de basses eaux, la rivière s'écoule dans le lit mineur (*main channel*). Pendant les crues, elle déborde dans son lit majeur (*floodplain*). Les crues d'occurrence exceptionnelle, comme la crue de période de retour 500 ans, ont profondément marqué le paysage. On peut identifier des terrasses qui délimitent l'extensions des crues de très forte ampleur (figure 73).

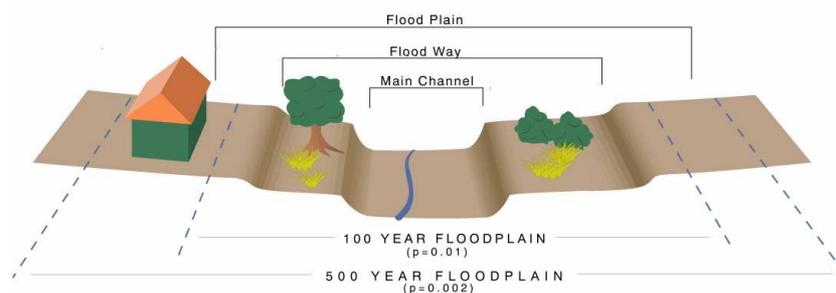


Figure 73 : schéma du lit mineur et du lit majeur naturels (source WRRC)

Aujourd'hui, la plupart des rivières ont une géométrie complètement différente de celle qui a été façonnée par les crues du passé. Le lit mineur a souvent été rectifié, endigué ou recalibré (figure 74).

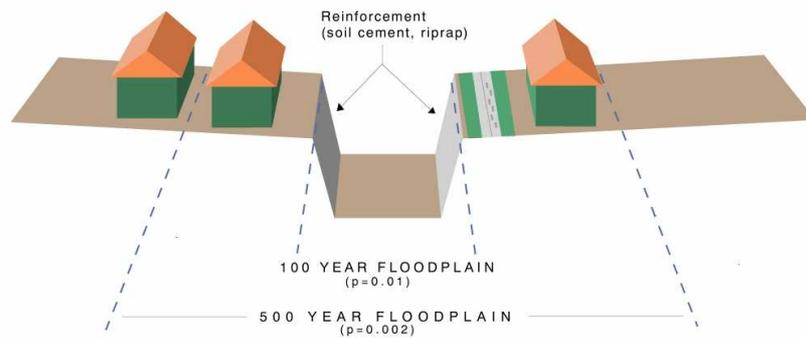


Figure 74 : schéma d'un recalibrage du lit mineur (source WRRC)

Le lit majeur a été urbanisé et les infrastructures de transport se sont implantées dans les champs d'expansion des crues (figure 75).

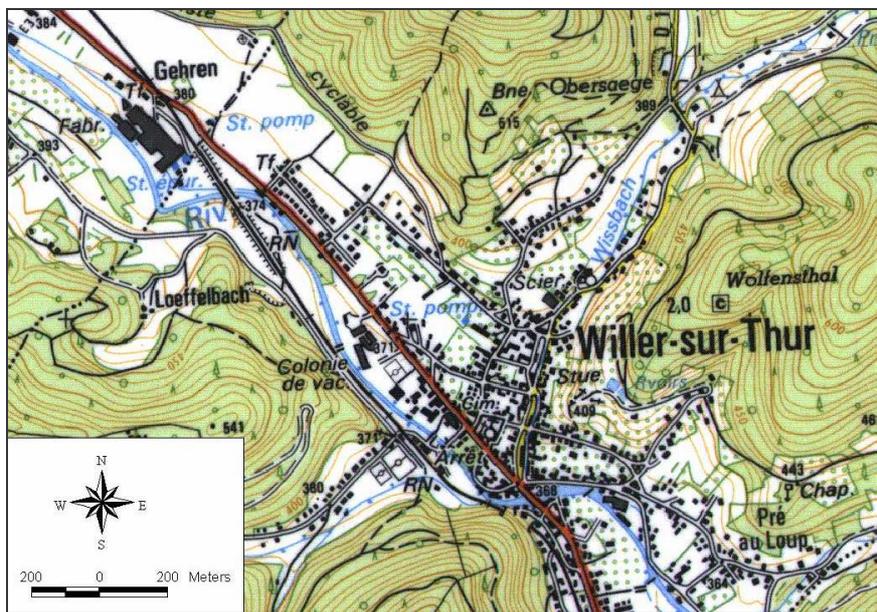


Figure 75 : exemple d'infrastructures en lit majeur à Willer/Thur (SCAN25 IGN)

Les limites physiques d'écoulement que constituaient les hautes terrasses ont été remplacées par les digues et les talus routiers ou ferroviaires. Cependant, il peut survenir une crue exceptionnelle capable de submerger les ouvrages présents en lit majeur. Dès lors, il est important de prendre en compte les zones qui semblent protégées, mais qui pourraient être touchées par une crue exceptionnelle. La rareté de ces crues ne doit pas faire oublier leur intensité et les conséquences catastrophiques qu'elles entraîneraient. En effet, elles toucheraient des zones vulnérables, car les habitants se sentent à l'abri des inondations. En conséquence, nous considérons que les levés topographiques doivent couvrir l'étendue naturelle des inondations. Une bonne connaissance de la géomorphologie de la rivière est un préalable à toute rédaction du cahier des charges des levés topographiques. Dans le cas de la Thur, ce travail a été simplifié par l'origine glaciaire de la vallée. En effet on observe une forme caractéristique de vallée en V à fond plat (figure 76).

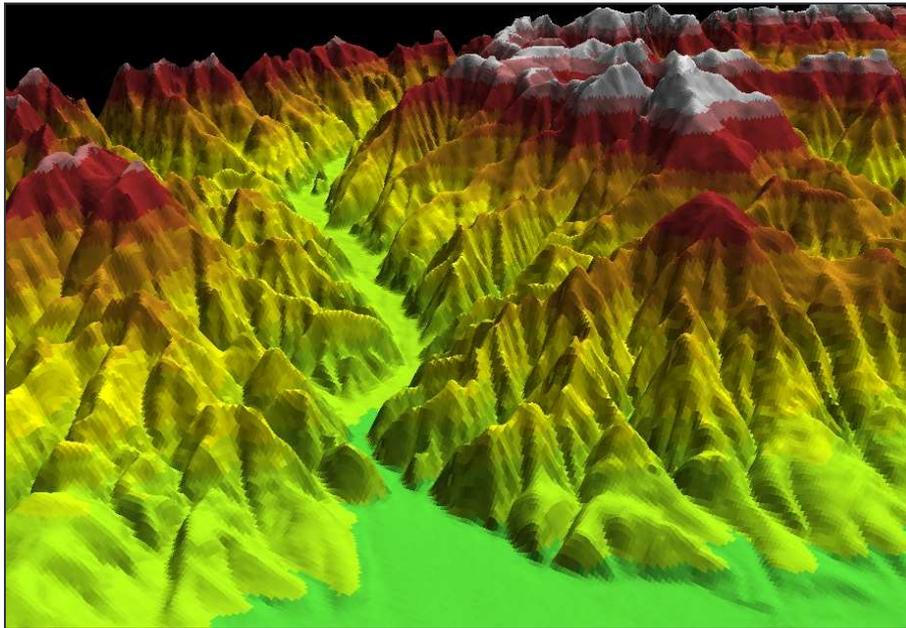


Figure 76 : vue en 3D de la vallée de la Thur (MNT IGN 50m)

L'extension naturelle des fortes crues n'a pas d'autres limites que les versants abrupts des montagnes (figure 77).

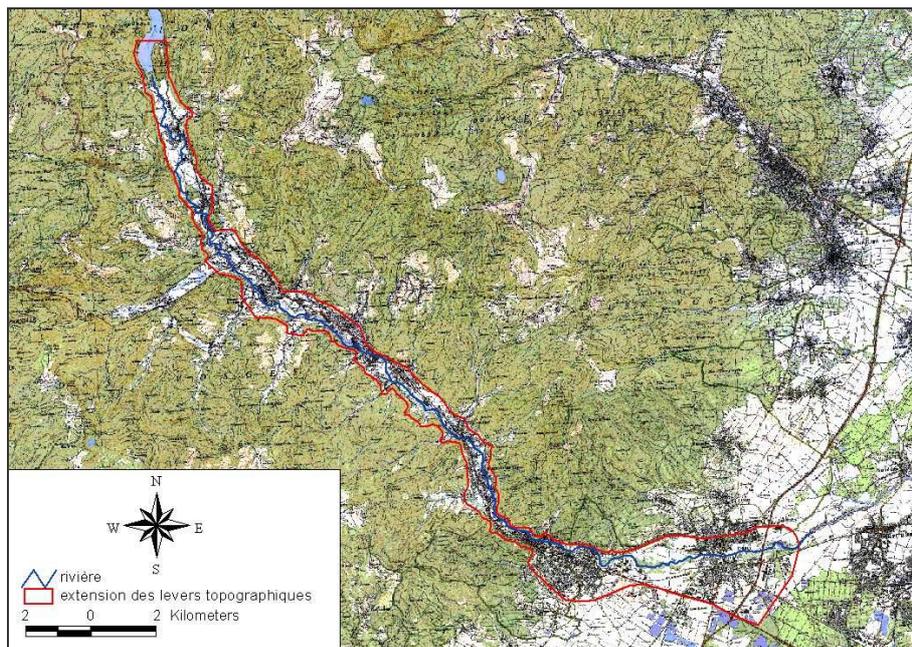


Figure 77 : carte de l'extension des levés topographiques (SCAN25 IGN)

La vallée étant très étroite, l'extension de l'étude topographique rapportée au linéaire de rivière n'est pas très importante, ce qui limite les coûts. Pour la partie aval, au débouché dans la plaine, il a été plus difficile de déterminer la limite naturelle. L'observation fine des courbes de niveau et du paysage permet cependant de définir une extension raisonnable. Au final, nous avons retenu une extension de 30 km² pour un linéaire de rivière de 32 km.

Résolution des données topographiques

Nous utilisons le terme « résolution » pour qualifier le pas d'espace de mesure nécessaire à une bonne description de la géométrie de la rivière. Il faut distinguer deux types de levés : les semis de points et les profils en travers (figure 78).

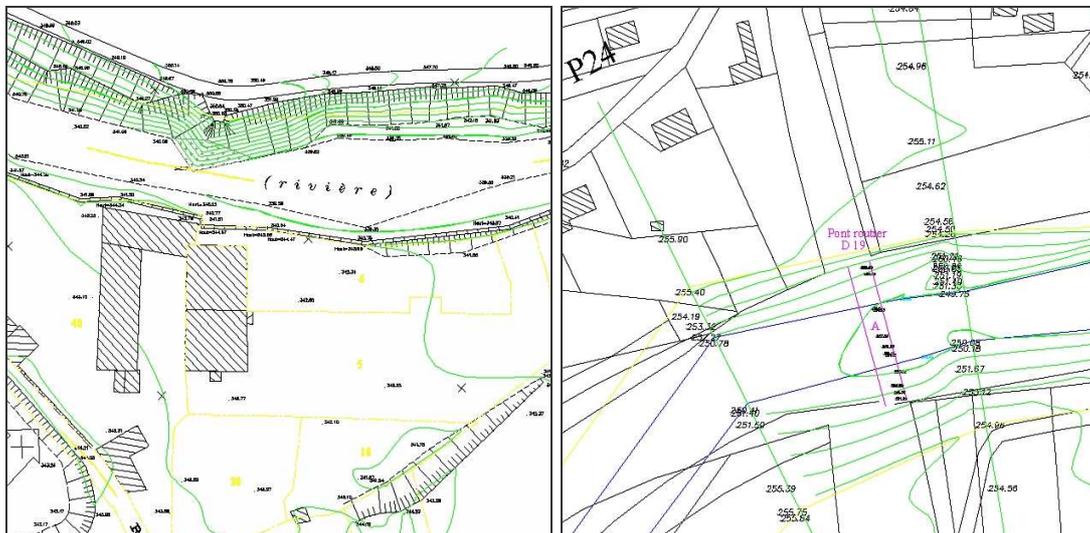


Figure 78 : deux types de levés topographiques : semis de points et profils en travers

Les profils en travers sont souvent préférés aux semis de points pour leur facilité d'exploitation hydraulique (FARISSIER, 1993). En effet, lorsqu'on utilise un modèle hydraulique monodimensionnel, la géométrie de la rivière est décrite par un ensemble de profils en travers de la vallée. Le choix des profils à lever n'est pas aléatoire. Ils doivent être placés judicieusement pour décrire le profil en long de la rivière ainsi que les zones de contraction et d'expansion de l'écoulement. Les géomètres ne sont pas des hydrauliciens. Ainsi, pour être certain de ne pas manquer des détails importants de la topographie, on impose en général un pas d'espace de 100 à 200 m. On demande également un lever tous les ouvrages (seuils, ponts, vannages). Sur un profil en travers, le pas d'espace de mesure peut être variable. On doit trouver les points caractéristiques tels que les haut talus et bas talus, les berges...

Les semis de points sont souvent réalisés lorsque les études hydrauliques doivent déboucher sur la réalisation d'ouvrages (seuils, digues, murs). En effet, l'ingénieur peut choisir lui-même ses profils en travers en fonction des points disponibles. On dispose de données utiles pour calculer les cubatures et implanter les ouvrages. On ne peut pas définir *a priori* de résolution moyenne nécessaire pour ce type de levés, mais on désire avoir une bonne description des lignes de rupture de pente : digues, talus, berges... Le choix des points n'étant pas aléatoire, on peut obtenir une description fine de la topographie avec peu de points. Les dimensions du lit majeur et du lit mineur sont très différentes, ainsi la résolution sera d'autant plus fine que l'on est proche du lit mineur.

Précision des données topographiques

Si on peut admettre une résolution de mesure moins fine dans le lit majeur que dans le lit mineur, il n'en va pas de même pour la précision des mesures. En effet, les hauteurs d'eau en lit majeur sont souvent assez faibles, car on se trouve dans des zones plates. On ne peut accepter une incertitude trop importante sur l'altimétrie, car cela se répercute sur la détermination de l'extension de la zone inondée. La plupart des modèles numériques de terrain de basse résolution (25 m par exemple pour la BD TOPO de l'IGN) ont une précision altimétrique de l'ordre de 1 m. On ne peut pas espérer une bonne cartographie de l'extension des crues avec ce type de données.

On peut simuler l'influence de la précision des données topographiques sur les simulations hydrauliques en utilisant des simulations de Monte Carlo. Les résultats obtenus montrent qu'une précision de 10 cm est très acceptable pour obtenir une bonne modélisation hydraulique (FRHYMAP, 2002). On peut ajouter qu'il est inutile de vouloir une meilleure précision, car sur le terrain, le choix du point de mesure introduit une incertitude du même ordre.

Pour les études hydrauliques à grande échelle, on a besoin d'une information topographique très étendue, de résolution fine et de bonne précision. Les méthodes de lever topographique ont beaucoup évolué ces dernières années. Il est important de choisir celle qui répond le mieux aux besoins, à un coût acceptable.

2.3.2.2 Choix d'une technique de lever adaptée

Ces dernières années, de nouvelles méthodes de levés topographiques ont vu le jour. Elles peuvent apporter une aide précieuse pour les études hydrauliques à grande échelle. Les levés traditionnels par géomètres peuvent être complétés par la photogrammétrie. Les levés lasers aéroportés constituent une technique prometteuse pour l'acquisition de données topographiques à destination de modèles hydrauliques.

Les levés traditionnels par géomètre

Les géomètres utilisent des outils de mesure très performants. Ils sont capables de réaliser des levés de très grande précision, tant en altimétrie qu'en planimétrie (CETMEF, 2001). Avec la généralisation du GPS, ils ont gagné en productivité sans perdre en précision. Cependant, les mesures sont toujours réalisées par un opérateur qui doit se déplacer sur le terrain, ce qui rend l'opération longue et onéreuse. Par ailleurs, l'accès au lit mineur et aux propriétés privées est souvent fastidieux. La solution la plus rationnelle pour les études à grande échelle est le lever de profils en travers.

La photogrammétrie

La photogrammétrie est une technique d'analyse de photographies qui permet de reconstituer les reliefs à partir de deux photos formant un couple stéréoscopique (CETMEF, 2001). La différence d'angle de prise de vue permet en effet de déterminer par calcul les différences d'altitude entre les points (figure 79).

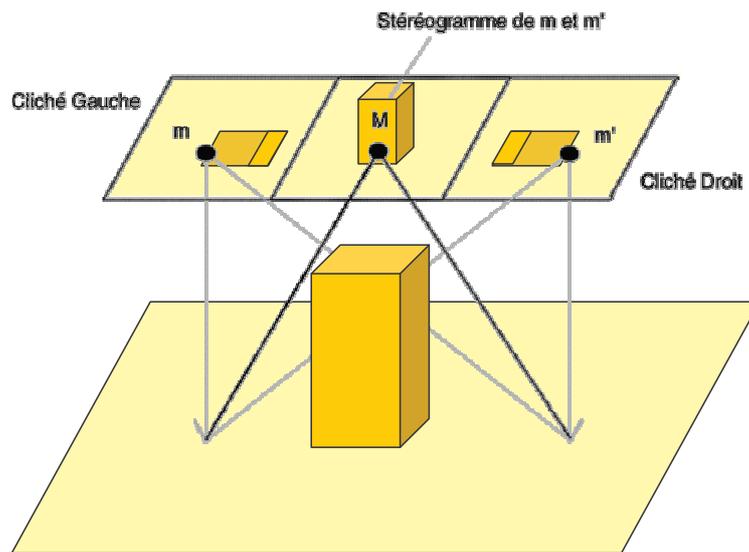


Figure 79 : principe de la stéréoscopie

La précision de cette technique dépend de l'altitude de la prise de vue. Il est tout à fait possible d'obtenir une précision de l'ordre de 10 à 15 cm à partir de photos aériennes prises à basse altitude. Cependant, avec cette méthode on détermine l'altitude de la surface photographiée. En présence d'arbres, on ne peut pas déterminer l'altitude du sol : c'est le problème du sur-sol. Or, le long des rivières on trouve le plus souvent des arbres, ce qui empêche une bonne description de la forme du lit mineur. Cette technique doit être complétée par des levés terrestres pour répondre de façon adéquate aux besoins de la modélisation hydraulique.

L'observation satellite

Les satellites civils actuels ne sont pas en mesure de fournir des images de résolution et de précision suffisamment fine pour répondre aux besoins de la modélisation hydraulique. Mais il ne fait aucun doute que dans les années à venir nous verrons apparaître des systèmes de plus en plus performants.

Les levés laser aéroportés

La méthode consiste à embarquer un appareil de mesure laser sur un avion (CETMEF, 2001 ; ACKERMANN, 1999 ; WEHR et LOHR, 1999). Le laser balaye la surface du sol avec une résolution très fine (figure 80). Il peut ainsi relever jusqu'à 5 points par m².

En déterminant de façon précise la trajectoire de l'avion grâce à un GPS différentiel (GPS embarqué et balises fixes), on peut déterminer l'altitude des points mesurés au sol. On utilise des points de calage précis, comme des carrefours routiers ou des immeubles pour ajuster les mesures. La précision moyenne des mesures est de 15 cm en altimétrie et 50 cm en planimétrie.

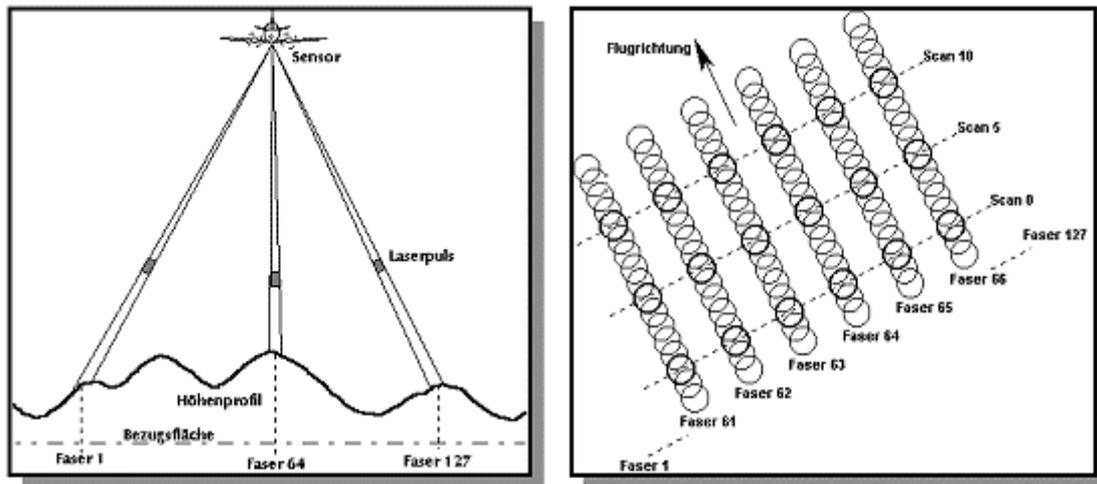


Figure 80 : principe de la mesure laser aéroportée (TOPOSYS)

Le principal intérêt de cette technique est la possibilité d'éliminer le sur-sol de façon semi-automatique (KRAUS et PFEIFER, 1998 ; HORRITT et al., 2003). En effet, le nombre de mesures au mètre carré est tel qu'en général au moins un rayon traverse le feuillage et retourne à l'avion. Ce point est toujours le point de mesure le plus bas et correspond à l'onde qui revient le plus tardivement (*last pulse*). On peut donc déterminer la surface du sol en observant les points les plus bas (figure 81).

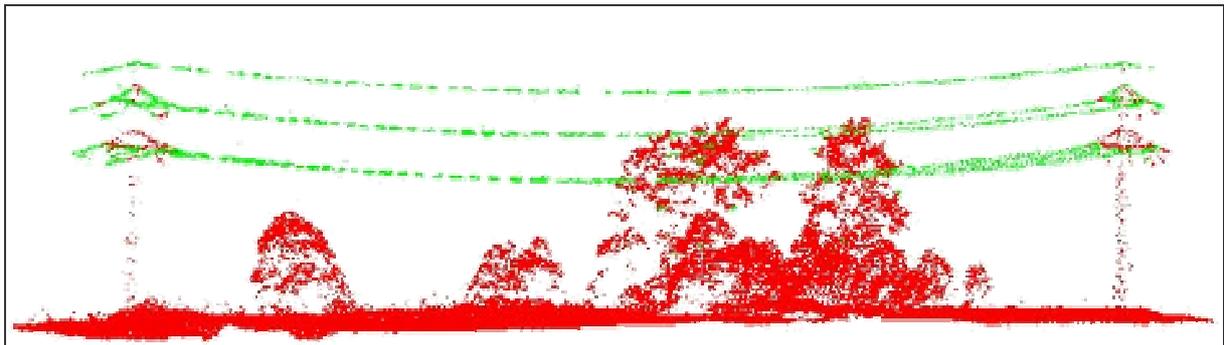


Figure 81 : mesures laser sous une ligne haute tension et sous la végétation (TOPOSYS)

Les mesures sont fournies sous la forme d'un semis de point régulier avec une résolution de 1m. Cette technique permet de lever rapidement et avec précision de grandes surfaces. Cependant, les rayons laser ne traversent pas l'eau, il faut donc effectuer la campagne de mesure en période de basses eaux pour que la mesure du lit mineur soit meilleure. Si la profondeur dépasse 1 m, il faut réaliser un lever bathymétrique complémentaire.

Pour limiter le recours aux filtrages semi-automatiques, il vaut mieux faire les levés en hiver lorsqu'il y a moins de feuilles sur les arbres.. Les mesures peuvent se faire de jour comme de nuit, mais le laser ne tolère pas la présence de neige au sol. La planification du vol est assez difficile à réaliser, car il faut une fenêtre de vol optimale à la fois d'un point de vue hydrologique et aéronautique, c'est une des limites de ce type de levés.

D'un point de vue économique, le coût au km² est très variable, car les frais fixes liés à la logistique et au déplacement du matériel sont élevés. Il est important de regrouper au

maximum les leviers pour bénéficier d'un tarif compétitif. A partir de 50 km², le coût est comparable à celui de la photogrammétrie incluant les leviers terrestres complémentaires.

Comparaison des techniques de lever

Un tableau comparatif permet de résumer les atouts et les limites de chaque méthode (tableau 10). En l'état actuel du développement de la métrologie, les leviers lasers aéroportés répondent bien aux besoins des études hydrauliques à grande échelle. C'est leur capacité à relever la topographie sous la végétation qui les avantage par rapport à la photogrammétrie (BALTSAVIAS, 1999).

	Précision des mesures	Rapidité des mesures	Gestion du sur-sol	Coût
Lever traditionnels	++	-	++	-
Photogrammétrie	+	+	--	+
Observation satellite	--	++	--	++
Leviers laser aéroportés	+	+	+	+

Tableau 10 : comparaison des techniques de leviers pour la modélisation hydraulique

Nous avons testé les leviers laser aéroportés pour acquérir la topographie de la vallée de la Thur. L'entreprise retenue par le Conseil Général du Haut-Rhin a été Toposys. Les leviers ont été réalisés pendant l'hiver 2002-2003. Les conditions étaient optimales car les vols se sont déroulés en période de basses eaux alors que les feuilles étaient tombées. Par ailleurs, les massifs de Renouée du Japon qui envahissent les berges de la Thur étaient secs et couchés par les crues précédentes, ce qui a limité leur incidence sur les mesures.

Les mesures fournies en avril 2003 couvrent 55 km² avec une résolution de 1 m. La précision altimétrique a été calculée sur les points de calage à 15 cm. En planimétrie la précision est seulement de 50 cm, mais cela n'a pas d'impact majeur sur les calculs hydrauliques. Les données sont géoréférencées en Lambert 2, ce qui permet la compatibilité avec les cartes IGN et les documents officiels. L'exploitation de cette masse de données colossale doit être à la hauteur de la richesse de l'information disponible. Nous détaillons la méthode mise au point sur la Thur.

2.3.2.3 Exploitation des données topographiques

Lorsqu'on dispose de semis de points, il est facile de construire des modèles numériques de terrain (MNT). Avec l'amélioration constante des processeurs et des capacités de stockage des ordinateurs, les modèles numériques de terrain se sont développés de façon prodigieuse. Une fois passé l'émerveillement devant la reconstitution réaliste des reliefs qu'ils permettent, il est important de les utiliser avec rigueur en gardant à l'esprit la finalité de leur utilisation.

Modèles Numériques de Terrain (MNT)

Un MNT est une représentation numérique de l'altitude du terrain naturel en tout point. Il faut donc distinguer les modèles numériques d'altitude des MNT. En effet, dès lors que l'on intègre des constructions au modèle numérique, on ne peut plus rigoureusement qualifier le modèle de MNT. Pour passer d'un modèle numérique d'altitude à un MNT, on peut utiliser des traitements semi-automatiques qui identifient les objets à éliminer, les effacent, puis interpolent entre les points environnants pour estimer l'altitude du sol sous-jacent (figure 82). Cette opération a été réalisée par le fournisseur du MNT (Toposys).

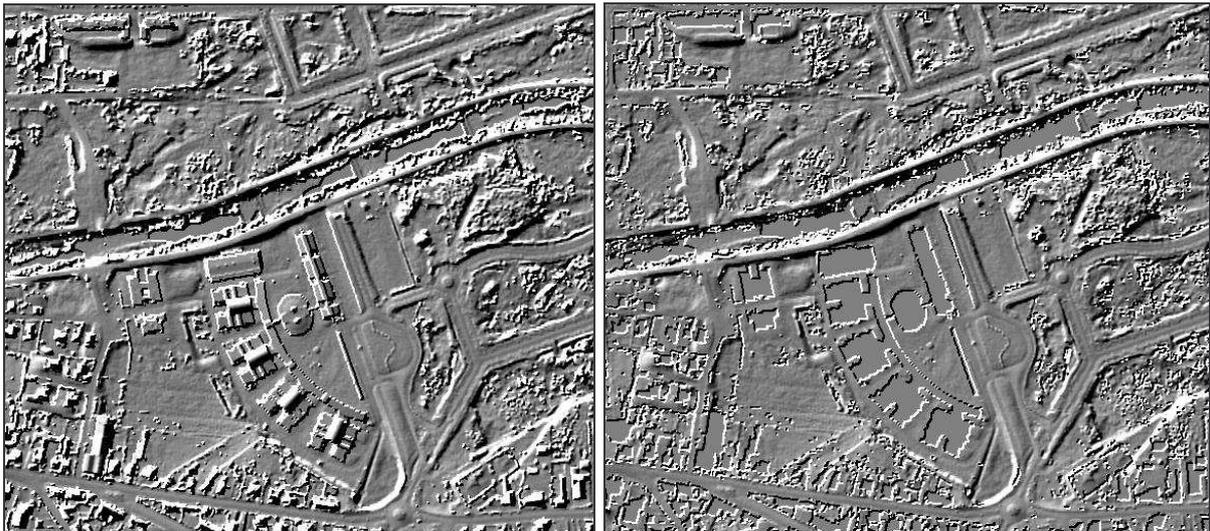


Figure 82 : MNT avant et après suppression du sur-sol (TOPOSYS)

Cependant, d'un point de vue hydraulique, il est intéressant de connaître l'emplacement des obstacles à l'écoulement que sont les maisons ou les ponts. Ainsi, nous avons demandé à TOPOSYS un MNT conservant les habitations et les ponts, mais sans végétation. L'entreprise fournit les données brutes et les données filtrées dans deux fichiers séparés, ce qui permet éventuellement de vérifier les corrections effectuées. Par la suite, nous utiliserons toujours l'acronyme MNT pour désigner le modèle numérique d'altitude issu de ces données filtrées.

Le MNT fourni par TOPOSYS est un MNT raster. Il s'agit d'une grille régulière, de résolution fixe, comparable à une image. Chaque pixel est associé à une donnée et la taille du pixel définit la résolution du raster. Sur toute la surface du pixel la valeur de l'altitude est constante. Lorsqu'on dispose de données topographiques sous la forme d'un semis de point régulier, on peut créer un MNT raster de même résolution. On associe à chaque point de mesure un pixel centré sur le point de mesure et de largeur identique à la résolution du lever (figure 83).

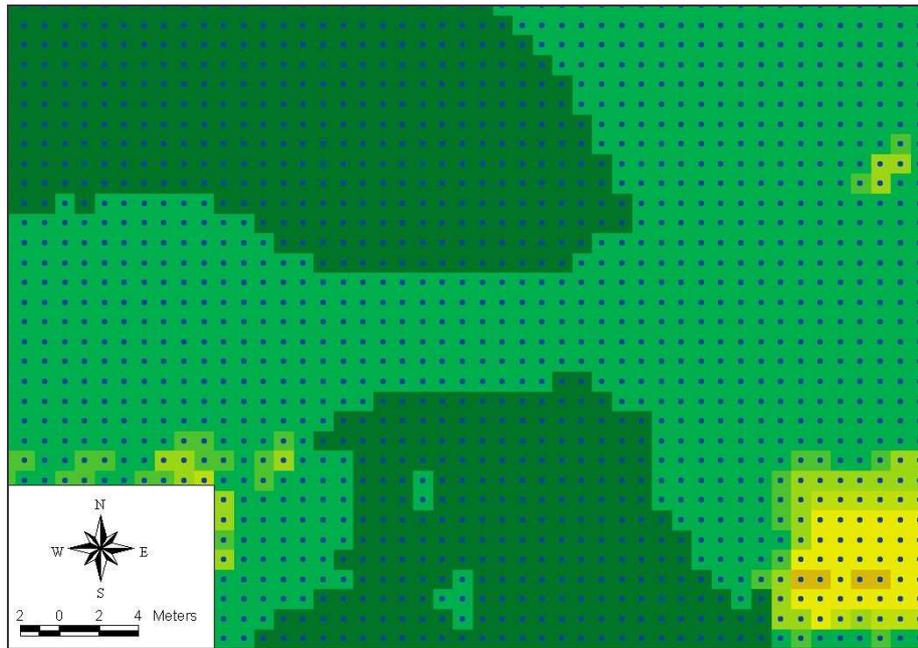


Figure 83 : MNT généré à partir des points de levé topographique : 1 pixel = 1 point

Les MNT raster de faible résolution (25 m ou 50 m) ne sont pas adaptés aux études hydrauliques (CHAMBON, 1997), car la rivière mesure en général moins de 20 m de large. Les pixels sont trop grands pour décrire la topographie du lit mineur. Le choix de la résolution du raster doit tenir compte de la taille des objets dont on veut décrire le relief.

Il existe un deuxième type de MNT appelé TIN (Triangulated Irregular Network). La surface est cette fois définie par des triangles irréguliers construits selon une triangulation de Delaunay (figure 84). Chaque triangle permet de calculer en tout point de sa surface une valeur d'altitude dépendant des trois points de mesure à ses sommets.

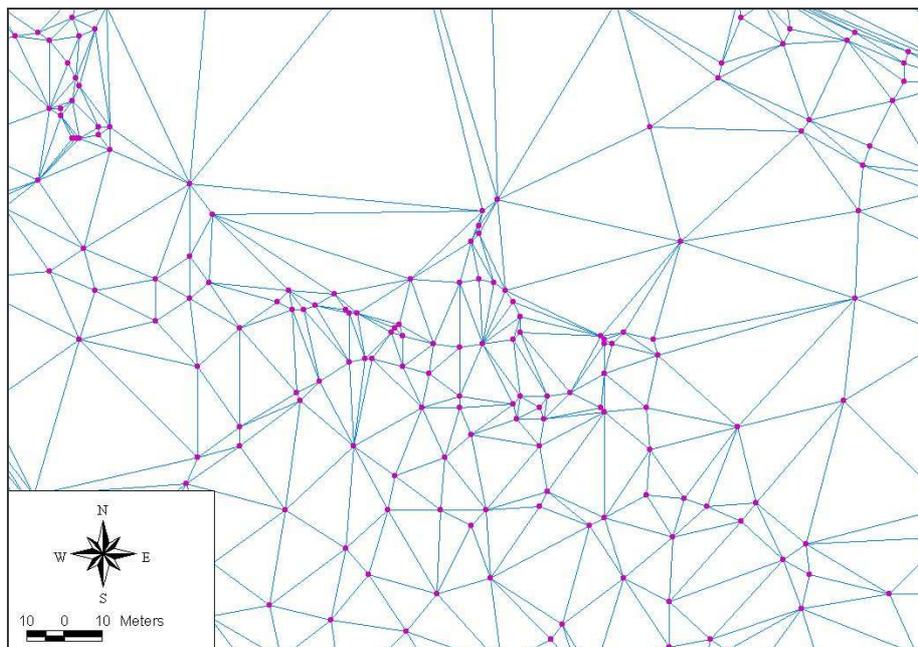


Figure 84 : exemple de structure TIN à partir d'un semis de points de géomètre

On peut facilement obtenir un MNT raster à partir d'un TIN en appliquant une grille de résolution choisie sur le TIN et en calculant la valeur d'altitude au centre de chaque pixel.

Les TIN sont particulièrement adaptés aux semis de points irréguliers. Ils permettent de décrire les zones planes, comme certains lit majeurs, avec peu de points. Les utilitaires de SIG permettant l'extraction de profils en travers à destination des modèles hydrauliques utilisent en général des TIN.

Sur la Thur, nous disposons des données topographiques sous la forme d'un MNT raster (GRID Arcview) de résolution égale à 1 m. Le MNT permet la visualisation des reliefs grâce aux dégradés de couleur et aux ombrages (figure 85).

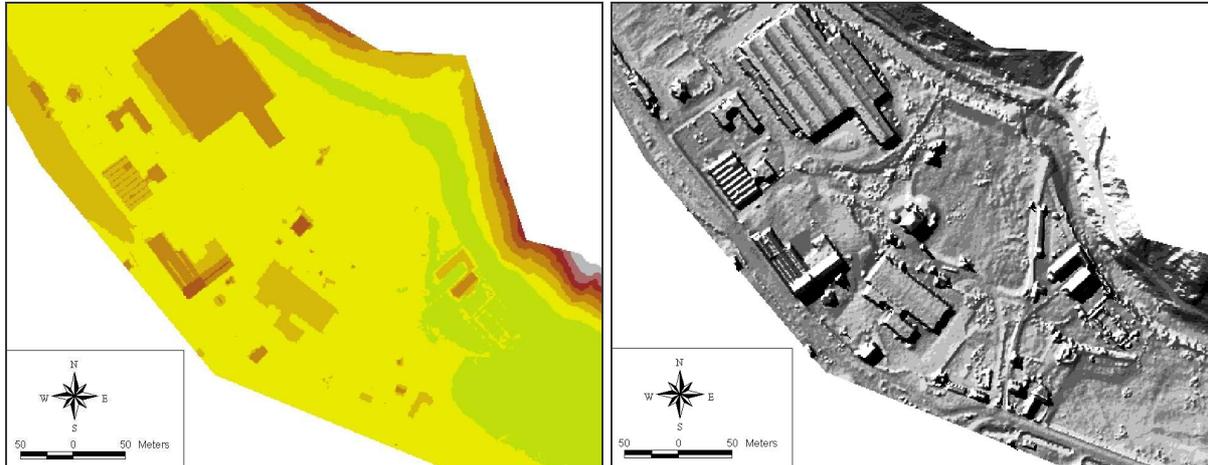


Figure 85 : visualisation de MNT raster en dégradé de couleurs et en ombrage

Ces représentations graphiques réalistes permettent de constater la richesse des détails révélés par les levés laser. La haute résolution associée à une précision altimétrique de 15 cm offre une description topographique de grande qualité pour développer le modèle hydraulique.

Résolution finale du MNT

Les modèles hydrauliques monodimensionnels (1D) calculent les hauteurs d'eau à partir d'un ensemble de profils en travers. A chaque point du profil en travers, on attribue une abscisse et une valeur d'altitude. Les altitudes peuvent être extraites du MNT à partir d'utilitaires de SIG. On dessine le profil à l'écran, puis l'utilitaire calcule les abscisses des points et l'altitude associée. La plupart des utilitaires de SIG couplés aux modèles hydrauliques utilisent les MNT TIN pour extraire les profils en travers. Les points sont relevés à chaque intersection entre une arrête de triangle et le profil. Lorsqu'on dispose d'un MNT raster, il est nécessaire de le transformer en TIN.

L'outil automatique intégré à Arcview (*Convert Grid to Tin*) échoue en cours de traitement, car la masse de données à traiter est beaucoup trop importante (taille du fichier raster : 1,8 Go). La méthode de transformation la plus simple consiste à convertir les pixels du MNT raster en points de coordonnées X, Y et Z. Les points sont ensuite utilisés pour construire un MNT TIN. Cependant, lorsqu'on utilise cette méthode sur l'ensemble des points de mesure, on obtient un fichier TIN de taille considérable qui dépasse la capacité maximale des applications Windows (2 Go). Une erreur fatale se produit. Nous aurions pu couper le MNT en deux ou trois parties, mais pour exploiter les résultats du modèle hydraulique, il faut un seul MNT. Nous avons donc été contraints de dégrader la résolution à 2 m pour rendre les calculs réalisables.

La dégradation de la résolution occasionne une perte importante d'information, car on ne garde qu'un point de mesure sur quatre. Nous avons évalué la perte d'information sur un échantillon de 100 000 points. La zone test choisie est située dans la haute vallée et elle réunit les contraintes les plus fortes : la rivière est étroite, il y a un pont et des constructions.

On obtient les résultats suivants :

- Erreur absolue moyenne : 0,174 m
- Ecart type sur l'erreur absolue : 0,046 m
- Erreur absolue minimum : 0 m
- Erreur absolue maximum : 8.85 m

Les erreurs absolues sont acceptables, mais il est important de regarder plus précisément où se trouvent les différences les plus importantes. Nous avons réalisé des cartes comparatives (figure 86, 87 et 88) sur lesquelles on peut voir que les différences entre les deux MNT sont concentrées aux endroits où la pente est forte. C'est le cas le long des bâtiments, mais aussi au niveau des berges de la rivière. Cela peut poser problème dans le cadre d'une utilisation hydraulique.

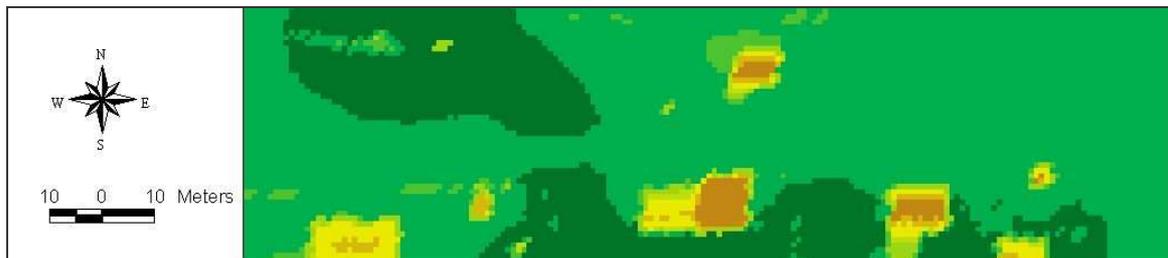


Figure 86 : MNT original de résolution 1m

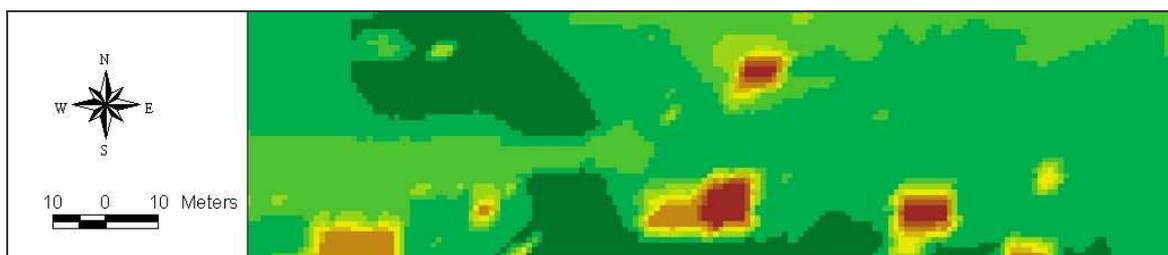


Figure 87 : MNT simplifié de résolution 2m

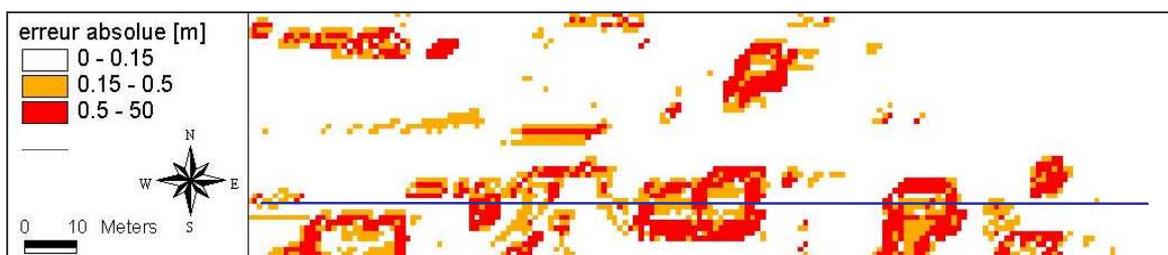


Figure 88 : erreur absolue sur l'altitude entre les deux MNT de résolution différente

Nous avons comparé les deux MNT à l'aide d'un même profil en travers (tracé en bleu sur la figure 88). On se représente mieux les erreurs induites par le changement de résolution (figure 51).

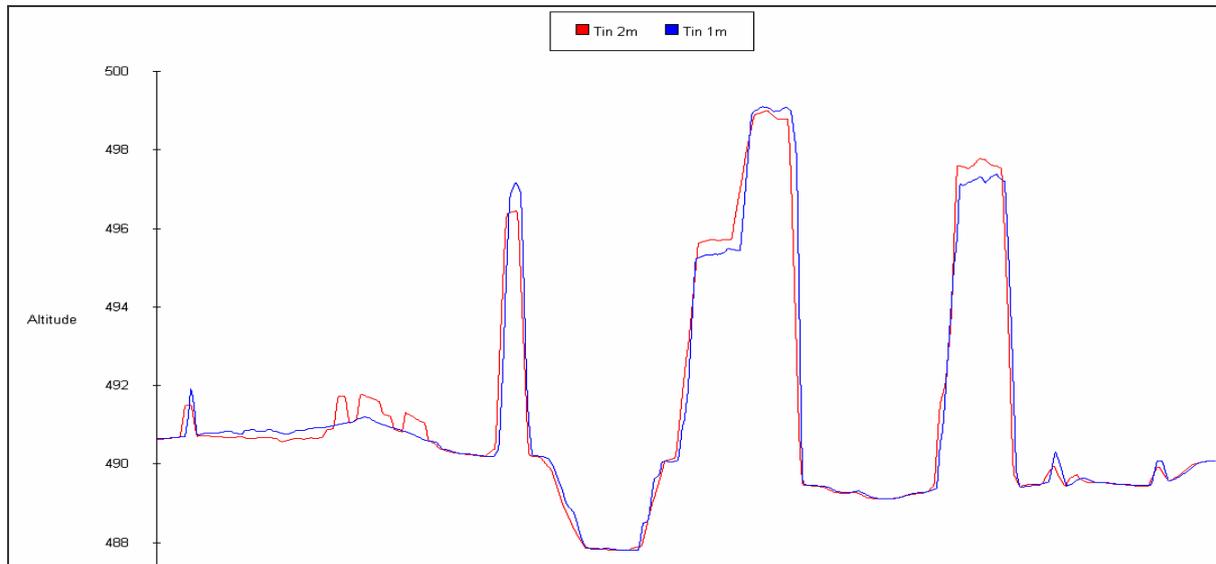


Figure 89 : comparaison de profils en travers pour deux MNT de résolutions différentes

Les profils en travers obtenus à partir des deux MNT sont sensiblement équivalents, même si pour les constructions les écarts peuvent être importants. Cependant, d'un point de vue hydraulique, le plus important est la section d'écoulement. De ce point de vue, les conséquences du changement de résolution sont minimales.

En conclusion, le changement de résolution ne semble pas affecter sensiblement la qualité de la description topographique. Nous avons retenu cette méthode pour traiter l'ensemble des données disponibles. A l'avenir, il serait plus simple et moins onéreux de choisir une résolution de lever techniquement exploitable par la suite. Cependant, les données surnuméraires aujourd'hui pourront sans doute être exploitées demain, lorsque les moyens techniques auront évolué.

Nous avons préféré une résolution plus faible mais uniforme à un TIN de résolution variable. Il est possible de générer un TIN fin pour le lit mineur et un TIN plus grossier pour le lit majeur, puis de les fusionner. Cependant, dans le cas de vallées très urbanisées comme la vallée de la Thur, le lit majeur est encombré d'ouvrages et de constructions qui constituent des limites physiques d'écoulement. Il est important de les intégrer à la géométrie de la rivière de façon précise, ce que ne permet pas un TIN de résolution grossière.

Nous ajoutons qu'en utilisant une résolution multiple de la résolution initiale, on utilise uniquement des points mesurés pour servir de base au TIN. Il n'y a pas d'interpolation des données originales.

Extraction des profils en travers

Pour choisir les profils en travers, l'utilisateur doit avoir une bonne connaissance du fonctionnement hydraulique des cours d'eau, mais également des modèles hydrauliques 1D. En effet, les profils doivent être représentatifs des conditions d'écoulement.

Nous avons utilisé Arcview 3.3 et les extensions Spatial Analyst et 3D Analyst, ainsi que l'extension gratuite HEC-GeoRAS (USACE, 2001). Cet utilitaire permet l'extraction des profils en travers à partir du MNT TIN et la compilation d'un fichier d'import pour HEC-RAS. La géométrie complète de la rivière est créée automatiquement à partir du fichier d'import. L'outil est performant, mais la sélection des profils doit néanmoins être rigoureuse.

Pour tracer les profils en travers, l'utilisateur doit pouvoir identifier d'un simple coup d'œil les ruptures de pente, les lignes de berge ou de talus. L'affichage du TIN par l'ordinateur est lent et ne permet pas une bonne visualisation de ces éléments. La meilleure visualisation est sans conteste l'affichage des courbes de niveau (figure 90). En choisissant un espacement fin (20 cm), on peut faire ressortir les détails sans surcharger l'affichage, ni la mémoire vive de l'ordinateur. Avec un peu d'habitude, l'utilisateur distingue rapidement la rivière et les différents objets utiles. L'interprétation de l'image devient intuitive.



Figure 90 : exemple de courbes de niveau espacées de 20 cm

Lorsqu'on utilise un modèle hydraulique 1D, on fait l'hypothèse que tous les écoulements s'effectuent dans une unique direction : l'axe de la rivière. Cet axe permet de mesurer la distance curviligne séparant les profils en travers pour calculer la pente du lit de la rivière, qui est un paramètre très important. Le modéleur doit donc dessiner à l'écran l'axe de la rivière. Cette tâche est facilitée par l'affichage des courbes de niveau et le tracé est très précis.

De même, le modèle hydraulique 1D utilise des valeurs de rugosité différentes pour le lit mineur et le lit majeur. L'utilisateur doit définir les lignes de haut de berge séparant le lit mineur du lit majeur. Celles-ci sont facilement repérables grâce aux courbes de niveau. Les lignes de berge permettent aussi de tenir compte de la sinuosité de la rivière en attribuant des distances entre profils différentes pour la rive gauche et pour la rive droite.

Enfin, l'utilisateur détermine les lignes de courant en lit majeur. Cette étape est moins rigoureuse, puisque bien souvent il est difficile de deviner quel chemin emprunte la crue. Grâce aux courbes de niveau, on peut tracer la trajectoire la plus probable. Les lignes de courant ne sont pas directement utilisées pour la modélisation, mais elles sont utiles pour tracer les profils en travers.

L'ensemble des lignes évoquées ci-dessus constitue la structure longitudinale du modèle (figure 91).

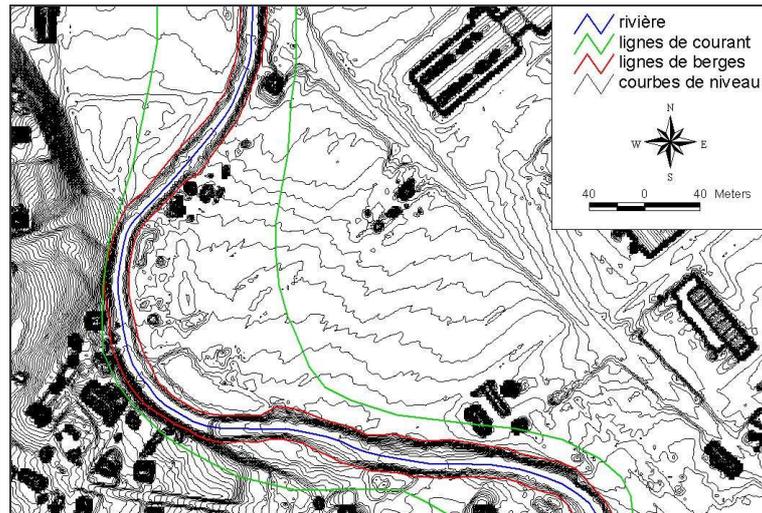


Figure 91 : lignes définissant la structure longitudinale du modèle

Nous proposons six règles simples pour choisir et tracer les profils en travers dans l'objectif d'une modélisation hydraulique 1D.

- 1. Les profils en travers doivent toujours être perpendiculaires aux lignes de courant.**
- 2. Les profils en travers ne doivent jamais se croiser.**

Ces deux premières règles sont simples à comprendre, mais parfois difficile à concilier lorsque la rivière méandre beaucoup (figure 92).

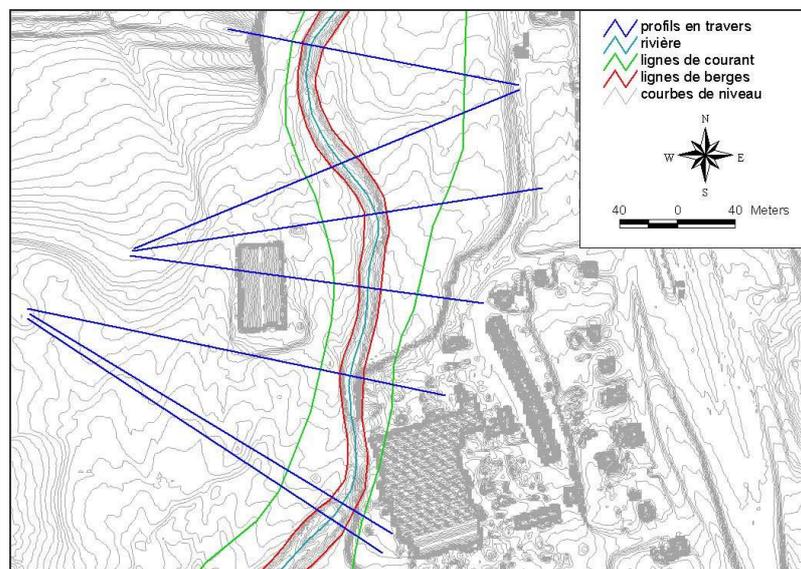


Figure 92 : tracé des profils en travers par rapport aux lignes de courant

- 3. Les profils en travers doivent prendre en compte toute la largeur du lit majeur.**

Pour pouvoir modéliser correctement les plus fortes crues, il est nécessaire de disposer de la géométrie de la rivière sur la plus grande largeur possible. Le profil en travers doit donc couvrir toute la largeur du lit majeur naturel. Toutefois, il est parfois possible d'arrêter le trait sur des limites réellement insubmersible, comme les plus hauts remblais ferroviaires ou routiers par exemple (figure 93).

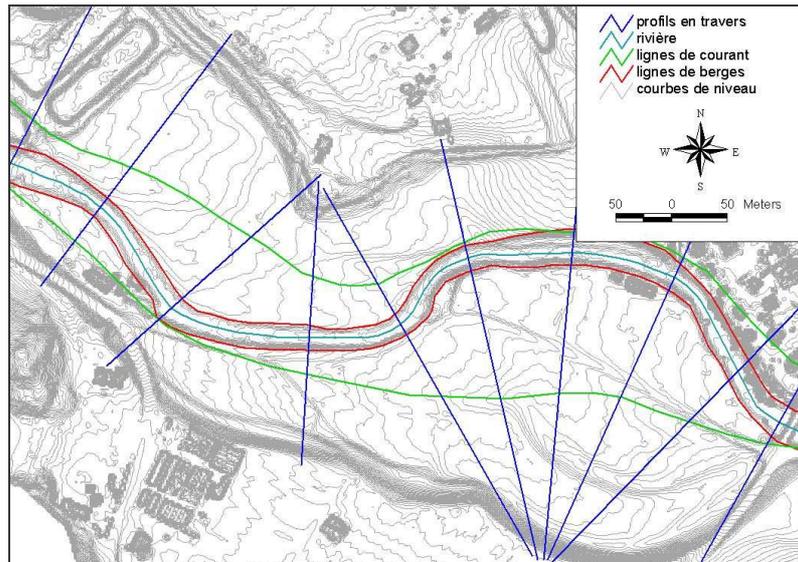


Figure 93 : extension maximale des profils en travers pour bien décrire le lit majeur

4. Les profils en travers doivent décrire le profil en long.

Cette quatrième règle est très importante. En effet, le profil en long utilisé par le modèle est défini par l'ensemble des points les plus bas des profils en travers. Les calculs de pente faits par le modèle dépendent directement du choix des profils en travers. Les seuils artificiels en rivière sont un cas d'école : pour que le modèle en tienne compte correctement, il faut les encadrer par deux profils en travers (figure 94).

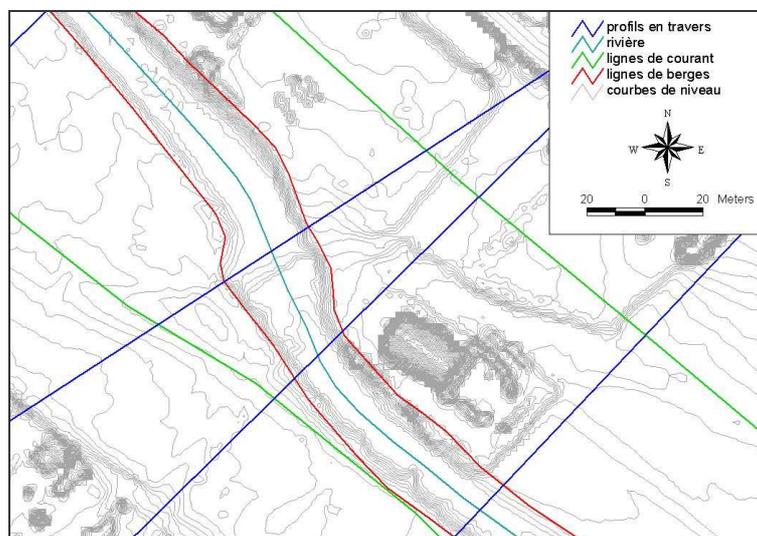


Figure 94 : deux profils en travers encadrant un seuil pour bien décrire le profil en long

5. Les profils en travers doivent permettre de modéliser les ouvrages.

La cinquième règle est valable pour tous les ouvrages présents sur la rivière (seuils et ponts). La prise en compte des ouvrages dans le modèle s'appuie sur la connaissance fine de la géométrie de la rivière à l'endroit où ils sont implantés. Il est donc nécessaire de tracer un profil en travers au plus proche pour une bonne modélisation de l'ouvrage par la suite. Ce profil de référence doit être situé à l'amont, car le modèle hydraulique prend toujours le profil amont comme référence (figure 95). Parfois, il est utile d'encadrer l'ouvrage par deux profils

en travers, notamment lorsque la géométrie de la rivière change beaucoup au passage de l'ouvrage (figure 97).

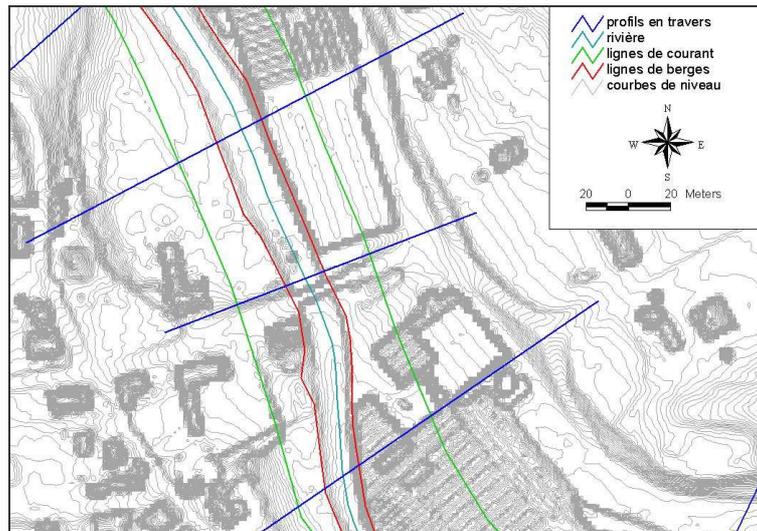


Figure 95 : profil en travers placé au plus près et à l'amont d'un pont

6. Les profils en travers doivent décrire les contractions et les élargissements des écoulements.

Les écoulements hydrauliques sont particulièrement sensibles aux contractions et aux élargissements, car ils occasionnent de fortes pertes de charges. Pour que la modélisation soit de qualité, il faut tracer un profil à chaque changement de section (figure 96). On doit porter la même attention aux variations de section du lit mineur qu'à celles du lit majeur.

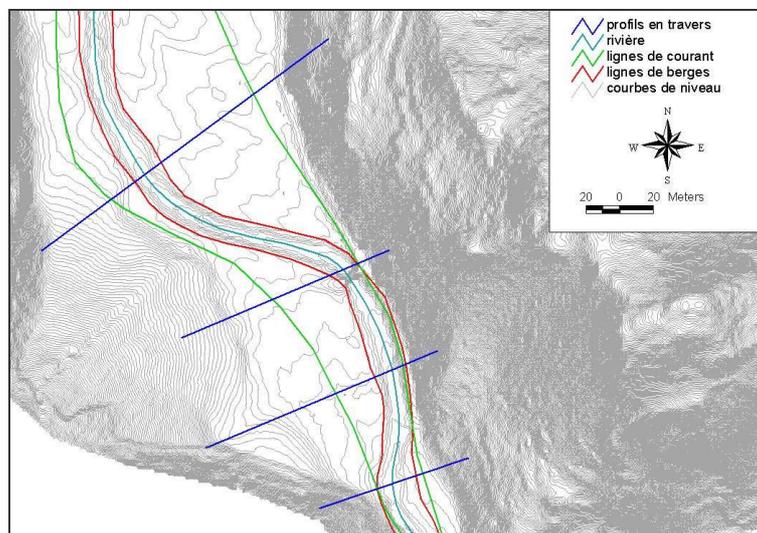


Figure 96 : prise en compte de l'élargissement et du rétrécissement du lit majeur

Il est important de rappeler que seule une bonne connaissance du terrain de la vallée étudiée permet une prise en compte correcte de toutes les contraintes hydrauliques dans la modélisation.

Dans certains cas, le choix de tracé est particulièrement difficile à réaliser, par exemple lorsqu'un remblais routier coupe la rivière de façon non orthogonale. En effet, il y a à la fois une contraction, un élargissement et un pont à prendre en compte. La méthode à adopter consiste à suivre virtuellement le cours d'eau de l'amont vers l'aval en adoptant une

vision monodimensionnelle : il faut se représenter la géométrie telle que le modèle l'utilise (figure 97).

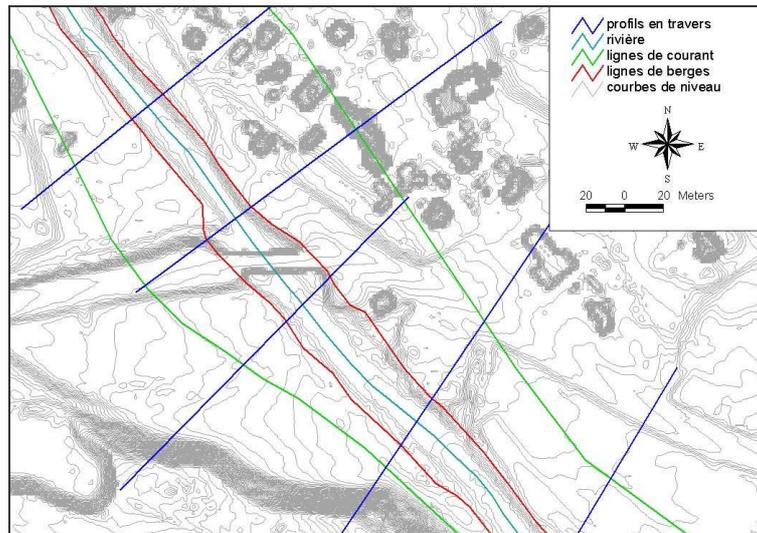


Figure 97 : choix des profils en travers dans un cas complexe

Lorsque tous les profils en travers ont été tracés, le fichier d'import est créé par HEC-GeoRAS en extrayant les valeurs d'altitude du TIN pour chaque profil en travers. Désormais, l'ensemble des calculs hydrauliques utilisera cet unique échantillon d'information topographique. Le choix des profils en travers est une étape déterminante pour la qualité de la modélisation hydraulique.

Il serait intéressant d'utiliser des techniques d'analyse d'images pour aider à l'identification des ouvrages longitudinaux comme les talus routiers et les digues. On pourrait ensuite développer un tracé semi-automatique des profils en travers qui respecterait les six règles simples énoncées précédemment.

Le pas d'espace du modèle hydraulique étant fin, on crée des profils en travers intermédiaires par interpolation des profils extraits du MNT. Pour que cette interpolation soit réaliste, il est préférable de simplifier les profils en travers extraits du MNT en ne conservant que les points caractéristiques (figure 98).

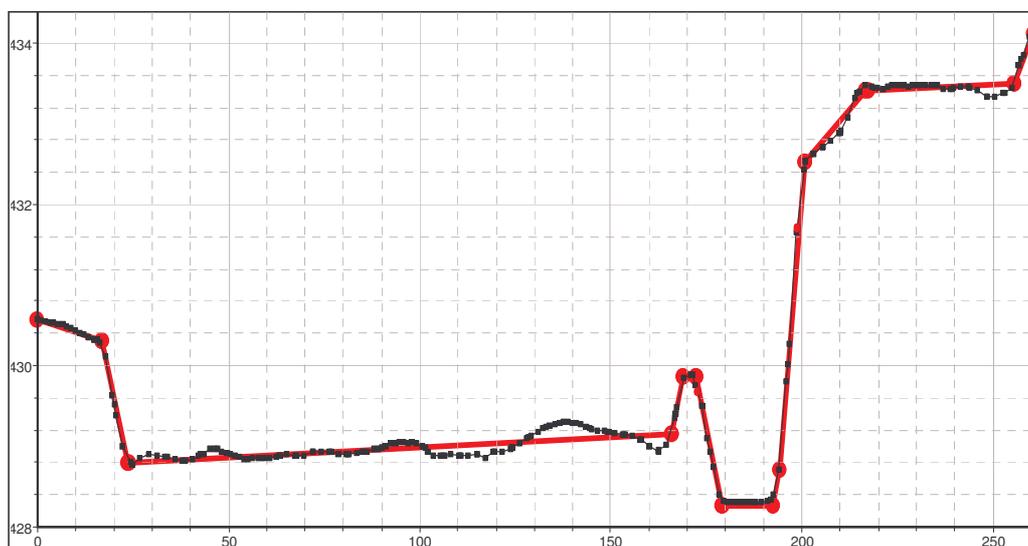


Figure 98 : simplification d'un profil en travers conservant les points caractéristiques

La simplification des profils en travers évite de reproduire par interpolation des reliefs qui n'ont pas de signification hydraulique. On peut utiliser l'outil de filtrage de HEC-RAS pour simplifier automatiquement le profil en lit majeur. Pour le lit mineur, il est préférable d'intervenir manuellement pour être certain de ne pas perdre les points caractéristiques de haut de berge et de pied de berge.

Les levés topographiques représentent une masse de données considérable et leur exploitation pour la modélisation hydraulique est un travail important. Même si les nouveaux outils informatiques sont de plus en plus performants, ils ne garantissent pas la qualité du choix des profils en travers. L'utilisateur doit faire preuve d'une grande rigueur et acquérir un savoir faire pour valoriser de telles données.

2.3.3 Modélisation de l'aléa et cartographie

A partir du jeu complet de profils en travers extraits du MNT, nous pouvons envisager la simulation hydraulique en régime transitoire des 8 événements de référence sélectionnés précédemment. Nous présentons tout d'abord les hypothèses formulées et les simplifications concédées pour mener à bien la modélisation hydraulique (cf. § 2.3.3.1). Ensuite, nous rendons compte du calage et de la validation du modèle hydraulique appliqué à la Thur (cf. § 2.3.3.2). Enfin, nous dévoilons les résultats des simulations hydrauliques et la cartographie de l'aléa dans la vallée de la Thur (cf. § 2.3.3.3).

2.3.3.1 Hypothèses et simplifications

Nous avons dans un premier temps vérifié que le débit de pointe est bien la variable caractéristique de la crue (cf. 2.2.3.1.). Les ouvrages hydrauliques peuvent être intégrés au modèle, mais nous avons dû réaliser des simplifications pour assurer la stabilité des simulations en régime transitoire.

Débit de pointe et cote maximale

Dans le contexte des rivières de moyenne montagne à pente relativement forte, on peut vérifier que le débit de pointe et la cote maximale coïncident (figure 99). La modélisation hydraulique est réalisée sur une rivière « virtuelle » simplifiée, présentant une pente homogène, sans ouvrages hydrauliques. Les détails concernant les caractéristiques et la construction de la rivière simplifiée sont données au § 3.2.2.

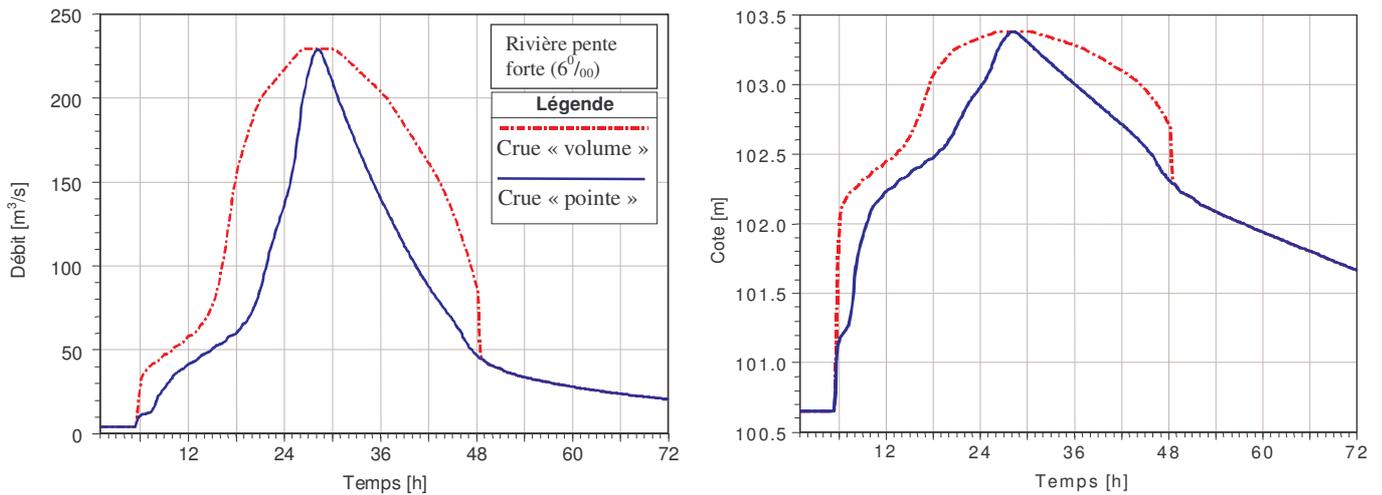


Figure 99 : hydrogramme et limnigramme, crue « volumineuse » et crue « pointue »

Sur les figures ci-dessus, on constate que pour le même débit de pointe, on obtient la même cote maximale, quelle que soit la forme de la crue. Une crue volumineuse mettant plus de temps à s'évacuer à l'aval, elle crée une influence aval faisant en principe élever la ligne d'eau maximale. Cependant, la forte pente du cours d'eau limite beaucoup l'influence aval et donc l'importance de la forme de la crue. Pour vérifier ce constat on peut également visualiser la courbe de tarage calculée pour les deux crues (figure 100).

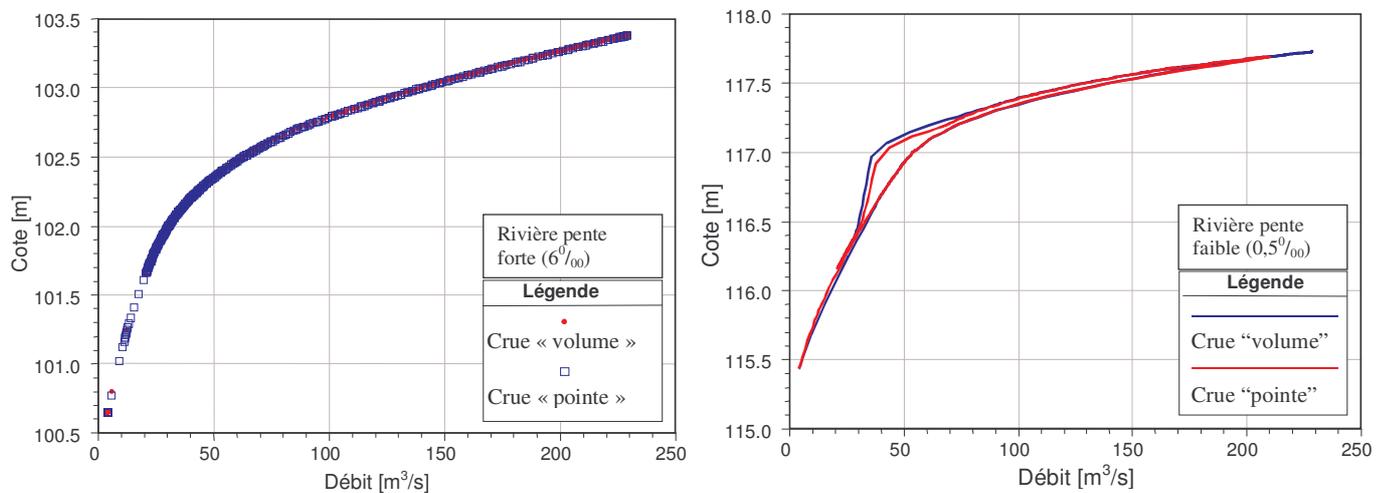


Figure 100 : courbes de tarage pour les deux types de crues dans des contextes différents

On peut observer ci-dessus que dans le cas d'une rivière de moyenne montagne à pente forte (6‰), il n'y a pas d'hysteresis quelle que soit la forme de la crue. **L'hypothèse formulée plus haut de coïncidence entre le débit de pointe et la cote maximale est donc vérifiée dans le contexte des rivières de moyenne montagne.** Sur la figure de droite on peut constater que pour les rivières de plaine à pente faible (moins de 1‰), il y a une hysteresis d'autant plus marquée que la crue est volumineuse. Dans le contexte des rivières de faible pente on ne peut pas tenir compte uniquement du débit de pointe de la crue, il faut également tenir compte de son volume.

Prise en compte des ouvrages hydrauliques

Il y a deux grands types d'ouvrages hydrauliques le long des rivières de moyenne montagne : les seuils et les ponts.

Le modèle hydraulique ne pouvant pas calculer des écoulements torrentiels en régime transitoire, il faut que tous les seuils soient intégrés comme des ouvrages (figure 101). Ainsi, le modèle utilise une loi de seuil pour calculer la perte de charge sur l'ouvrage. Les seuils sont bien visibles sur le MNT à haute résolution, mais une visite de terrain permet de vérifier leur géométrie.

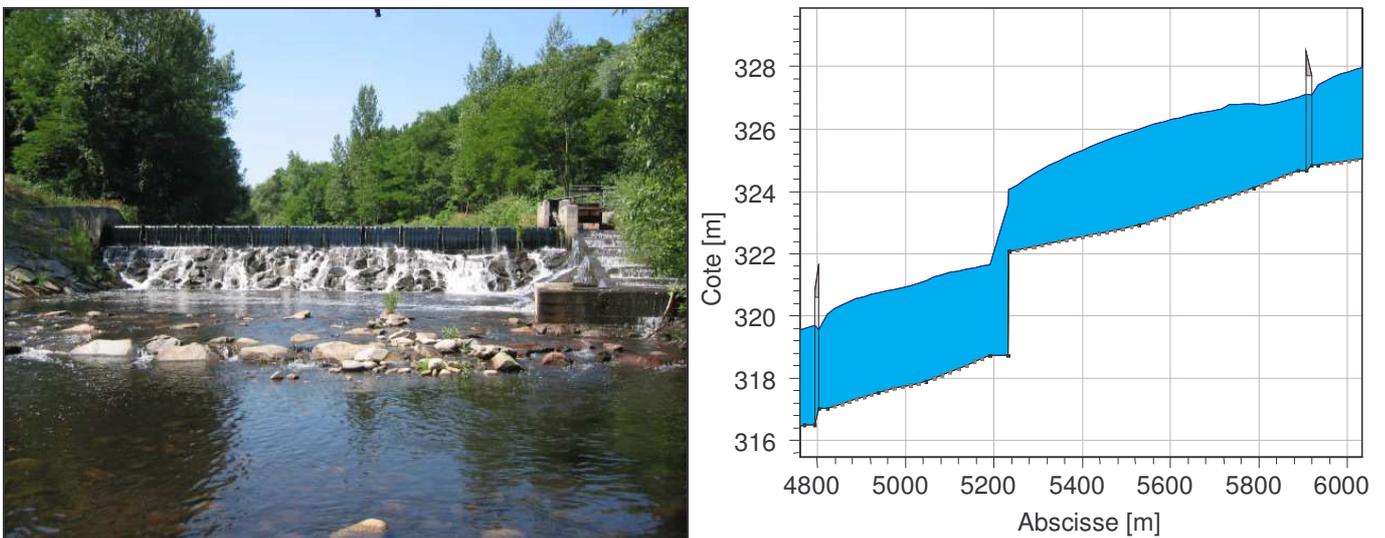


Figure 101 : photo d'un seuil à cuvette et profil en long correspondant issu de HEC-RAS

Sur le profil en long ci-dessus, on peut voir que le seuil est représenté non pas par un tronçon de cours d'eau à pente forte, mais comme un ouvrage de chute verticale. On remarque également deux ponts en amont et en aval. Le MNT à haute résolution ne permet pas d'observer toutes les caractéristiques d'un pont. Des levés manuels sont donc nécessaires.

Dans le cadre d'une approche à grande échelle, nous avons privilégié une description simplifiée des ponts. Grâce au MNT à haute résolution on peut déterminer pour chaque pont la cote supérieure du tablier. Pour décrire de façon simplifiée l'ouvrage, nos visites de terrain ont consisté à faire un schéma et une photo de l'ouvrage. Nous avons mesuré l'épaisseur du tablier, la largeur de la chaussée et la largeur des piles. Les cotes nécessaires au modèle sont calculées en relatif par rapport à la cote supérieure du tablier. La section de cours d'eau dans laquelle est implanté l'ouvrage est un profil en travers amont tracé au plus près de l'ouvrage (figure 102).

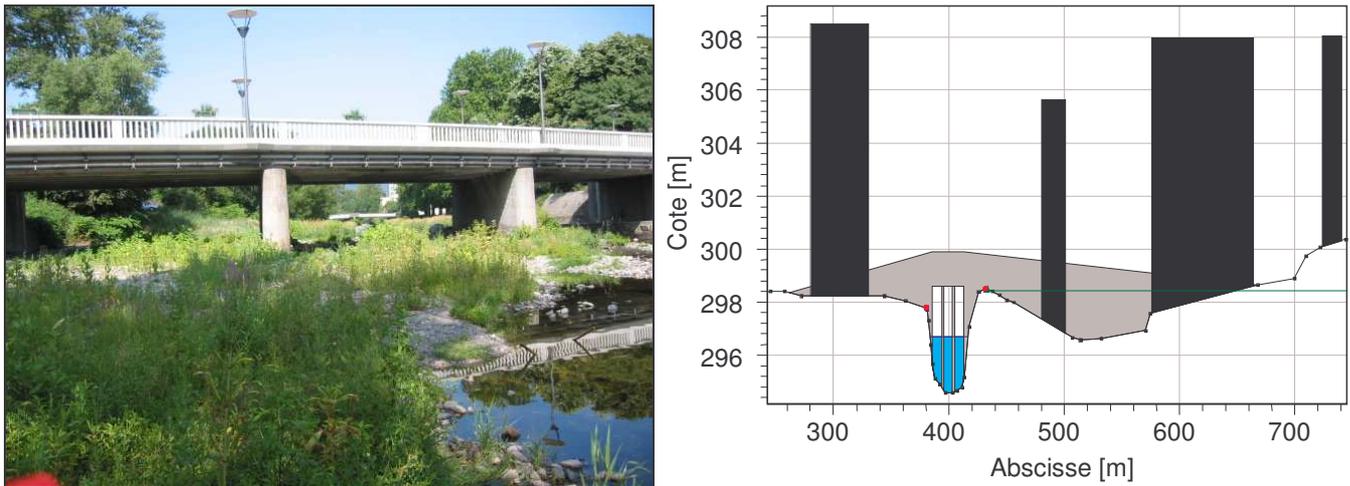


Figure 102 : photo d'un pont et profil en travers correspondant issu de HEC-RAS

Cette description sommaire des ouvrages est suffisante pour une approche à grande échelle et dans le cas des rivières de moyenne montagne pour lesquelles le remous aval est limité.

Simplifications pour la stabilité du modèle

La grande difficulté des simulations en régime transitoire réside dans l'instabilité du modèle. Celle-ci est moins importante pour les petites crues dont les débordements sont limités que pour les crues exceptionnelles qui submergent les ponts et les digues.

Comme nous l'avons vu plus haut (cf. § 2.3.1.2) le choix du pas d'espace et du pas de temps est primordial. Pour la Thur, nous avons finalement retenu **un pas d'espace de 20 m et un pas de temps de calcul de 1 minute**.

Les seuils doivent tous être matérialisés par un ouvrage, sinon le modèle devient instable en raison des fréquents passages en tirant d'eau critique. En régime transitoire, les erreurs de calcul se propagent de l'amont vers l'aval et l'instabilité peut s'amplifier à tel point que le modèle ne trouve plus de solutions ou des solutions invraisemblables.

Le sommet des digues doit être matérialisé par un **point de levée (levees)** (USACE, 2000a). La levée indique au modèle que la zone située en retrait ne peut être submergée qu'à partir du moment où la ligne d'eau dépasse la cote du point de levée (figure 103).

Lorsque la rivière submerge les terrains protégés par une digue, la section mouillée varie brutalement. Cela engendre une forte variation de la vitesse d'écoulement et de la débitance. Cette brusque variation est une source d'instabilité importante, ainsi on définit les zones inondables situées derrière la digue comme des **zones d'écoulement inefficaces permanentes (permanent ineffective flow areas)** (figure 103) (USACE, 2000b). La vitesse d'écoulement de toute la section située en contrebas du point de débordement est considérée comme nulle. Cette zone est prise en compte comme un volume de stockage, mais pas comme une section d'écoulement.

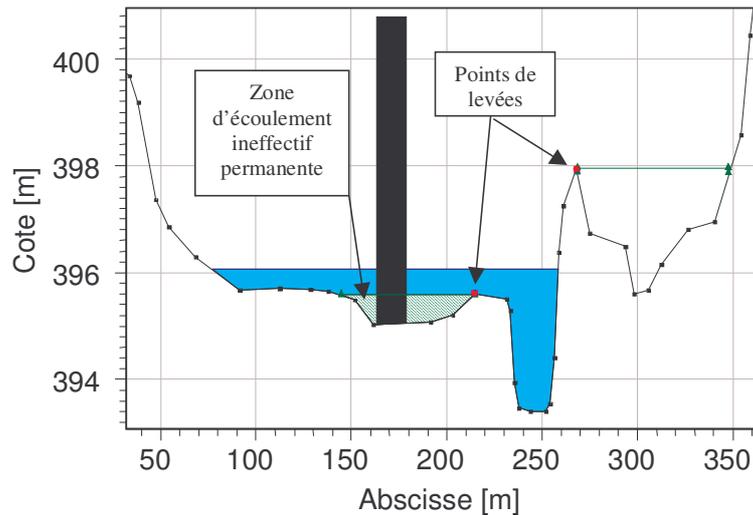


Figure 103 : profil en travers avec points de levées et zone d'écoulement ineffectif

Les opérations présentées ci-dessus permettent des simulations en régime transitoire stables pour des crues d'intensité faible à moyenne (périodes de retour inférieures à 10 ans). Pour les crues plus fortes, les ponts sont une cause d'instabilité majeure, car ils sont souvent en charge, voire submergés. Le modèle ne parvient pas à simuler correctement le déversement par dessus le tablier du pont, notamment dans les zones à forte pente. La ligne d'eau calculée à l'amont des ponts est invraisemblablement élevée. La rétention à l'amont du pont est exagérée et donc le routage de la crue est faussé. Pour éliminer les sources d'instabilité, nous avons modifié un à un les ponts de l'amont vers l'aval. Chaque amélioration locale provoquait une nouvelle instabilité à l'aval. Le modèle fonctionnant beaucoup mieux dès lors qu'on n'intégrait pas les ponts dans la géométrie du cours d'eau, nous avons envisagé de les supprimer. Pour mesurer l'incidence de la suppression des ponts sur la ligne d'eau, nous avons comparé, en régime permanent, la ligne d'eau calculée avec les ponts et sans les ponts pour une crue forte et une crue moyenne (figure 104).

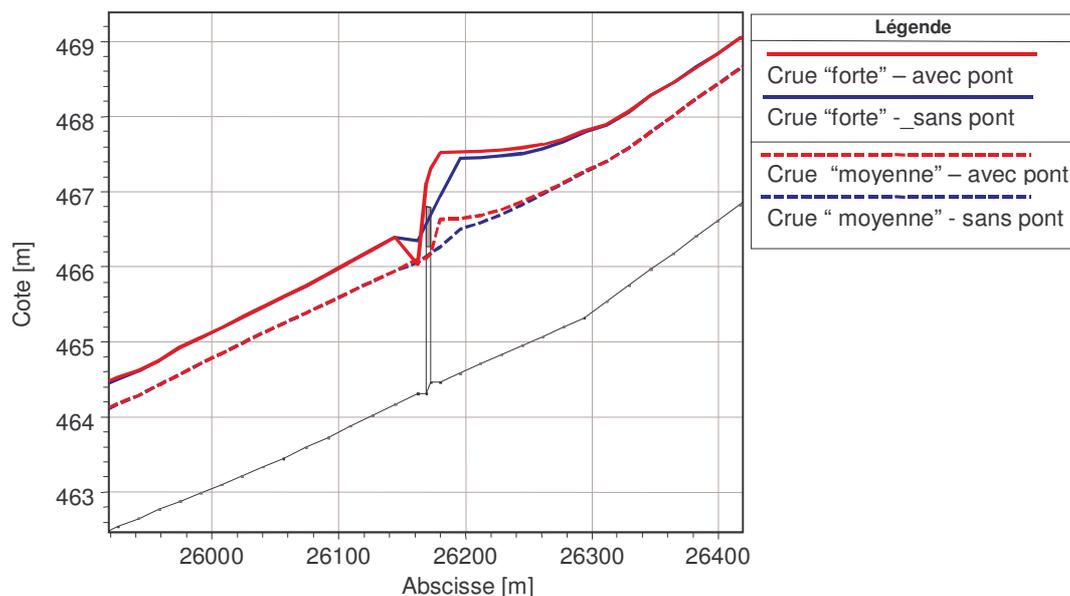


Figure 104 : comparaison des lignes d'eau en présence ou en absence d'un pont

On constate que pour les crues moyennes il y a peu de différence entre les lignes d'eau calculées avec ou sans le pont. Pour les crues fortes, la différence est plus marquée, mais elle reste localisée à l'amont sur une centaine de mètres. Notre travail portant sur plusieurs dizaines de kilomètres de cours d'eau, **nous avons choisi de ne pas tenir compte des ponts dans les simulations en régime transitoire**. Nous voulons avant tout préserver la stabilité du modèle et le bon routage de la crue.

2.3.3.2 Calage et validation du modèle hydraulique

Le paramètre de calage d'un modèle hydraulique est le coefficient de Manning n (ou bien $K = 1/n$). Pour mettre en évidence la sensibilité du modèle à ce paramètre, nous proposons un test de sensibilité.

Test de sensibilité à la valeur de n

On définit une rugosité de lit mineur et une rugosité de lit majeur. Le test de sensibilité peut porter sur la ligne d'eau ou sur le routage d'un hydrogramme. On a choisit les valeurs de paramètres suivantes (tableau 11), notons que d'autres couples auraient pu être testés :

	$n_{\text{lit mineur}}$	$n_{\text{lit majeur}}$
Rugosité faible	0.03	0.05
Rugosité « normale »	0.05	0.08
Rugosité forte	0.08	0.10

Tableau 11 : valeurs de coefficient de Manning retenues pour le test de sensibilité

Ces trois couples de valeurs donnent les résultats suivants pour une rivière « virtuelle » de moyenne montagne à la pente assez forte (6 ‰) (figure 105).

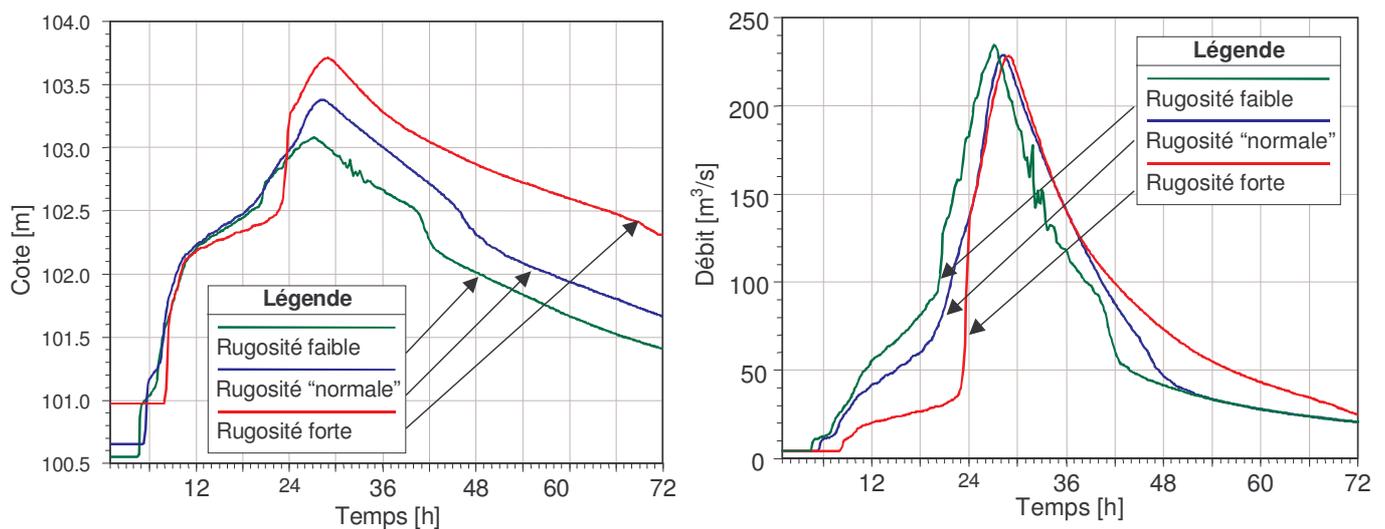


Figure 105 : ligne d'eau et hydrogramme aval pour trois rugosités différentes

On constate que l'effet de la rugosité sur le routage de l'hydrogramme et le débit de pointe est assez faible. La différence la plus notable est observée pour la montée de la crue qui commence beaucoup plus tôt lorsque la rugosité est faible car la rétention est moins importante.

La cote maximale de la ligne d'eau est assez sensible à la rugosité : le calage sera donc effectué sur la cote maximale. On peut aussi noter que pour une rugosité faible, le modèle est à la limite de l'instabilité. L'écoulement est très rapide et proche d'un écoulement torrentiel ce qui rend le modèle peu stable. En pratique la rugosité du lit mineur ne devra pas être inférieure à 0,05 pour éviter cette instabilité.

Reconstitution des crues observées

Pour caler et valider un modèle hydraulique, il faut disposer d'observations sur les hauteurs d'eau atteintes pendant les crues historiques. Ces cotes sont le plus souvent disponibles sous forme de repères de plus hautes eaux fixés sur les culées des ponts. Pour pouvoir comparer les hauteurs simulées aux hauteurs observées, il faut également disposer de données hydrologiques sur les crues historiques.

Dans le cas de la vallée de la Thur, on dispose uniquement des hydrogrammes de crue aux stations Wissbach, Willer/Thur et Staffelfelden. On dispose de cotes de plus hautes eaux et des débits de pointe pour les crues d'avril 1983 et de février 1990 (tableau 12).

Station	Crue avril 1983	Crue février 1990
Wissbach	8.7	10.7
Willer/Thur	137	113
Staffelfelden	126	151

Tableau 12 : débits de pointe [m³/s] des crues de 1990 et 1983

Dans un premier temps, nous avons envisagé de reconstituer les deux crues historiques à l'aide de SHYPRE. Nous avons imposé au modèle de sélectionner les événements dont les débits de pointe sont comparables à ceux des deux crues historiques. Cela ne donne pas des résultats satisfaisants : on sous-estime le débit des affluents amont et on obtient des débits trop faibles à l'aval. Nous pensons que les crues de 1983 et 1990 ont été générées par des événements pluvieux beaucoup plus forts à l'amont du bassin versant qu'à l'aval. Il est impossible de reproduire de tels événements en utilisant une pluie de bassin. La fonte de neige dans le haut bassin versant accentue peut-être ce contraste entre l'amont et l'aval. Pour la crue de 1983, la décroissance du débit entre Willer/Thur et Staffelfelden indique bien qu'il n'y a presque pas d'apport dans la partie aval du bassin versant. Il est aussi possible que nous soyons confrontés à des mesures ou à des estimations de débit de pointe fausses.

Nous avons finalement utilisé une formule très classique d'interpolation non-linéaire par la superficie :

$$Q_1 = Q_2 \cdot \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{0,8} \quad \text{avec } Q : \text{débit de pointe et } S : \text{superficie du bassin versant}$$

La station de référence est Willer/Thur, on calcule le débit de pointe dans la Thur au niveau de l'exutoire de chaque sous-bassin versant affluent. Pour la crue de 1983, les débits de pointe calculés à l'aval de Willer/Thur sont interpolés linéairement entre la valeur observée à Willer/Thur et celle de Staffelfelden (tableau 13).

Code Bassin	Superficie cumulée [km ²]	Débit 1983 [m ³ /s]	Débit 1990 [m ³ /s]
0	22	28	21
1	44	49	40
2	65	67	55
3	86	84	69
4	112	103	85
5	133	119	98
6 (Willer/Thur)	160	137	113
7	180	133	125
8	206	130	139
9 (Staffelfelden)	260	126	151

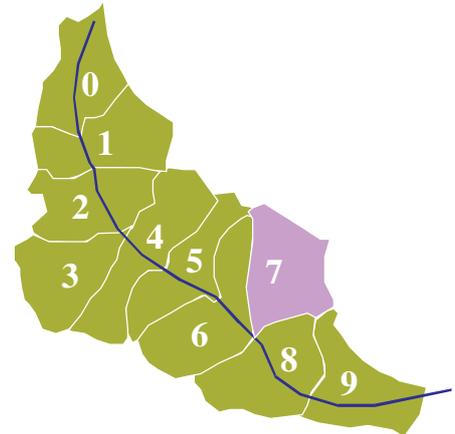


Tableau 13 : débits de pointe reconstitués des crues de 1983 et 1990

La reconstitution de l'hydrologie des deux crues historiques les plus fortes est assez sommaire. Le calage et la validation sont effectués en régime permanent.

Calage et validation en régime permanent

Les repères de crue étant disposés près des ponts, nous avons réalisé les simulations avec une géométrie les incluant. Le modèle a fonctionné en régime permanent fluvial. Le calage a été réalisé sur la crue de 1990 et la validation sur la crue de 1983. L'ensemble de la vallée ayant des caractéristiques physiques proches, nous avons calé un seul jeu de paramètres sur l'ensemble du tronçon étudié. Le meilleur jeu de paramètres est $n_{lit\ mineur} = 0,05$ et $n_{lit\ majeur} = 0,08$. On disposait de 11 repères de crue, les résultats du calage et de la validation sont dans le tableau suivant (tableau 14) :

Commune	Lieu-dit	Calage : crue de 1990			Validation : crue de 1983		
		z_{obs} [m]	z_{sim} [m]	Δz [m]	z_{obs} [m]	z_{sim} [m]	Δz [m]
Kruth	seuil village Kruth	483.55	483.87	0.32	483.98	484.05	0.07
Oderen	pont centre Oderen	449.36	449.45	0.09	449.61	449.62	0.01
Fellering	pont rouge RN66	434.26	434.59	0.33	434.71	434.71	0.00
Ranspach	pont d13b XI				410.94	411.16	0.22
Saint-Amarin	pont amont St-Amarin	402.32	402.62	0.30	402.35	402.83	0.48
Moosch	pont centre Moosch	385.86	386.10	0.24	385.78	386.30	0.52
Thann	pont du Bungert	335.65	335.66	0.01	335.43	335.70	0.27
Vieux-Thann	pont d35 (église)	326.74	327	0.26	326.72	326.94	0.22
Cernay	pont RN83	296.38	296.57	0.19	296.36	296.47	0.11
			moyenne	0.22		moyenne	0.21

Tableau 14 : résultats du calage et de la validation pour la vallée de la Thur

Le calage est satisfaisant au regard de la méconnaissance des débits de pointe réels et par rapport à la précision des données topographiques (15 cm). La validation est bonne, cela indique que le modèle est efficace pour simuler des crues différentes de l'événement utilisé en calage. La simulation des événements de référence devrait donner de bons résultats.

2.3.3.3 Simulation hydraulique et cartographie

La simulation hydraulique des événements de référence permet de spatialiser le débit de pointe en tout point du cours d'eau. Pour vérifier la cohérence de la modélisation, on peut comparer les résultats obtenus par simulation hydraulique avec les simulations globales de SHYPRE. Le couplage du modèle hydraulique et du SIG permet une cartographie automatique des événements de référence. Mais la cartographie finale de l'aléa doit être confiée à un opérateur ayant une bonne connaissance du terrain d'étude.

Cohérence des approches globale et spatialisée

Dans le cas de la vallée de la Thur, on peut comparer les hydrogrammes obtenus à Willer/Thur et à Staffelfelden par les deux approches décrites au § 2.1.3.3 (figure 106) :

- l'approche globale par modélisation pluie-débit : hydrogramme « global »
- l'approche spatialisée par le modèle hydraulique : hydrogramme « routé »

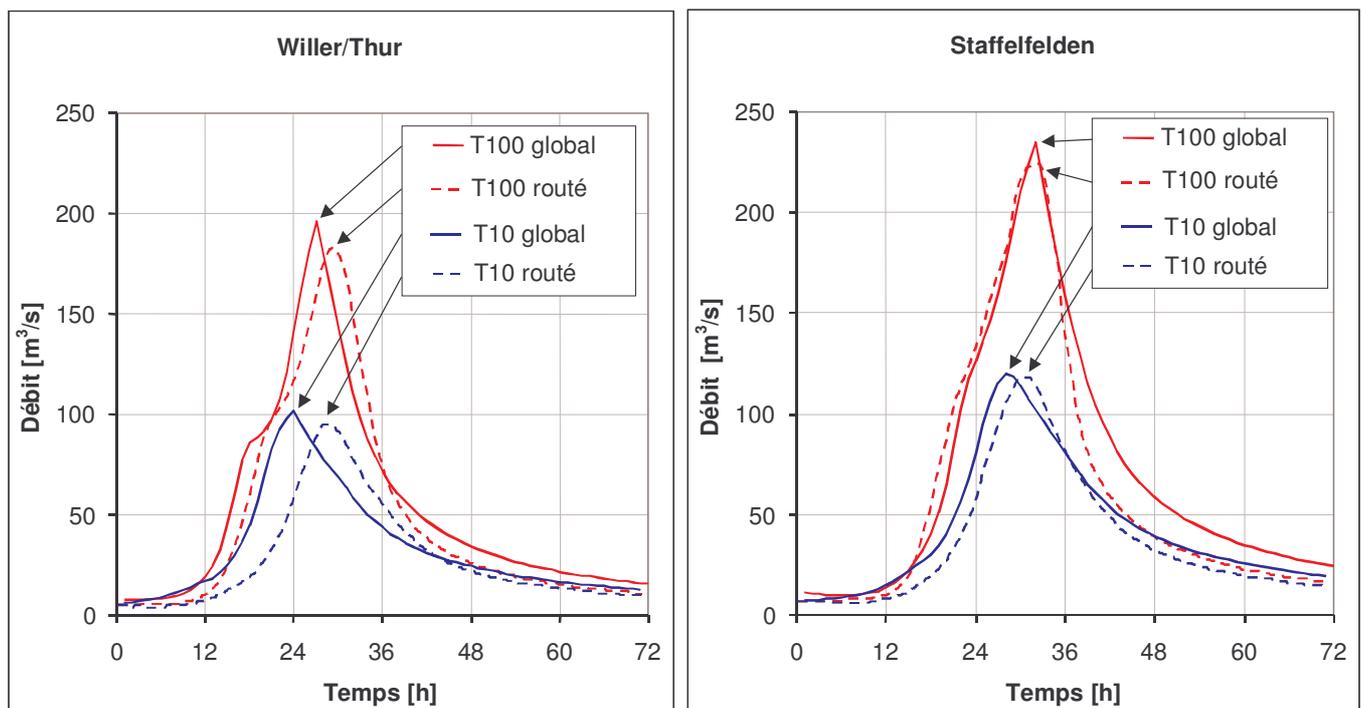


Figure 106 : hydrogrammes de crue centennale (T100) et décennale (T10)

On constate qu'avec le routage hydraulique le débit de pointe est légèrement sous-estimé. Les hydrogrammes ont des formes semblables, mais ils sont décalés dans le temps. Cela est à attribuer au paramètre C du modèle pluie-débit qui contrôle le décalage de l'hydrogramme dans le temps. Nous n'avons pas conditionné la valeur du paramètre C des sous-bassins versants à celles des bassins versants globaux de Willer/Thur et Staffelfelden. Nous n'attendons pas de bons résultats de ce point de vue. On peut également noter que la décrue est plus rapide avec le routage hydraulique qu'avec le modèle global.

La reconstitution des hydrogrammes par le routage hydraulique est globalement satisfaisante. Nous ne nous attendions pas à un tel résultat. En effet, nous n'avons introduit aucun décalage temporel entre les différents hydrogrammes de sous-bassins versants. Nous pensions obtenir des hydrogrammes routés à pointes multiples, mais le résultat est très proche de l'hydrogramme de référence fourni par le modèle global.

Le plus important pour la méthodologie est la reconstitution du débit de pointe. On peut comparer les valeurs de débit de pointe pour les 8 événements de référence (tableau 15).

Période de retour [ans]	Willer global [m ³ /s]	Willer routé [m ³ /s]	Ecart Willer [%]	Staffelfelden global [m ³ /s]	Staffelfelden routé [m ³ /s]	Ecart Staf. [%]
1	43	34	-21%	51	43	-15%
2	58	48	-18%	70	60	-13%
5	80	71	-11%	94	91	-3%
10	100	95	-5%	117	118	1%
20	123	120	-3%	143	152	7%
50	161	142	-12%	184	174	-5%
100	197	183	-7%	220	224	2%
200	237	244	3%	264	290	10%
		Ecart moyen	-9%		Ecart moyen	-2%

Tableau 15 : validation des quantiles de débit obtenus par routage hydraulique

Les résultats sont satisfaisants pour les crues les plus fortes, mais pour les crues plus courantes, on sous-estime le débit de pointe. Certains écarts proviennent du choix des événements de référence dont les débits de pointe n'atteignaient pas toujours exactement la valeur attendue. Cela est particulièrement vrai pour la crue de période de retour 200 ans, car il y a peu de choix dans les événements simulés. Nous avons retenu un événement assez fort à Staffelfelden et cela se retrouve dans les sorties du modèle hydraulique.

Cartographie automatisée de la crue

Pour chaque événement de référence, le modèle hydraulique produit la ligne d'eau maximale atteinte pendant la crue. Cette ligne d'eau correspond à l'extension maximale de la crue. La visualisation la plus simple consiste à tracer le profil en long des 8 lignes d'eau correspondant aux 8 événements de référence (figure 107). Le profil en long de la ligne d'eau centennale pour l'ensemble du tronçon étudié est fourni en **Annexe 2**.

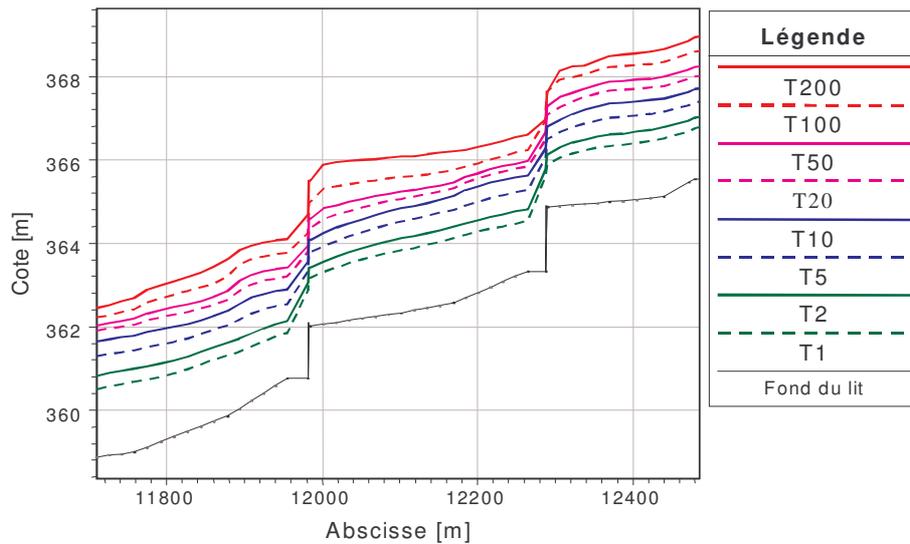


Figure 107 : profil en long des lignes d'eau maximales des 8 événements de référence

Chaque ligne d'eau maximale peut être exportée vers le logiciel de SIG Arcview afin de cartographier l'inondation. L'utilisateur peut sélectionner les variables qu'il souhaite cartographier. On peut par exemple cartographier la vitesse d'écoulement, mais nous avons vu plus haut que cette variable n'est pas simulée de façon réaliste avec un modèle hydraulique 1D. Nous nous contenterons donc d'exporter la ligne d'eau maximale de chaque événement de référence.

L'extension gratuite HEC-GeoRAS permet au logiciel Arcview de lire les fichiers d'export de HEC-RAS. Le SIG crée un modèle numérique de surface de l'inondation (MNS) à partir de la ligne d'eau maximale. Il détermine ensuite les limites de l'inondation par comparaison du modèle numérique de surface et du MNT à haute résolution (figure 108).

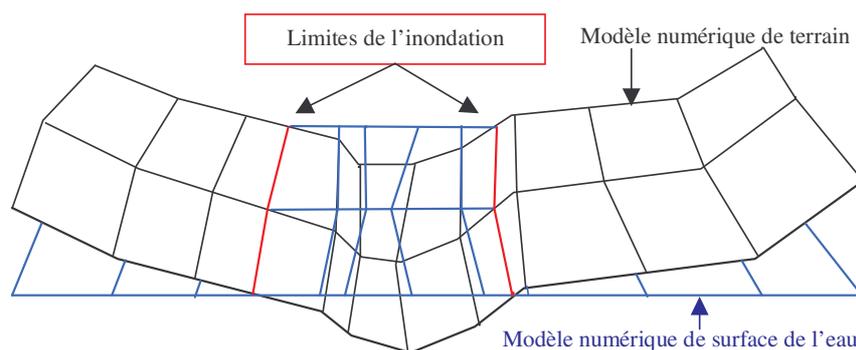


Figure 108 : délimitation de l'inondation à partir de modèles numériques de surface

Il est important d'utiliser le même MNT que celui qui a permis l'extraction des profils en travers afin de garantir la cohérence de la modélisation et du report cartographique (FARISSIER, 1993). Le contour de l'inondation est tracé en format vecteur (figure 109). Il fait apparaître toute la complexité de la topographie de la vallée.

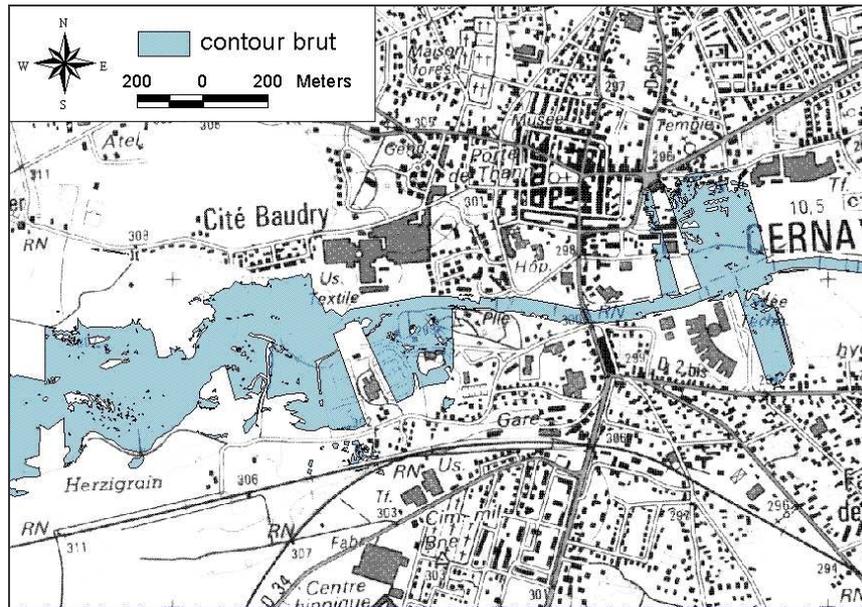


Figure 109 : carte du contour brut de la crue centennale

On peut également visualiser les hauteurs d'eau calculées à partir du MNS et du MNT. Nous avons choisi de les représenter selon 4 classes de hauteurs distinctes (figure 110). La cartographie de la crue centennale pour l'ensemble de la vallée est disponible en **Annexe 3**.

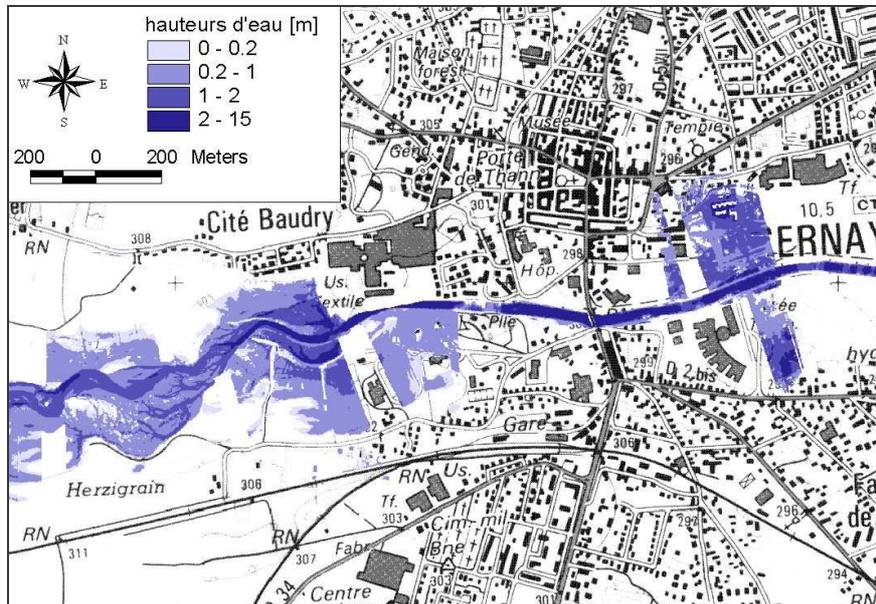


Figure 110 : carte des hauteurs d'eau simulées pour la crue centennale

On observe très bien les chenaux de crue du champ d'inondation à l'ouest. Les décrochements brutaux sont liés à des débordements localisés au niveau de certaines digues. Dans la réalité, l'eau s'écoule en lit majeur le long de la digue avant de retourner au lit mineur. Il est indispensable de corriger manuellement les enveloppes de crue.

Correction manuelle des enveloppes de crue

Les résultats bruts n'étant pas toujours satisfaisants, on affine manuellement le tracé des différentes enveloppes de crue. On s'aide des courbes de niveau tracées sur le MNT haute résolution, mais on fait aussi appel à une bonne connaissance du terrain (figure 111).

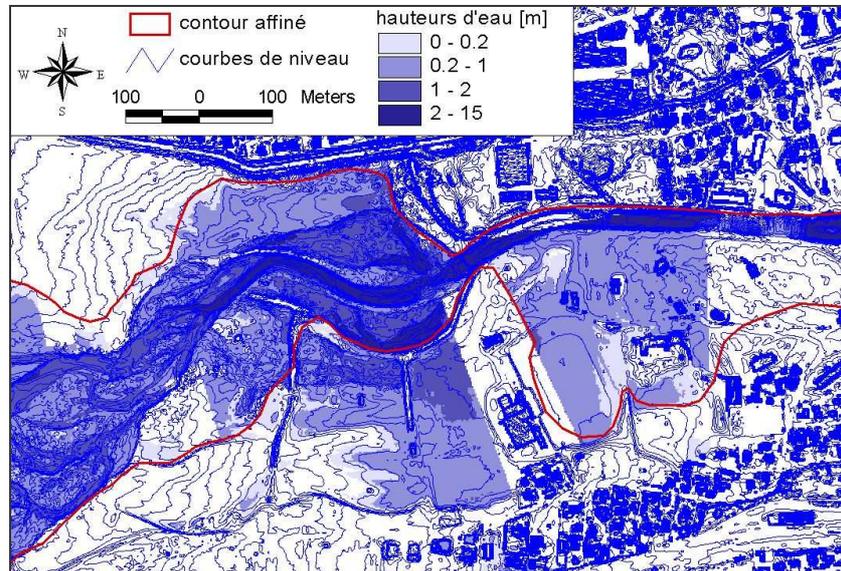


Figure 111 : contour de la crue centennale corrigé manuellement

La figure ci-dessus met en évidence l'importance capitale de la vérification et de la correction manuelle des enveloppes de crue. Il faut utiliser à la fois le MNT haute résolution et les profils en travers de HEC-RAS pour vérifier si les digues existantes sont bien prises en compte lors du report cartographique. Cette vérification manuelle doit être réalisée pour chaque crue de référence. C'est un travail fastidieux, mais l'expérience acquise sur un événement de référence permet ensuite d'analyser plus rapidement les autres événements. Le tracé sur une même carte de tous les événements de référence permet de définir la fréquence de submersion en tout point de l'espace. C'est l'aboutissement de toute la chaîne de modélisation (figure 112). Les cartes de l'ensemble de la vallée sont présentées en **Annexe 4**.

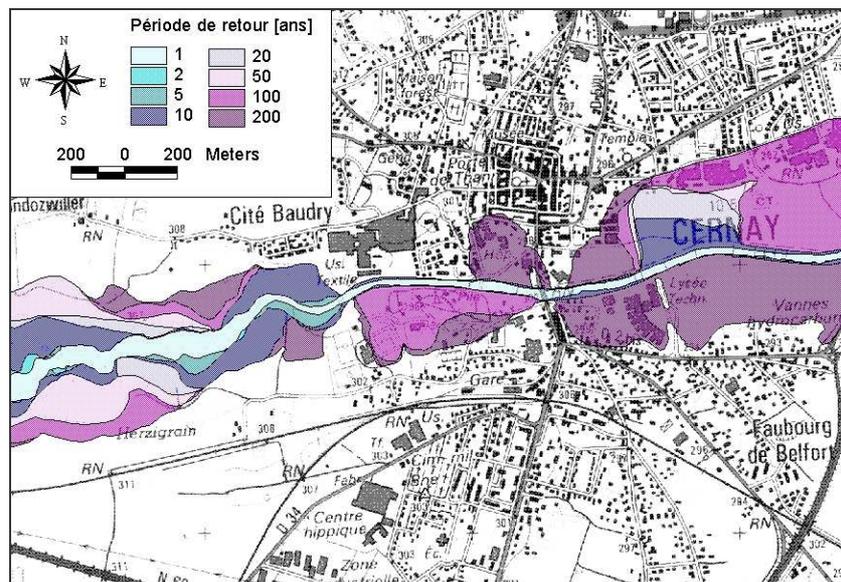


Figure 112 : cartographie multi-fréquence de l'aléa

On observe un accroissement de la surface inondée avec la période de retour. On peut également noter qu'à l'ouest, dans la zone inondable naturelle, il y a une gradation progressive de la surface inondée, alors qu'en zone urbaine les débordements apparaissent brutalement pour des périodes de retour élevées. Le seuil de débordement est variable selon le niveau de protection contre les crues mis en place au fil des années. En zone urbaine dense, il est normal que seules les inondations rares (période de retour supérieure à 50 ans) débordent.

La cartographie de l'aléa en fréquence et en intensité à grande échelle est possible grâce à la mise en œuvre cohérente d'une chaîne de modèles adaptés au contexte géographique étudié. La sélection d'événements de référence permet la simulation et la cartographie de crues dont la période de retour est homogène de l'amont à l'aval du bassin versant. La carte de l'aléa obtenue offre une description multi-fréquence des inondations. Elle est nécessaire pour le diagnostic intégré du risque.

La méthodologie qui est développée ici peut être appliquée à d'autres rivières de moyenne montagne, car les outils sont disponibles et les choix que nous avons faits ne sont pas spécifiques à l'étude de cas sur la Thur. Il serait toutefois intéressant de disposer d'une régionalisation de la méthode SHYPRE (en cours de développement au CEMAGREF) pour améliorer l'approche semi-spatialisée. De même, le tracé des profils en travers pourrait être assisté par un programme informatique appliquant les 6 règles simples que nous proposons.

La transposition de la méthodologie aux rivières de plaine nécessite une réflexion approfondie sur la prise en compte des volumes de crue dans la sélection des événements de référence. Les écoulements étant bidimensionnels, il faut utiliser une modélisation 1D maillée ou un modèle 2D.

Partie 3 :

Du diagnostic intégré à la prospective

3.1	DIAGNOSTIC INTEGRE DU RISQUE D'INONDATION	187
3.1.1	DEFINITION DU RISQUE ET METHODES D'ANALYSE	187
3.1.2	EVALUATION DU RISQUE A GRANDE ECHELLE	194
3.1.3	DIAGNOSTIC INTEGRE DU RISQUE	202
3.2	RENATURATION DES COURS D'EAU	210
3.2.1	PROSPECTIVE DE RENATURATION DE LA THUR	210
3.2.2	RIVIERE « VIRTUELLE » POUR LA GENERALISATION	215
3.2.3	LIMITES ET PERSPECTIVES	221
3.3	VERS UNE PROTECTION DURABLE CONTRE LES CRUES	230
3.3.1	ENDIGUEMENT GENERALISE D'UNE VALLEE	230
3.3.2	PROSPECTIVE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE	237
3.3.3	UNE NOUVELLE GESTION DU RISQUE : LA RESILIENCE	247

3) Du diagnostic intégré à la prospective

La cartographie de l'aléa en intensité et en fréquence permet d'envisager une analyse fine et spatialisée du risque d'inondation. Nous proposons également de prendre en compte les bénéfices écologiques offerts par les crues. Dans le premier chapitre, nous proposons un diagnostic intégré du risque appliqué à la vallée de la Thur (cf. chapitre 3.1). C'est un premier élément d'aide à la décision qui peut être complété par une approche prospective. Dans le second chapitre, nous mettons en valeur les potentialités et les contraintes de la renaturation des cours d'eau, dans un objectif de gestion intégrée (cf. chapitre 3.2). Dans le dernier chapitre, nous proposons un mode de gestion durable du risque tenant compte d'un éventuel changement climatique (cf. chapitre 3.3).

3.1 Diagnostic intégré du risque d'inondation

L'inondation ne constitue pas un risque à elle seule. C'est l'implantation d'activités humaines vulnérables en zone inondable qui crée le risque. Le diagnostic du risque d'inondation consiste à confronter l'aléa et la vulnérabilité de l'occupation du sol. Dans un premier temps, nous proposons de définir le risque et nous présentons différentes méthodes d'analyse (cf. § 3.1.1). Ensuite, nous appliquons les différentes méthodes d'analyse à la vallée de la Thur (cf. § 3.1.2). Les résultats obtenus sont finalement utilisés pour formuler le diagnostic intégré du risque d'inondation dans la vallée de la Thur (cf. § 3.1.3).

3.1.1 Définition du risque et méthodes d'analyse

Le risque n'est pas un élément tangible. Il résulte d'une prise de décision quant à l'acceptabilité d'une inondation plus ou moins récurrente. A partir d'une définition simple, on peut mener des approches très différentes qui valorisent la cartographie multi-fréquence obtenue par modélisation. Tout d'abord, nous rappelons la définition courante du risque d'inondation (cf. § 3.1.1.1). Ensuite, nous présentons trois approches différentes pour l'analyse du risque (cf. § 3.1.1.2). Enfin, nous évoquons l'importance de la concertation des acteurs pour l'analyse du risque (cf. § 3.1.1.3).

3.1.1.1 Définition du risque

La définition classique des risques naturels est bien adaptée à la description du risque d'inondation. L'analyse du risque se fonde sur la comparaison de l'aléa et de la vulnérabilité. Nous avons décrit en détail la cartographie de l'aléa (cf. partie 2), nous nous intéressons dorénavant plus à la vulnérabilité.

Croisement aléa / vulnérabilité

L'aléa est un phénomène naturel. Pour le risque d'inondation, il s'agit des débordements de la rivière. L'aléa est décrit en fréquence pour caractériser sa récurrence : plus l'aléa est récurrent, plus il est fort. En parallèle, on s'intéresse à la vulnérabilité de l'occupation du sol face à l'aléa. La vulnérabilité dépend du type d'aléa considéré. Dans le cas du risque d'inondation, on s'intéresse à la vulnérabilité des biens et des personnes face à la submersion. Lorsque l'aléa est inacceptable au regard de la vulnérabilité, il y a un risque potentiel : c'est le risque d'inondation (GILARD, 1998a) (figure 113). Par exemple, si une inondation de période de retour 5 ans submerge un lotissement, il y a un risque d'inondation. En effet, l'inondation d'une maison avec une période de retour aussi faible n'est pas acceptable.

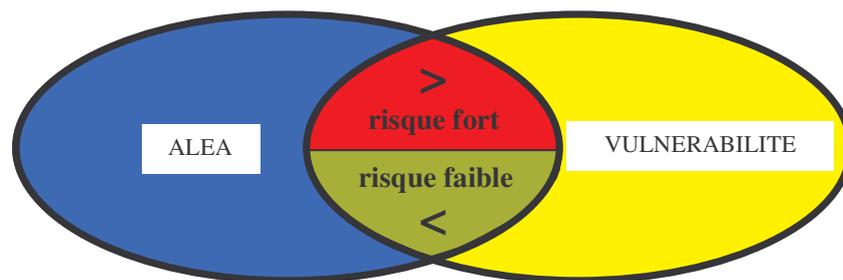


Figure 113 : définition du risque par comparaison de l'aléa et de la vulnérabilité

La comparaison de l'aléa et de la vulnérabilité est subjective, car les deux composantes du risque ne sont pas exprimées dans une même "unité". Ainsi, l'évaluation du risque peut toujours être discutée.

Niveau d'aléa et vulnérabilité

En ce qui concerne l'aléa, nous avons vu plus haut qu'il est en général caractérisé par sa fréquence. Par exemple, la crue décennale a une période de retour de 10 ans. On considère que cette crue est un aléa fort car sa probabilité d'occurrence est élevée. On peut par contre estimer que la crue bicentennale, dont la période de retour vaut 200 ans, est un aléa faible, car bien qu'étant violente, sa probabilité d'occurrence est faible. Le niveau d'aléa peut également intégrer d'autres caractéristiques de l'inondation, comme la hauteur d'eau ou la durée de submersion. Ainsi, pour une période de retour donnée, une inondation avec une hauteur d'eau inférieure à 20 cm et de courte durée peut être considérée comme un aléa faible. Alors qu'avec des hauteurs d'eau atteignant plus de 1 m, ou bien une durée de plusieurs jours, on peut considérer que c'est un aléa fort.

Pour définir la vulnérabilité, il faut observer la sensibilité de l'occupation du sol à l'inondation. Les prairies et les forêts alluviales ont une sensibilité faible à la submersion,

donc leur vulnérabilité est faible. *A contrario*, les constructions et les infrastructures de transport sont pour la plupart très sensibles à l'inondation, donc leur vulnérabilité est élevée. On peut aussi tenir compte de facteurs correctifs. Par exemple, certains matériaux sont moins sensibles à l'humidité que d'autres. De même, si le premier plancher habitable est surélevé, la maison est moins vulnérable aux inondations. Par contre, la présence d'un sous-sol rend la maison plus vulnérable.

On constate qu'il n'y a pas de définition objective du niveau d'aléa et de la vulnérabilité. L'évaluation du risque nécessite la concertation entre les acteurs (GILARD, 1998a). Il faut privilégier une approche simple aboutissant à un diagnostic équitable et proportionné.

Bénéfices écologiques

Nous avons vu dans la première partie (cf. § 1.2.2) que les inondations fréquentes contribuent à la dynamique des hydrosystèmes et à la protection de la ressource en eau. Il serait judicieux d'afficher ce bénéfice écologique sur le même plan que le risque d'inondation, afin de faire prendre conscience aux acteurs de la raréfaction des zones d'expansion de crue. On peut considérer que l'inondation des prairies et des forêts alluviales constitue non pas un risque, mais un « bénéfice écologique » dont l'expansion est à rechercher.

De même que pour le risque d'inondation, il ne s'agit pas d'imposer aux riverains une cartographie arbitraire, mais de proposer une analyse simplifiée pour l'aide à la décision. Les méthodes traditionnelles d'analyse du risque peuvent être adaptées pour produire un diagnostic intégré du risque d'inondation.

3.1.1.2 Méthodes d'analyse du risque

On distingue les approches qualitatives, dont nous avons présenté le fondement ci-dessus, des approches quantitatives. Ces dernières ont pour objectif de fournir une estimation économique des dommages potentiels. L'approche semi-quantitative est une étape intermédiaire de l'approche quantitative.

Approche qualitative

L'approche qualitative la plus simple, et la plus utilisée, consiste à comparer point par point le niveau d'aléa et le la vulnérabilité. La grille d'analyse est obtenue en croisant deux niveaux d'aléa et deux niveaux de vulnérabilité. On peut définir deux niveaux de risque : faible et fort (tableau 16).

	Vulnérabilité faible	Vulnérabilité forte
Aléa faible	Risque faible	Risque faible
Aléa fort	Risque faible	Risque fort

Tableau 16 : grille simple d'analyse du risque

Cette approche peut être suffisante pour proposer aux acteurs une vision synthétique de la situation dans laquelle se trouve leur territoire. Il reste cependant à définir ce qu'on entend par aléa fort et vulnérabilité forte. C'est principalement sur ce point que porteront les discussions.

Une approche qualitative plus évoluée est la méthode Inondabilité (GILARD, 1998a) développée par le Cemagref. Le principe de cette approche est de rapporter la comparaison de l'aléa et de la vulnérabilité à une grandeur commune : la période de retour. Pour chaque parcelle cadastrale, on compare la période de retour de la première crue inondante et la période de retour minimum acceptable (figure 114).

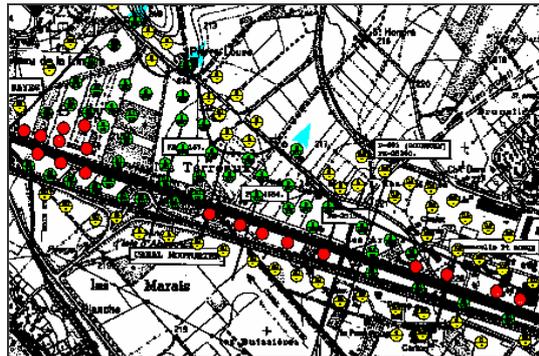


Figure 114 : exemple d'analyse du risque par la méthode Inondabilité (source Cemagref)

On identifie ainsi des parcelles sous protégées (en rouge) et des parcelles surprotégées (en vert). Les parcelles identifiées par un point jaune ne sont pas inondées. La difficulté de cette approche réside dans la détermination de la période de retour minimum acceptable, également appelée « objectif de protection ». Il va de soi qu'un riverain peut vouloir obtenir l'assurance d'un risque nul, mais cet objectif n'est pas raisonnable d'un point de vue technique et économique (le risque zéro a un coût infini). Les acteurs doivent être responsabilisés pour aboutir à un objectif de protection raisonnable. La concertation des acteurs autour des objectifs de protection est une phase très importante pour l'analyse du risque (GILARD et GENDREAU, 1998b).

Approche quantitative

D'un point de vue économique, la détermination de l'objectif de protection devrait passer par une analyse coût / bénéfice de la protection contre les inondations. Ainsi, certaines études visent à déterminer le coût moyen annuel des inondations pour un tronçon de cours d'eau. Le calcul du coût moyen annuel peut être réalisé à partir du coût de l'inondation C par la formule suivante (F est la fréquence) (TORTEROTOT, 1994) :

$$CMA = \int_0^1 C(F).dF$$

Une description plus complète est disponible en **Annexe 7**.

Le coût potentiel des dommages dus aux inondations est très difficile à établir car les impacts sont variés (TORTEROTOT, 1994). On distingue deux types de dommages :

- Les dommages intangibles sont ceux auxquels on ne peut pas attribuer de valeur économique. Par exemple les pertes de vies humaines, le traumatisme psychologique des victimes, la perte d'objets irremplaçables...
- Les dommages tangibles peuvent faire l'objet d'une estimation économique. On peut leur affecter une valeur monétaire : les dommages au bâti, aux véhicules, aux infrastructures...

L'approche quantitative du risque d'inondation porte sur les dommages tangibles, parmi lesquels on peut distinguer deux catégories :

- Les dommages directs qui sont liés à l'inondation du bien : dommages au bâti, aux appareils électriques, aux véhicules, aux chaussées...
- Les dommages indirects qui sont liés à l'impact de l'inondation à moyen terme : pertes d'exploitation, perte de valeur du bâti...

L'estimation de ces dommages est délicate, car elle dépend de nombreux facteurs comme la hauteur d'eau de l'inondation, la durée de la crue... Pour calculer le coût occasionné par chaque inondation de référence, on peut utiliser des courbes d'endommagement. Il en existe un grand nombre dans la littérature (synthèse bibliographique de TORTEROTOT, 1994).

Quelle que soit la méthode choisie, l'estimation quantitative du risque d'inondation est soumise à des incertitudes très importantes. En général, l'estimation des dommages ne tient compte que des dommages tangibles directs au bâti. Ceux-ci peuvent représenter moins de 50 % du coût total des inondations (BCEOM, 2000). Le coût moyen annuel doit être considéré comme une indication grossière de la charge financière que les inondations font peser sur la société.

Approche semi-quantitative

Lorsqu'on cherche à estimer quantitativement les dommages dus aux inondations, on est amené à recenser les biens exposés aux crues. Cette première étape de l'approche quantitative est intéressante, car elle comporte moins d'incertitudes que le calcul du coût des dommages. On s'intéresse simplement au nombre de foyer touchés ou à la superficie de zones industrielles et commerciales inondées.

Du point de vue de l'aide à la décision, un élu peut être sensible à cette approche. En effet, on ne met pas en avant le coût de l'inondation, mais plutôt l'impact de l'inondation sur la population. La réponse à apporter aux problèmes sera différente, car on ne recherchera pas un optimum économique, mais plutôt une égalité de traitement. L'approche semi-quantitative convient bien à la tradition de solidarité qui caractérise la gestion des risques en France.

Les différentes méthodes d'évaluation du risque d'inondation ont toutes leur raison d'être. Elles apportent une aide à la décision pour la mise en œuvre de mesures permettant de diminuer le risque. La mise au point d'une grille d'analyse du risque est incontournable pour proposer un diagnostic intégré et concerté du risque.

3.1.1.3 Concertation des acteurs

La manipulation des probabilités n'est pas une chose aisée pour le grand public (GENDREAU et al., 2003). Il est utile qu'un expert accompagne les acteurs pendant la concertation, afin d'expliquer les notions abstraites de l'estimation du risque d'inondation (GILARD et GENDREAU, 1998b). Les décideurs valident la grille d'analyse du risque qui sert de base à l'approche qualitative.

Proposition des experts

La caractérisation de l'aléa est souvent basée sur l'unique critère de période de retour du débit de pointe. On considère que cette variable est caractéristique de l'ampleur de la crue et donc des dégâts qu'elle occasionne. Cependant, il existe des méthodes d'analyse beaucoup plus complexes. Par exemple, pour les inondations de plaine, on peut tenir compte de la vitesse et de la durée de submersion (STEPHENSON, 2002). Les Plans de Prévention des Risques utilisent comme événement de référence les plus hautes eaux connues ou la crue centennale si celle-ci est plus forte. La période de retour centennale (100 ans) est à rapprocher de l'espérance de vie humaine. On considère qu'une personne a peu de chance de voir plus d'un événement centennal au cours de sa vie, ce qui est acceptable. Pour plus de progressivité dans la caractérisation de l'aléa, nous proposons de définir trois niveaux d'aléa :

- Aléa faible pour les crues de périodes de retour supérieures à 100 ans
- Aléa moyen pour les crues de périodes de retour comprises entre 50 et 100 ans
- Aléa fort pour les crues de périodes de retour inférieures à 50 ans

La vulnérabilité aux crues peut être décrite de manière simplifiée en considérant que toute construction ou toute infrastructure est sensible aux inondations. Cette approche peut sembler approximative, mais dans les faits, peu de constructions sont conçues pour supporter des hauteurs d'eau de plus d'une vingtaine de centimètres. La question est plus délicate en ce qui concerne l'agriculture. En effet, les prairies ne sont pas trop sensibles aux crues, mais les cultures sont vulnérables. Nous proposons un niveau de vulnérabilité spécifique pour les zones de culture, même si elles sont peu présentes dans les vallées de moyenne montagne. Ces terrains ne devront pas nécessairement être protégés. On pourra envisager l'indemnisation des exploitants pour mettre en place une occupation du sol adaptée aux inondations, comme les prairies naturelles. Nous proposons de distinguer trois classes de vulnérabilité :

- Vulnérabilité faible pour les prairies et les forêts
- Vulnérabilité moyenne pour les cultures
- Vulnérabilité forte pour les constructions et les infrastructures

La grille d'analyse du risque définit un niveau de risque pour chaque combinaison d'un niveau d'aléa et d'un niveau de vulnérabilité (tableau 17). Elle est proposée aux acteurs par un expert du risque d'inondation.

	Vulnérabilité faible	Vulnérabilité moyenne	Vulnérabilité forte
Aléa faible T > 100 ans	Risque faible	Risque faible	Risque faible
Aléa moyen 50 < T ≤ 100 ans	Risque faible	Risque faible	Risque moyen
Aléa fort T ≤ 50 ans	Bénéfice écologique	Risque moyen	Risque fort

Tableau 17 : grille d'analyse du risque proposée par l'expert

Le risque fort correspond à des crues fréquentes touchant des constructions ou des infrastructures. Nous avons introduit une situation de « bénéfice écologique » pour identifier les zones naturelles (prairies et forêts) inondables pour des crues fréquentes. Ce sont des zones pour lesquelles les crues sont propices au bon fonctionnement écologique des écosystèmes. Elles doivent être sauvegardées, voire étendues. La grille d'analyse du risque est proposée aux acteurs de terrain.

Validation par les acteurs

Le diagnostic du risque doit être conçu comme un outil d'information pour les riverains et les décideurs. Ce n'est pas un outil réglementaire. Les acteurs doivent être impliqués très tôt dans la définition du risque. Il est essentiel que la grille d'analyse du risque soit validée par les acteurs avant la présentation des cartes de risque. En effet, il est préférable de fixer les critères d'évaluation du risque hors contexte géographique. Ainsi, on évite les conflits d'intérêts et on arrive plus sereinement à une cartographie objective du risque.

Dans le cas de la vallée de la Thur, nous avons travaillé en partenariat avec le Conseil Général du Haut-Rhin qui est membre des syndicats de rivières. Nous avons rencontré les différents syndicats de rivières de la Thur et la grille d'analyse du risque proposée ci-dessus a été bien accueillie. Les acteurs de la vallée de la Thur sont familiarisés avec les approches de risque d'inondation et ils sont conscients de la dangerosité de la Thur en crue.

Le risque de rupture d'ouvrages

Parmi les incertitudes qui portent sur l'estimation du risque d'inondation, il y a la fiabilité des ouvrages de protection contre les crues. Dans le cadre du PPR de la Thur, les zones situées à moins de 50 m à l'arrière des digues ont fait l'objet d'une réglementation très stricte (inconstructibilité et réglementation sur les modifications du bâti). Nous n'avons pas tenu compte du risque de rupture de digues, car la probabilité de la rupture et l'inondation occasionnée sont difficiles à modéliser (TORTEROTOT, 1994). Nous considérons que la rupture de digue constitue un aléa faible, au même titre qu'une crue bicentennale. On peut profiter du diagnostic du risque pour rappeler aux riverains que les digues ne représentent pas une sécurité absolue. Elles réclament une surveillance et un entretien soignés.

Le diagnostic du risque d'inondation peut s'appuyer sur une approche qualitative ou quantitative. Il a pour but l'information des riverains et l'aide à la décision en faveur d'une gestion intégrée des inondations. L'évaluation du risque doit être formalisée par l'intermédiaire d'une grille d'analyse. Cette dernière est proposée par un expert, mais elle doit être validée par les acteurs de terrain. L'expert peut ensuite proposer une cartographie objective du risque d'inondation à l'échelle du bassin versant.

3.1.2 Evaluation du risque à grande échelle

Les SIG (Systèmes d'Information Géographique) sont couramment utilisés pour produire des analyses spatiales. Ils facilitent l'évaluation du risque d'inondation à partir de cartes d'aléa et de vulnérabilité. Nous avons appliqué les trois méthodes d'évaluation du risque à la vallée de la Thur. Nous présentons successivement la mise en œuvre et les résultats de l'approche qualitative (cf. § 3.1.2.1), de l'approche semi-quantitative (cf. § 3.1.2.2) et de l'approche quantitative (cf. § 3.1.2.3).

3.1.2.1 Approche qualitative

Pour proposer une analyse qualitative du risque, il faut comparer en tout point de l'espace le niveau d'aléa et la vulnérabilité sur la base d'une grille d'analyse du risque (cf. § 3.1.1.3). Pour la description de l'aléa, on dispose de la cartographie des 8 événements de référence. Il faut également cartographier la vulnérabilité.

Cartographie de la vulnérabilité

La vulnérabilité dépend de l'occupation du sol. Nous avons donc dans un premier temps cherché à valoriser les cartes d'occupation du sol existantes. Le moyen le plus accessible pour une cartographie à grande échelle est la télédétection. Les images satellites permettent de décrire l'occupation du sol d'une vallée entière.

Nous avons utilisé la couverture PRATIS (Partenariat Régional pour l'Acquisition et le Traitement d'Images Spatiales) disponible sur le département du Haut-Rhin. Cette cartographie de l'occupation du sol a été réalisée à l'aide d'images SPOT par le Service Régional de Traitement d'Images et de Télédétection. L'occupation du sol est décrite en 9 classes (tableau 18 et figure 115).

Les trois premières classes (10, 20 et 30) constituent une occupation du sol à vulnérabilité forte. Les cultures (classe 80), les espaces verts urbains et les équipements sportifs (classe 40) constituent une occupation du sol à vulnérabilité moyenne. Toutes les autres classes d'occupation du sol présentent une vulnérabilité faible. L'approche qualitative du risque se base sur cette description de la vulnérabilité.

Code	Classes PRATIS	Classes BD OCS
10	Bâti continu	Tissu urbain continu
20	Bâti discontinu	Tissu urbain discontinu
30	Grandes emprises	Emprises industrielles et commerciales Emprises portuaires Extraction de matériaux Réseaux de communication Aéroports Chantiers Stations de traitement de l'eau Exploitations agricoles Espaces urbains spécialisés Friches industrielles Serres
40	Végétation en milieu urbain	Espaces verts urbains Equipements sportifs Châteaux Sols nus en milieu urbain Friches urbaines Autres jardins
50	Surfaces minérales hors urbanisation	-
60	Végétation dense	Forêts de feuillus Forêts de résineux Forêts mixtes Bosquets Plantations timbre-poste Ripisylve
70	Végétation marquée	Prairies Vignes Vergers Roselières Friches humides
80	Végétation discontinue	Cultures annuelles Coupes Pelouses Friches sèches Landes Roches nues
90	Hydrographie	Cours d'eau Canaux Étangs Bassins artificiels

Tableau 18 : nomenclature de la cartographie PRATIS

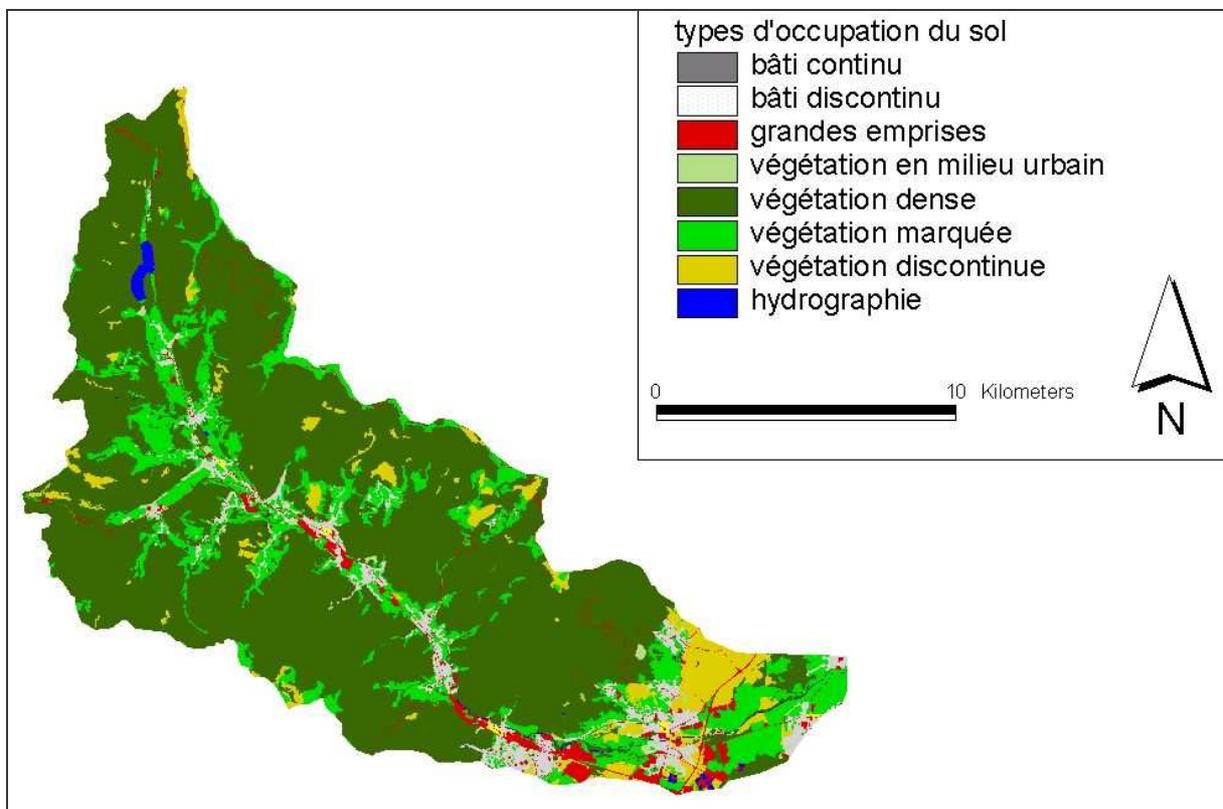


Figure 115 : cartographie de l'occupation du sol de la vallée de la Thur (source PRATIS)

Cartographie du risque à grande échelle

A l'aide du système d'information géographique, on peut comparer la cartographie de l'aléa et la cartographie de la vulnérabilité. On applique objectivement, point par point, la grille d'analyse du risque validée par les acteurs de terrain. On détermine ainsi le niveau de risque en tout point du bassin versant (figure 116). La cartographie pour l'ensemble de la vallée est présentée en **Annexe 5**.

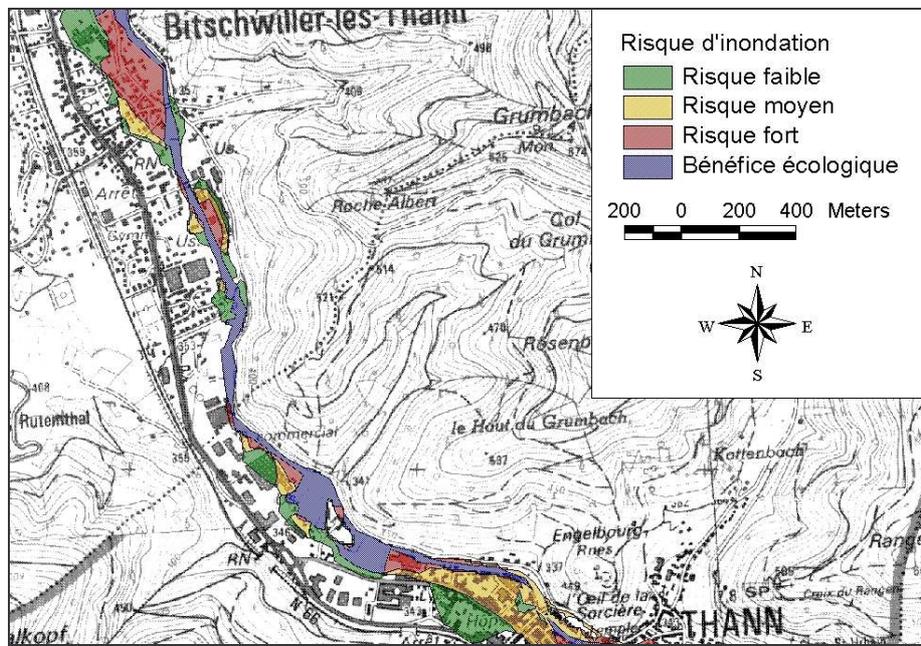


Figure 116 : cartographie du risque à grande échelle

La cartographie qualitative du risque permet de mettre en évidence les zones les plus exposées à l'échelle de la vallée entière. L'approche qualitative permet de définir des zones d'intervention prioritaires pour la protection des personnes et des biens. Sur la carte ci-dessus on constate que les communes de Thann et Bitschwiller-lès-Thann sont soumises à un risque d'inondation moyen à fort. Cette situation est socialement inacceptable.

Limites de l'approche qualitative

La résolution de la cartographie de l'occupation du sol est moins bonne (12 m) que celle des cartes d'aléa (2 m). Il y a donc une imprécision assez importante sur le contour des zones à risque fort. Par ailleurs, on identifie bien l'étendue spatiale du risque, mais on ne peut pas savoir directement si la zone touchée est densément urbanisée ou non. On ne peut pas non plus identifier le type d'occupation du sol (résidentiel, activités économiques...).

Cette cartographie est également très sensible à la grille d'analyse du risque validée par les acteurs. En effet, si on prend l'exemple de la ville de Thann, une partie du centre ville est inondée dès la crue cinquantennale, mais pas pour une crue décennale. Si on avait défini l'aléa fort comme une crue de période de retour inférieure à 10 ans, il n'y aurait pas de zone à risque fort. L'approche qualitative étant basée sur une description synthétique de l'aléa en 3 classes, elle est très sensible aux effets de seuil. Une approche semi-quantitative permet d'améliorer la description du risque d'inondation.

3.1.2.2 Approche semi-quantitative

L'objectif d'une approche semi-quantitative n'est pas d'évaluer le coût des dommages dus aux inondations, mais de recenser les désordres potentiels. Cette approche nécessite une description fine des enjeux.

Description fine des enjeux

La cartographie fine des enjeux peut se limiter à l'extension géographique de la crue étudiée la plus forte. Cependant, il est important de recenser les installations dangereuses en bordure. Dans le cas de la vallée de la Thur, nous avons limité l'étendue de la cartographie fine des enjeux à l'enveloppe de la crue bicentennale. Nous avons porté une attention particulière au pôle chimique de Thann et à certaines usines en bordure de la zone d'étude.

Nous distinguons trois types d'enjeux représentés de manière spécifique :

- L'habitat individuel, de type lotissement, se prête bien à une description ponctuelle. On utilise le modèle numérique de terrain à haute résolution pour identifier chaque maison par un point (figure 117).

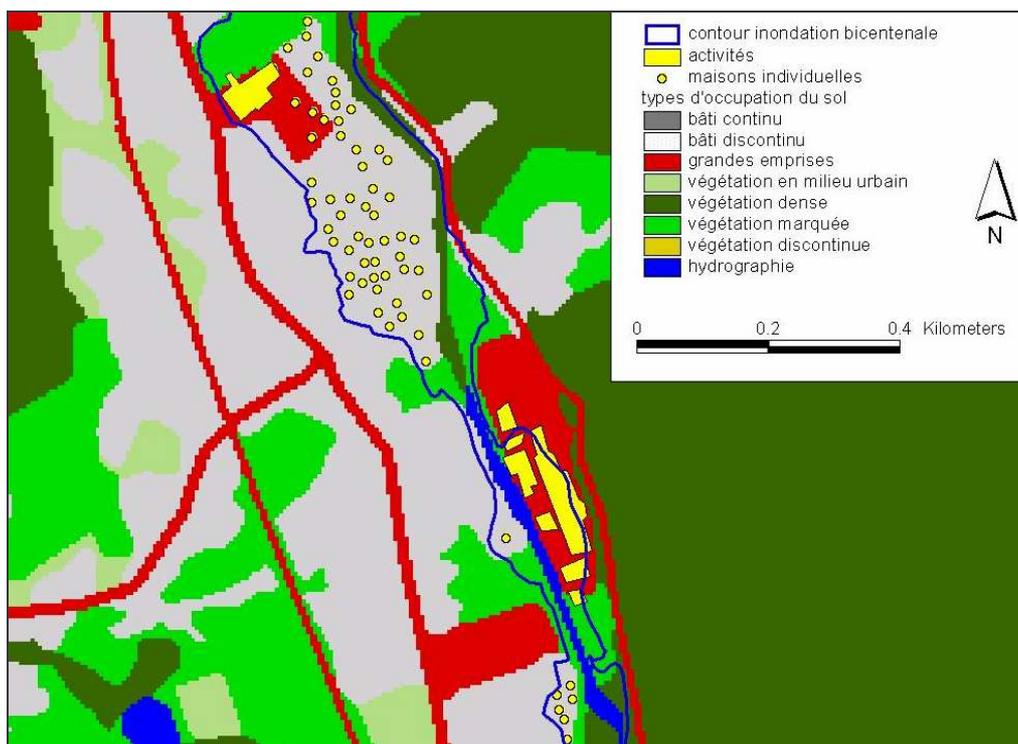


Figure 117 : cartographie fine de la vulnérabilité en habitat dispersé

- Les grands ensembles industriels et commerciaux peuvent être repérés facilement sur le MNT à haute résolution. Chaque grande emprise industrielle ou commerciale est représentée sous forme d'un polygone (figure 118).
- En milieu urbain, les maisons sont collées les unes aux autres. Il est difficile de les décrire ponctuellement. Nous avons donc choisi de représenter chaque pâté de maison par un polygone (figure 118).

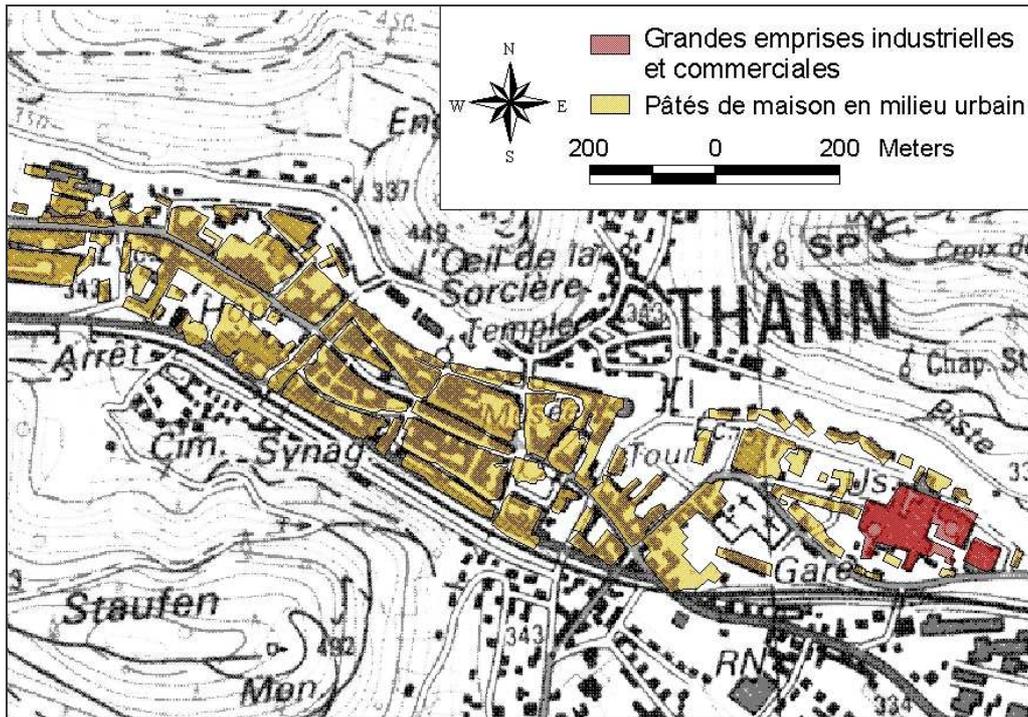


Figure 118 : cartographie fine de la vulnérabilité en milieu urbain

L'utilisation du MNT à haute résolution permet de localiser rapidement et avec précision les enjeux menacés par les crues. Le recensement des désordres est différent selon le type de description de la vulnérabilité. Les bénéfices écologiques peuvent être évalués plus précisément.

Recensement des désordres potentiels

Dans le cas de l'habitat individuel, on peut identifier pour chaque maison la période de retour de la première crue inondante. On obtient alors une cartographie beaucoup plus fine du risque, notamment en terme de fréquence de submersion (figure 119).

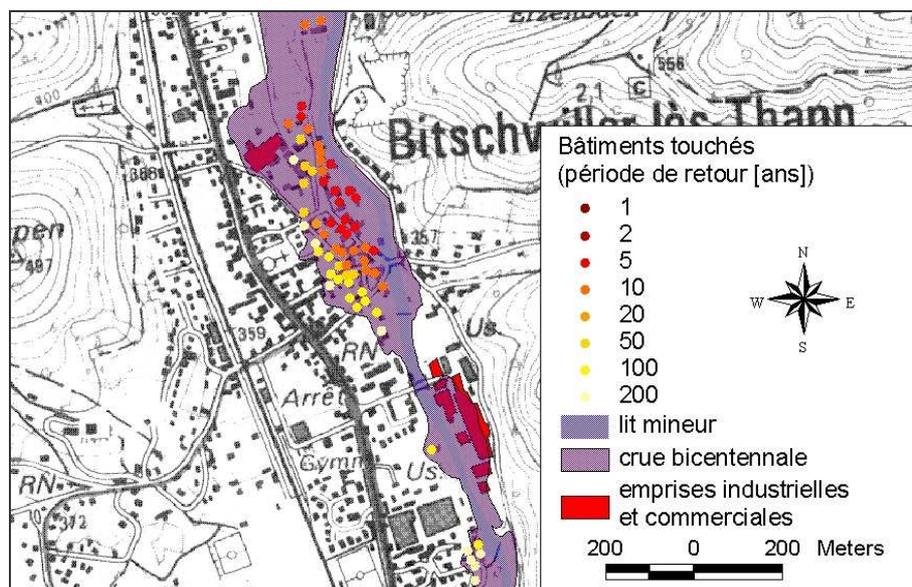


Figure 119 : approche semi-quantitative du risque

En créant un dégradé de couleur, on visualise d'un seul coup d'œil les riverains les plus exposés. On prend ainsi mieux conscience du nombre de foyers confrontés au risque d'inondation. La cartographie pour l'ensemble de la vallée est présentée en **Annexe 6**.

Pour chaque événement de référence, on peut dénombrer le nombre d'habitations individuelles touchées, ainsi que la superficie des zones industrielles ou commerciales inondées (tableau 19).

Période de retour [ans]	Nombre d'habitations touchées	Superficie de zones industrielles ou commerciales [m ²]	Superficie centre ville de Thann [m ²]
1	0	0	0
2	0	0	0
5	14	0	0
10	75	6540	1375
20	90	10180	4036
50	167	28556	37902
100	304	88489	58926
200	552	214943	84789

Tableau 19 : recensement des désordres potentiels dus aux inondations

L'approche semi-quantitative permet de sensibiliser les acteurs à l'ampleur du risque auquel ils sont confrontés, sans pour autant affecter une valeur économique aux dommages. La description du risque est précise, car on peut suivre l'évolution du nombre de riverains touchés en fonction de la période de retour. L'approche semi-quantitative est moins synthétique que l'approche qualitative, mais elle est plus objective.

Bénéfices écologiques

Les inondations représentent un bénéfice écologique lorsqu'elles inondent des zones naturelles ou des prairies avec une fréquence élevée. A l'aide du SIG, on peut évaluer les superficies de prairies et de forêts alluviales inondées pour chaque période de retour (tableau 20).

Période de retour [ans]	Superficie de prairies et de forêts alluviales inondées [ha]
1	61
2	78
5	98
10	167
20	187
50	236
100	277
200	324

Tableau 20 : superficies de prairies et de forêts alluviales inondées

Les superficies inondées par les crues fréquentes (période de retour inférieure à 10 ans) sont faibles. Si on les rapportent à la longueur du tronçon étudié (30 km), la largeur moyenne de l'inondation est inférieure à 50 m ce qui est très peu. Le calcul de la superficie des zones naturelles inondées permet d'estimer la dégradation du fonctionnement naturel du cours d'eau en crue.

L'approche semi-quantitative du risque d'inondation offre un panorama assez détaillé du risque d'inondation. Les informations obtenues par cette approche sont plus objectives que la cartographie qualitative du risque, mais leur interprétation plus délicate (cf. 3.1.3).

3.1.2.3 Approche quantitative

Les ouvrages de protection contre les inondations représentent un investissement important. Il est légitime de se poser la question de la « rentabilité » économique de ces aménagements. Pour calculer cette rentabilité, il faut pouvoir estimer le coût potentiel des dommages dus aux inondations (BRETON et MARCHE, 2001). Nous avons vu plus haut que ces coûts sont tributaires d'un grand nombre de facteurs et que les incertitudes sont nombreuses. On peut néanmoins proposer une approche simple sur la base de dires d'experts. Les résultats obtenus fournissent un ordre de grandeur du coût économique des dommages à l'échelle du bassin versant.

Estimations de coûts par les experts

En principe, les estimations de coûts de dommages utilisent des courbes d'endommagement. Ces dernières associent un coût à une hauteur d'eau et une durée de submersion (TORTEROTOT, 1994). Pour les rivières de moyenne montagne, la durée de submersion est toujours courte. Nous ne tenons donc pas compte de ce facteur. La hauteur d'eau moyenne de l'inondation est un facteur important. Les experts des assurances définissent un seuil de 20 cm pour distinguer une inondation qui touche uniquement le sous-sol, d'une inondation qui touche le premier plancher habitable.

Pour l'**habitat individuel**, nous avons obtenu ces estimations :

- Hauteur d'eau **inférieure à 20 cm : 3 000 €**
- Hauteur d'eau **supérieure à 20 cm : 25 000 €**

Les coûts pour les zones d'activités industrielles et commerciales sont plus difficiles à estimer car ils dépendent du type d'activité, des stocks... Un expert nous a donné une estimation forfaitaire de **150 €/m²**.

Nous avons utilisé la même estimation pour l'habitat urbain. Pour un immeuble ayant une emprise au sol de 150 m² le coût total est comparable à celui utilisé pour l'habitat individuel.

L'imprécision des estimations de coûts est importante. Cependant, lorsqu'on réalise une étude à l'échelle d'un bassin versant, le grand nombre de biens touchés compense en partie les erreurs d'estimation.

Coût moyen annuel des dommages estimés pour la vallée de la Thur

Nous avons recensé pour chaque crue le nombre d'habitations individuelles touchées par des hauteurs d'eau inférieures et supérieures à 20 cm (tableau 21). Nous avons également calculé la superficie de zones industrielles et commerciales touchées pour chaque événement de référence. Le centre ville de Thann est traité spécifiquement.

Période de retour [ans]	Nombre d'habitations touchées H < 20 cm	Nombre d'habitations touchées H > 20 cm	Superficie de zones industrielles ou commerciales [m ²]	Superficie centre ville de Thann [m ²]
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
5	3	11	0	0
10	24	51	6540	1375
20	16	74	10180	4036
50	24	143	28556	37902
100	29	275	88489	58926
200	49	503	214943	84789
Coût Moyen Annuel CMA	≈ 470 000 €/an		≈ 610 000 €/an	≈ 325 000 €/an

Tableau 21 : recensement des dommages et calcul du coût moyen annuel

Bien qu'ils soient entachés d'une incertitude importante, ces coûts constituent une information intéressante qui peut participer à l'aide à la décision. La relative rareté des inondations occasionnant des dommages fait perdre de vue le coût qu'elles font supporter à la société. Le calcul du coût moyen annuel permet de rendre plus tangible cette réalité. Il faut cependant être conscient des limites d'une telle approche.

Limites de l'approche quantitative

Les coûts affichés ci-dessus sont donnés pour l'ensemble du domaine d'étude qui couvre plus de 30 km de cours d'eau. Ils ne tiennent compte que d'une partie des dommages tangibles directs. Dans la réalité, le coût global peut être beaucoup plus élevé, surtout si on tient compte des pertes d'exploitation. Certains experts estiment qu'il faudrait doubler le CMA pour obtenir un chiffrage plus réaliste.

Pour qu'elle soit rigoureuse, l'estimation des coûts devrait faire l'objet d'une validation à partir de l'observation des coûts des inondations historiques de 1990 et 1983. Il est très difficile d'obtenir ces informations. On sait par exemple que les seuls dommages aux équipements publics de la crue de 1990 se sont montés à plus de 26 millions de francs (≈ 4 M€) pour la vallée de la Thur. L'ordre de grandeur des estimations réalisées ci-dessus semble réaliste au regard de cette information partielle.

Le coût des inondations dépend beaucoup de facteurs externes, comme la réactivité des riverains ou l'efficacité du système d'annonce des crues. Les dommages observés sur certaines crues peuvent varier du simple au double en fonction de la culture du risque des habitants. Les solutions à apporter aux problèmes d'inondations ne sont pas uniquement structurelles. L'information du public et le développement d'un système d'alerte efficace font partie des travaux à engager.

Le calcul du coût moyen annuel des dommages fait perdre de vue le traumatisme psychologique que représente une inondation. Une approche économique rationnelle est intéressante, mais ce n'est peut-être pas la meilleure façon d'aborder le problème des inondations (GILARD et GENDREAU, 1998b). Il appartient aux responsables politiques de définir ce qui relève du raisonnement économique et ce qui relève de la solidarité territoriale, voire nationale.

Il est pour l'instant difficile de quantifier économiquement le bénéfice écologique apporté par les inondations en terme de qualité de la ressource en eau et de biodiversité (TURNER et al., 2000). L'approche quantitative ne permet pas de tenir compte des aspects bénéfiques des inondations.

L'évaluation spatialisée du risque d'inondation peut faire appel à trois approches différentes, mais complémentaires. Elles favorisent l'émergence d'un diagnostic intégrant des facteurs humains, économiques et écologiques. L'approche semi-quantitative semble la plus objective et la plus riche pour une analyse approfondie du risque d'inondation.

Les résultats qui sont communiqués aux citoyens pour les informer sur le risque d'inondation doivent être choisis soigneusement, afin d'éviter une interprétation erronée. Les élus devraient participer à l'information sur le risque d'inondation, pour matérialiser leur implication dans la gestion des crues.

3.1.3 Diagnostic intégré du risque

Les différentes approches que nous avons menées pour évaluer le risque d'inondation fournissent une information spatiale riche. Les différentes cartes permettent de mieux comprendre la problématique du risque d'inondation sur le territoire étudié. Le diagnostic que nous proposons est intégré, car il tient compte de l'hydrosystème dans son ensemble. Nous essayons également de retracer l'évolution historique du bassin versant pour expliquer la situation actuelle. Nous montrons tout d'abord que le risque présente une variabilité spatiale marquée (cf. § 3.1.3.1). Ensuite, nous décrivons les effets de seuil observés dans la vallée de la Thur (cf. § 3.1.3.2). Enfin, nous faisons le bilan sur la fonctionnalité des zones inondables (cf. § 3.1.3.3).

3.1.3.1 Variabilité spatiale

On peut faire appel à l'approche qualitative pour décrire la répartition spatiale du risque. Les cartes issues de l'analyse qualitative du risque permettent d'identifier rapidement les zones où le risque d'inondation est concentré. Le contraste entre la haute vallée et la basse vallée est marqué, tant du point de vue du risque que du point de vue du fonctionnement écologique.

Risque localisé

Les trois niveaux de risque (faible – moyen – fort) choisis pour la cartographie qualitative du risque offrent une vision synthétique du risque d'inondation à l'échelle d'une vallée entière. On remarque que certaines communes concentrent le risque du fait d'un aléa plus fort, d'une urbanisation mal contrôlée ou encore d'une situation géographique défavorable. Les ouvrages de protection en place sont sous dimensionnés. Ils ne répondent plus aux objectifs de protection actuels.

L'exemple le plus inquiétant dans la vallée de la Thur est la situation des communes de Thann et Bitschwiller-lès-Thann (figure 120). Dans les deux cas, l'étroitesse du fond de vallée et la pression foncière expliquent l'urbanisation dense au plus près de la rivière. Le lit mineur est enserré entre des digues et des murs qui ne sont pas assez hauts pour faire face à une crue centennale. Les ponts sont trop bas ce qui accentue le risque à leur abord.

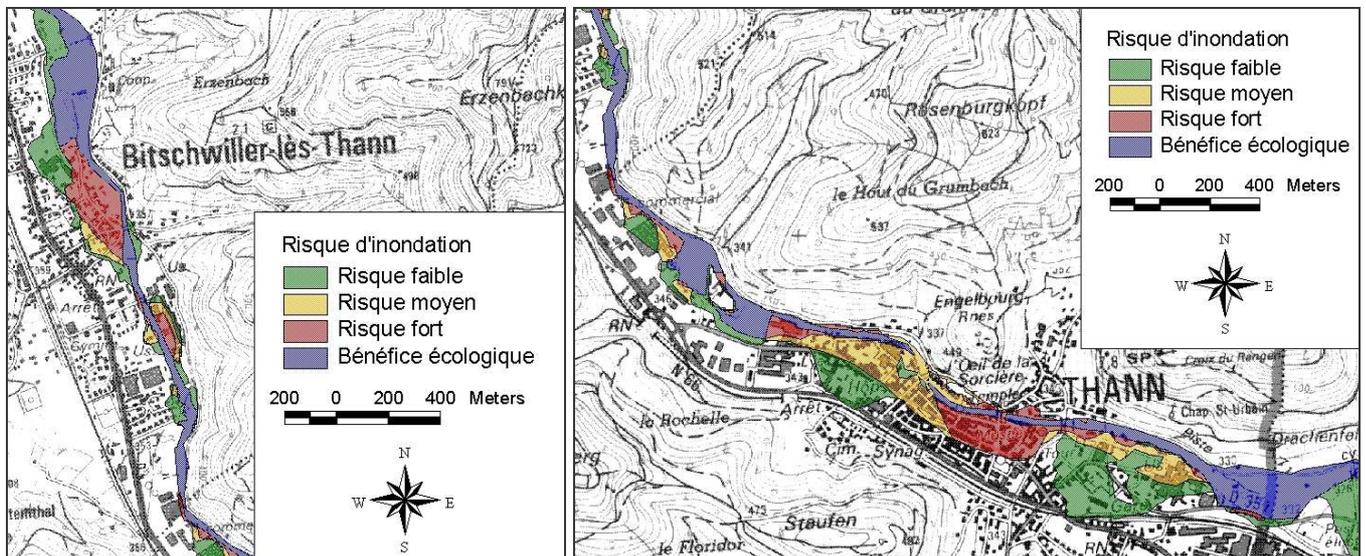


Figure 120 : risque d'inondation localisé à Bitschwiller-lès-Thann et Thann

L'identification des communes concentrant un risque important est utile pour planifier les projets de protection. En effet, la protection de ces communes est prioritaire, car beaucoup de riverains sont menacés. La protection peut être envisagée de manière localisée, donc peu coûteuse par rapport aux enjeux menacés. Les cartes de risque sont également utiles pour cibler l'information du public. Elles permettent d'identifier les secteurs pour lesquels des actions préventives doivent être engagées au plus vite.

Risque diffus

L'approche semi-quantitative du risque permet d'identifier ponctuellement le risque affectant les enjeux de faible emprise (habitat individuel). On constate ainsi que certaines constructions isolées se trouvent être menacées par des crues fréquentes. Elles sont donc en situation de risque fort (figure 121 : rive gauche à Saint-Amarin et rive droite à Moosch). Ces situations à risque peuvent avoir des causes multiples, mais le plus souvent il s'agit d'une mauvaise maîtrise de l'urbanisation. Parfois, ce sont des constructions anciennes, situées au bord de l'eau pour des raisons autrefois légitimes (scieries, moulins...).

Dans la vallée de la Thur, il y a un nombre important de constructions riveraines qui sont menacées par un aléa fort. Ces habitations sont pour partie des constructions récentes. Elles ont été établies en bordure du lit majeur. Certaines constructions se sont adaptées aux crues à l'aide de protection rapprochées privées (murets, merlons de terre). Les constructions les plus récentes sont implantées sur des buttes de terre assez hautes, avec une protection en enrochements autour du sous-sol.

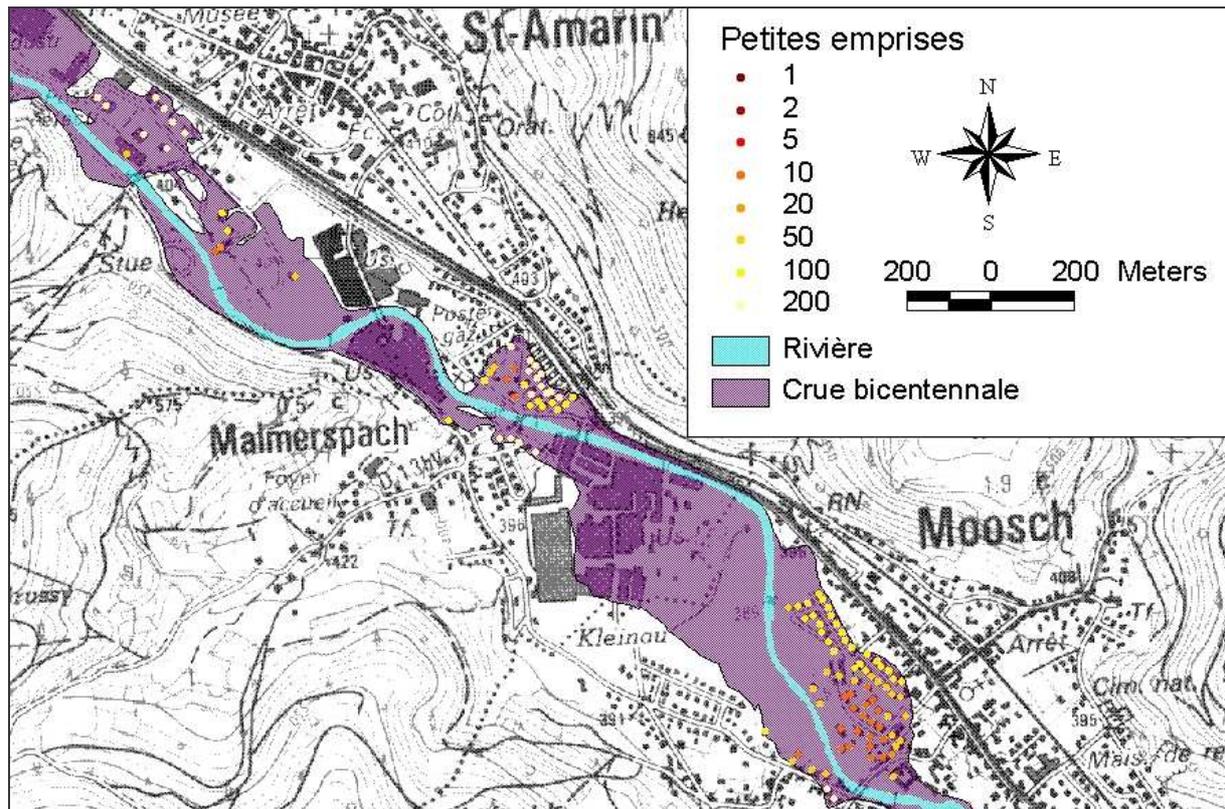


Figure 121 : risque diffus dans les communes de Saint-Amarin et Moosch

La protection des enjeux isolés doit être étudiée au cas par cas, mais le plus souvent on préconisera une protection rapprochée (digues ou murs au plus près de la construction). Le but est de soustraire aussi peu de zone inondable que possible. Certaines situations à risque très fort peuvent demander un arbitrage entre une protection coûteuse et l'expropriation du bien. Cette mesure est prévue par la loi Barnier quand on ne peut pas garantir la sécurité des habitants ou bien lorsque le coût de protection est plus élevé que la valeur vénale du bien.

Contraste amont / aval marqué

Le développement économique des vallées de moyenne montagne s'est souvent concentré à l'aval, pour faciliter les échanges économiques avec la plaine. Avec l'abandon de la force motrice hydraulique, les scieries et les usines textiles des hautes vallées ont progressivement disparues. Les activités industrielles et commerciales se sont concentrées dans les basses vallées ou ont été délocalisées. Il résulte de cette mutation économique un déséquilibre dans la répartition de la population. On retrouve ce déséquilibre dans la cartographie du risque.

Dans la vallée de la Thur, on observe un contraste marqué entre l'amont et l'aval. Les zones à risque sont plus nombreuses à l'aval du fait d'une urbanisation très dense. A l'inverse, les zones présentant un fonctionnement écologique satisfaisant sont majoritairement recensées à l'amont, car il subsiste des prairies naturelles (figure 122). On peut toutefois noter l'existence d'une forêt alluviale à la dynamique naturelle préservée, entre Thann et Cernay. La sauvegarde de cet espace a été assurée par le Conseil Général du Haut-Rhin.

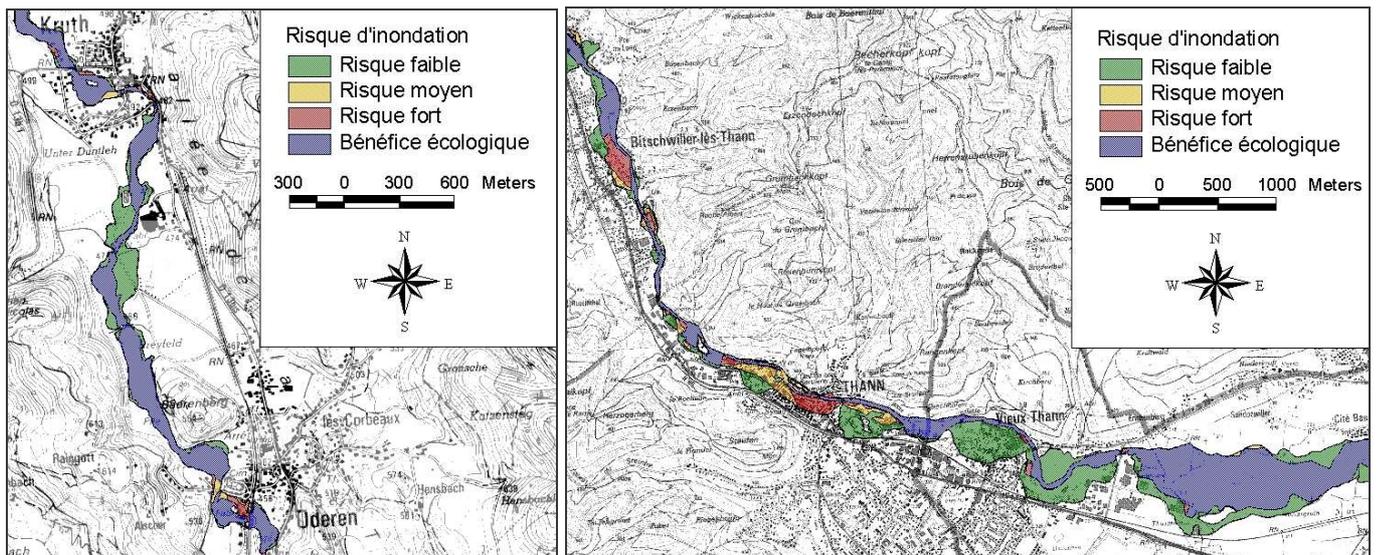


Figure 122 : contraste amont (Oderen) aval (Thann) dans la répartition du risque

La gestion intégrée du risque d'inondation doit veiller à la protection des enjeux existants, mais aussi à la sauvegarde des dernières prairies et forêts alluviales. Les communes situées dans la partie amont de la vallée doivent prendre conscience de la richesse de leur environnement. Il faut les aider à trouver un juste équilibre entre développement économique et protection des milieux naturels.

3.1.3.2 Effets de seuil

L'approche semi-quantitative permet de distinguer, dans une même zone à risque, les enjeux menacés pour différentes périodes de retour. Ainsi, dans une zone à risque fort on peut trouver des maisons qui sont inondables dès la crue décennale et d'autres qui ne sont inondables qu'à partir d'une crue cinquantennale. Cette disparité est liée à la topographie du terrain, mais aussi aux ouvrages de protection existants.

L'inondation du lit majeur d'une rivière intervient dès lors que la ligne d'eau dépasse la cote de la berge la plus basse, ou bien la cote de la digue ou du mur le plus bas. Il existe donc un débit seuil à partir duquel le lit majeur est inondé. Si ce débit seuil correspond au débit de pointe de période de retour 200 ans, le cours d'eau déborde très rarement et le risque pour les constructions riveraines est faible. En l'absence de murs ou de digues de protection, les débordements peuvent être beaucoup plus fréquents. Par exemple, si le débit seuil de débordement correspond au débit de pointe décennal, les constructions riveraines présentent un risque d'inondation fort.

La Thur est un cours d'eau très aménagé. Il y a peu de tronçons qui n'aient été modifiés au cours des siècles. On ne peut pas comprendre la répartition du risque d'inondation sans se pencher sur les modifications morphologiques profondes que le cours d'eau a subies par le passé. La géomorphologie fluviale est une discipline indispensable pour développer la gestion intégrée du risque d'inondation (BRAVARD et PETIT, 1997).

Rectification et recalibrage

Le tracé des rivières a été modifié par les riverains afin de libérer de l'espace pour développer les activités économiques des vallées. La rectification a permis de transformer les anciens lits à tresses ou à méandres en tronçons rectilignes. Ces rectifications ont souvent été accompagnées d'un recalibrage plus ou moins volontaire. En effet, la rectification ayant entraîné une diminution de la longueur des cours d'eau, la pente moyenne du lit mineur a augmenté significativement. Cela a eu pour conséquence directe une érosion régressive qui a conduit à l'enfoncement du lit mineur (incision) et à l'effondrement des berges (BRAVARD et PETIT, 1997). Pour corriger ce déséquilibre et exploiter la force hydraulique, les riverains ont construit des seuils artificiels. Pour éviter l'érosion des berges, des enrochements et des murs ont été édifiés. Ils offrent une large section d'écoulement au cours d'eau. Tous ces aménagements ont eu pour conséquence une augmentation significative du débit à plein bord. Les crues débordantes sont donc plus rares qu'elles ne l'étaient auparavant (STOVER et MONTGOMERY, 2000).

Dans la vallée de la Thur, du fait de l'incision du lit mineur et de sa trop grande section, on observe très peu de débordements pour les crues de période de retour inférieure à 10 ans. Ce constat est à nuancer au droit des seuils. En effet, pour augmenter la charge hydraulique, les aménageurs ont surélevé les crêtes des seuils (communication personnelle de G. WALTER). Cela explique pourquoi on observe localement une pente plus faible (figure 123) et des débordements plus fréquents.

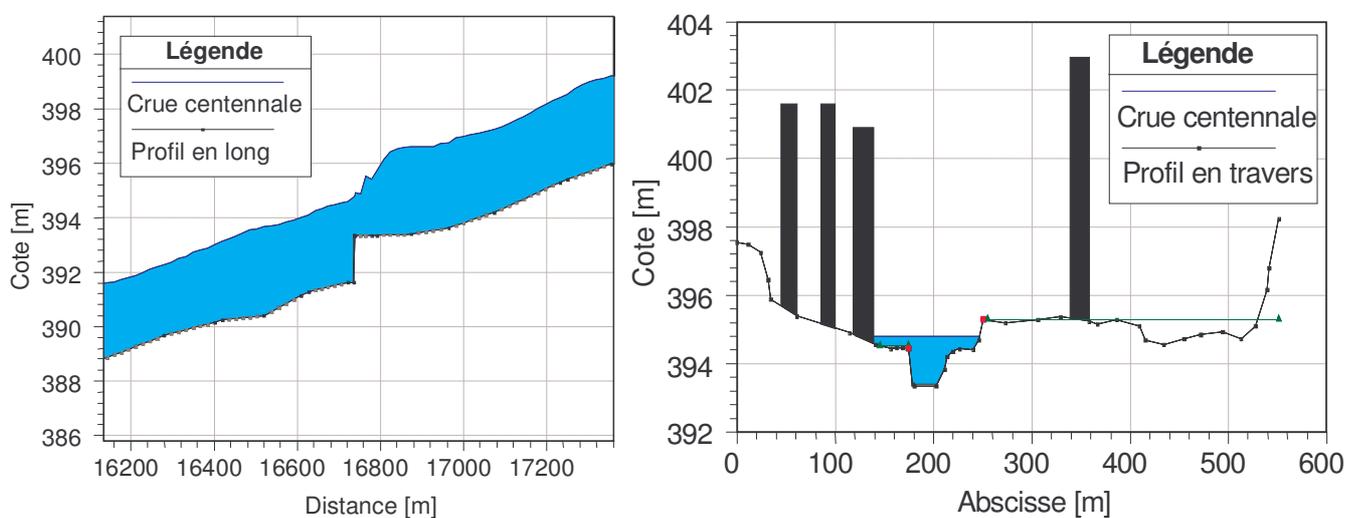


Figure 123 : profil en long et profil en travers au niveau d'un seuil

La gestion intégrée du risque d'inondation doit tenir compte de l'historique morphologique, car il explique en partie les faibles fréquences de débordement observées dans les vallées de moyenne montagne.

Protection empirique des enjeux

Les murs de rive et les digues ne sont pas des aménagements récents. Les riverains ont toujours cherché à protéger leurs biens des inondations. Autrefois, il fallait plusieurs années pour construire des murs ou des digues capables de protéger les villages des crues décennales,

voire cinquantennales. Les riverains n'avaient pas de connaissances théoriques en hydrologie. Ils ne fixaient pas d'objectif de protection. Ils se contentaient de rehausser un peu plus les protections à chaque inondation plus forte que les précédentes. Aujourd'hui, on observe une situation héritée des aménagements successifs. Ainsi, les vieux centres des villes et des villages anciens sont souvent déjà protégés contre les crues de période de retour inférieure à 50 ans.

Dans la vallée de la Thur, on observe bien ce phénomène. Notamment pour la ville de Thann dont le centre historique a été durement touché par les inondations au XIX^e siècle. Les ponts et les murs s'avèrent dimensionnés pour protéger la ville des crues de période de retour inférieure à 50 ans. C'est un niveau de protection assez élevé quand on considère la topographie très défavorable de la ville. La plupart des constructions de la vallée (vulnérabilité forte) sont protégées pour une période de retour allant de 20 ans à 50 ans (figure 124). Les ouvrages de protection sont assez anciens, mais ils sont régulièrement renforcés.

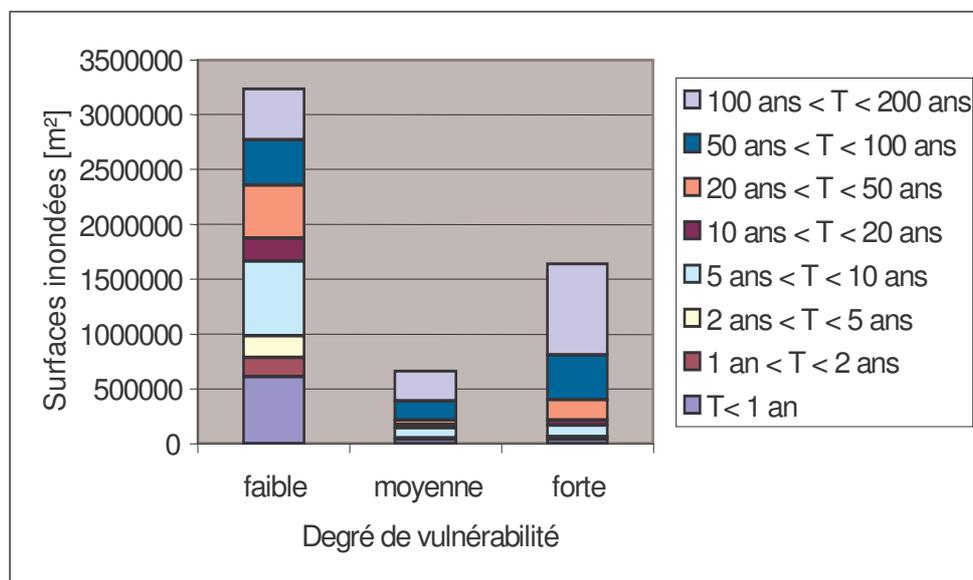


Figure 124 : superficies inondées selon la vulnérabilité et la période de retour

La demande de protection contre les crues a évolué du fait d'une plus grande sensibilité du bâti et des équipements aux inondations. L'objectif de protection des zones urbanisées est aujourd'hui la crue centennale. Ainsi, un certain nombre d'ouvrages de protection doivent faire l'objet d'une remise à niveau. Les digues peuvent être surélevées pour un coût acceptable. Les ponts sont souvent sous dimensionnés. Ils présentent un risque important de formation et de rupture d'embâcles. Ils peuvent également augmenter les débordements à l'amont. La mise à niveau des ponts est très coûteuse et doit s'envisager au cas par cas.

La gestion intégrée du risque d'inondation doit répondre aux besoins de protection des riverains, mais elle doit également tenir compte du fonctionnement des hydrosystèmes.

3.1.3.3 Fonctionnalité des zones inondables

L'approche semi-quantitative du risque permet de faire le point sur l'inondabilité des prairies et des forêts alluviales. Le bon fonctionnement écologique des hydrosystèmes est tributaire des crues les plus fréquentes.

Dégradation du fonctionnement hydrologique

Les rivières naturelles débordent du lit mineur avec une période de retour comprise entre 1 an et 10 ans (BRAVARD et PETIT, 1997). La biodiversité et la fonctionnalité des hydrosystèmes sont inféodées à un rythme d'inondation élevé. Ainsi, on s'intéresse surtout à l'extension des crues les plus fréquentes, de période de retour inférieure à 10 ans.

On s'intéresse à la contribution des crues de période de retour inférieure à 10 ans dans l'inondabilité des prairies et de forêts alluviales (figure 124 : vulnérabilité faible). On constate que les crues fréquentes inondent plus de la moitié de la superficie de l'inondation bicentennale. L'inondabilité pour les périodes de retour inférieures à 10 ans semble importante, mais dans l'absolu, ces inondations touchent moins de 170 ha. C'est très faible pour plus de 30 km de cours d'eau. Il y a deux explications à cela :

- Les vallées de moyenne montagne sont naturellement étroites et les superficies inondées sont toujours limitées. Cependant, ces 170 ha représentent une largeur moyenne d'inondation d'à peine 50 m, ce qui est vraiment très faible.
- Les constructions menacées par les crues (vulnérabilité forte) couvrent également une superficie de 170 ha environ. Cette occupation du sol empiète en grande partie sur les champs naturels d'expansion des crues de la Thur. Cela réduit d'autant la superficie de zones alluviales fonctionnelles. Les zones urbanisées ne sont plus inondées pour une crue décennale car elles sont partiellement protégées.

La perte de fonctionnalité des milieux alluviaux ne peut pas être évaluée économiquement. Cependant, il est certain que cette dégradation écologique ne s'inscrit pas dans la perspective de gestion durable de la ressource en eau et des milieux naturels. La gestion intégrée du risque d'inondation doit permettre de restaurer des inondations régulières. Elles sont garantes d'une meilleure qualité de l'eau, mais aussi d'une meilleure rétention des crues et donc d'une réduction de l'aléa.

Dégradation morphologique

Nous avons vu précédemment que la rectification et le recalibrage des cours d'eau a permis de limiter les inondations dans les zones urbanisées. L'incision du lit mineur a également eu pour conséquence une diminution de l'inondabilité des prairies (LANDON et al., 1998). Cela explique en partie la perte de fonctionnalité des prairies alluviales. L'inondation régulière des prairies permettait d'atteindre de bons rendements fourragers en fond de vallée. Pour maintenir un niveau hydrique satisfaisant, les agriculteurs avaient organisé un système d'irrigation par submersion qui est aujourd'hui obsolète. La topographie des prairies inondables porte toujours les traces de ces pratiques.

Pratiques agricoles

La perte de biodiversité des prairies alluviales n'est pas imputable uniquement au changement du rythme d'inondation des prairies. En effet, la modification des pratiques agricoles a un impact au moins aussi important sur les populations végétales. La fertilisation des prairies favorise les espèces fourragères au détriment des espèces autochtones (MULLER et al., 1998). De même, la mécanisation de la fenaison et l'ensilage permettent des fauches de plus en plus précoces. Celles-ci rendent difficile le développement de certaines plantes. L'avifaune est également sensible à ce changement de pratiques.

La reconquête de prairies alluviales fonctionnelles en fond de vallée ne peut pas se faire uniquement par le rétablissement d'une inondabilité naturelle. Il faut accompagner ces projets d'une contractualisation avec les agriculteurs, pour limiter la fertilisation et retarder les dates de fauche et de pâture. Ces changements de pratiques agricoles occasionnent un manque à gagner dans le contexte déjà difficile de l'agriculture de montagne. Il faut donc prévoir une indemnisation des exploitants. La future Politique Agricole Commune devrait faciliter ces changements de pratiques, car elle mettra en place le découplage des primes et de la production agricole.

Le risque d'inondation des vallées de moyenne montagne est un héritage des aménagements du passé, conjugué avec le développement récent de l'urbanisation des basses vallées. Les zones inondables qui subsistent ont perdu une grande part de leur fonctionnalité pour des raisons qui ne sont pas uniquement liées à la perturbation des régimes hydrologiques. La gestion intégrée du risque d'inondation doit apporter une réponse opérationnelle et une vision à long terme. Nous proposons de mener une approche prospective pour aider les décideurs à engager une politique d'aménagement durable des cours d'eau. La première approche prospective que nous avons testée est la renaturation du cours d'eau.

3.2 Renaturation des cours d'eau

Les zones inondables fonctionnelles apparaissent comme un atout pour la réduction des inondations et la protection de la ressource en eau et des écosystèmes (cf. § 1.2.2). Ainsi, dans le cadre d'une gestion intégrée des crues, il peut être intéressant de recréer la dynamique naturelle de la rivière. La première approche prospective que nous avons menée envisage une renaturation complète du cours d'eau. De nouvelles modélisations des crues doivent permettre de déterminer l'efficacité de cette stratégie du point de vue de la lutte contre les inondations. Nous présentons tout d'abord la prospective de renaturation effectuée sur la Thur (cf. § 3.2.1). Ensuite, nous généralisons les résultats obtenus sur la Thur à l'aide d'une rivière « virtuelle » (cf. § 3.2.2). Enfin, nous proposons une discussion sur les limites de la simulation prospective réalisée (cf. § 3.2.3).

3.2.1 Prospective de renaturation de la Thur

A l'issue du diagnostic intégré du risque établi pour la Thur, nous avons constaté que le risque d'inondation est assez fort dans l'ensemble de la vallée. De plus, le fonctionnement hydrologique et écologique du cours d'eau est dégradé. Pour déterminer si la renaturation du cours d'eau est un moyen efficace pour limiter les inondations et restaurer la fonctionnalité des prairies alluviales, nous simulons le fonctionnement de la Thur après renaturation. Nous présentons dans un premier temps les objectifs de la renaturation (cf. § 3.2.1.1), puis nous expliquons la méthode de simulation prospective employée (cf. § 3.2.1.2). Enfin, nous commentons les résultats obtenus sur la vallée de la Thur (cf. § 3.2.1.3).

3.2.1.1 Objectifs de la renaturation

La gestion intégrée du risque d'inondation doit tenir compte des dommages potentiels occasionnés par les crues, mais aussi des aspects bénéfiques des inondations. La renaturation est une approche à long terme et à grande échelle. Ses objectifs concourent à la fois à la diminution de l'aléa et à l'amélioration du fonctionnement écologique des hydrosystèmes.

Laminage des crues

L'inondation des prairies et des forêts alluviales permet de favoriser la rétention et le ralentissement des crues. Cela permet de diminuer le débit de pointe des crues et donc de réduire l'aléa à l'aval des champs d'expansion des crues. Ainsi, la restauration de l'inondabilité des prairies et des forêts alluviales doit permettre une diminution du risque d'inondation dans les zones urbanisées.

A plus grande échelle, la sauvegarde des champs d'expansion des crues permet de protéger les riverains situés à l'aval du bassin versant étudié. Dans le cas de la vallée de la Thur, au delà du risque d'inondation local, on doit se préoccuper du risque d'inondation de la rivière Ill, dont la Thur est un affluent. La restauration du laminage naturel s'inscrit dans une démarche à grande échelle.

Fonctionnalité des prairies et des forêts alluviales

La renaturation a pour objectif de restaurer la dynamique naturelle des zones alluviales. Si on accompagne la renaturation d'une contractualisation avec les agriculteurs, le premier effet attendu est une augmentation de la biodiversité (FALCONER et BINLIANG, 2003). Les inondations les plus fréquentes jouent un rôle essentiel dans l'établissement des conditions hydriques favorables au développement d'associations végétales alluviales typiques (SWETNAM, 1998).

Le second effet attendu est une recharge plus efficace des nappes alluviales ainsi qu'une meilleure qualité des eaux souterraines et de surface. La submersion des zones alluviales et les battements de niveau de la permettent d'améliorer l'autoépuration des eaux souterraines. Une nappe alluviale bien alimentée pendant les crues contribue également au soutien d'étiage, avec une eau fraîche et de bonne qualité.

La renaturation d'un cours d'eau a un impact sur la dynamique morphologique du lit mineur. Si on laisse une totale liberté à la rivière, le tracé du lit mineur peut être profondément modifié. Il est difficile de prédire les évolutions morphologiques d'un cours d'eau auquel on rend la liberté de divaguer, mais ce facteur doit être pris en compte lorsqu'on envisage une renaturation.

La renaturation s'inscrit dans une gestion à long terme de l'évolution de la rivière et de la ressource en eau.

Un enjeu européen

Les projets de renaturation fleurissent partout en Europe. Les promesses de cette nouvelle gestion des crues encouragent les décideurs à s'engager dans une nouvelle vague d'aménagements de rivières. Les projets portent sur des rivières de taille très variées, dans des contextes géographiques très différents. Des comités scientifiques ont été mis en place pour accompagner les plus grands projets (Rhin, Danube, Neckar...). On peut ainsi évaluer leurs impacts hydraulique, écologique et géomorphologique.

La prospective que nous proposons est complémentaire de ces grands projets, car le contexte géographique et morphologique est original. A l'aide de simulations prospectives, nous espérons pouvoir éclairer les décideurs quant aux potentialités et aux contraintes de la renaturation, dans le contexte des rivières de moyenne montagne.

3.2.1.2 Méthode de simulation prospective

La méthodologie de modélisation que nous avons proposée (cf. partie 2) est conçue pour simuler les impacts d'aménagements futurs. Les simulations prospectives permettent de

présenter de nouvelles solutions techniques aux décideurs. On leur expose les conséquences positives et négatives d'aménagements appliqués à grande échelle. Le but de ces simulations n'est pas de réaliser des avant-projets, mais d'orienter les décideurs vers une gestion intégrée des cours d'eau. Les prospectives sont basées sur des approches très simples de manière à faciliter l'appropriation des résultats par les acteurs de terrain. La première application envisage la renaturation complète de la Thur.

Hydrologie stationnaire

Pour chaque scénario de prospective, nous voulons qu'il y ait le moins de modifications possibles. Ainsi, nous considérons une hydrologie future similaire à celle utilisée pour le diagnostic. Nous utilisons **les mêmes événements de référence**, mais nous ne pouvons pas savoir *a priori* s'ils conservent leur caractéristique particulière de monofréquence spatiale. Nous proposons plus loin une discussion sur cet aspect de la modélisation prospective (cf. § 3.2.3.1).

Les seules modifications prises en compte concernent la géométrie du cours d'eau. Il s'agit de modifications du modèle hydraulique. Elles ont donc un impact sur les lignes d'eau et sur les hydrogrammes simulés en régime transitoire. La prospective comporte deux scénarios différents : une renaturation par suppression des digues et une renaturation par ouverture de casiers.

Suppression des digues (option RENATURE)

Pour la renaturation des champs d'expansion des crues, l'approche la plus simple consiste à supprimer tous les ouvrages (digues et murs) qui empêchent l'inondation du lit majeur (figure 125) (ROTTCHER et TONSMANN, 2003). A ce stade de la réflexion, nous ne nous préoccupons pas de la stabilité morphologique du cours d'eau.

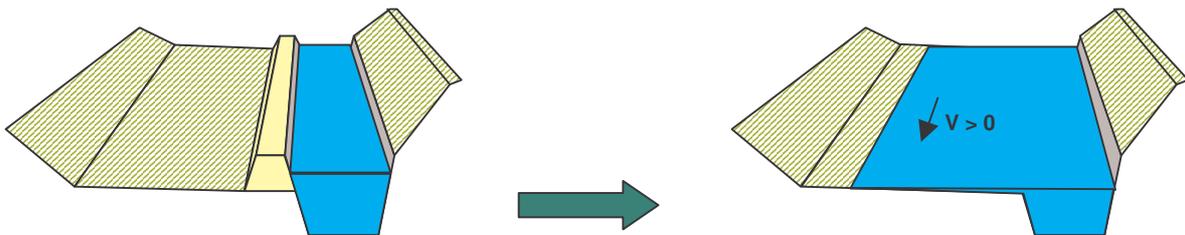


Figure 125 : illustration de la renaturation par suppression des ouvrages de protection

La réouverture du lit majeur occasionne une diminution de la ligne d'eau et une répartition de l'écoulement sur l'ensemble du fond de vallée. Le fonctionnement du cours d'eau après renaturation est comparable au fonctionnement naturel des rivières de moyenne montagne (abstraction faite de la simplification du schéma géométrique).

Création de casiers (option CASIER)

La seconde option de renaturation est de ne pas supprimer les ouvrages de protection existants, mais de les utiliser comme bassins de rétention de type casiers (figure 126). Il est en effet moins coûteux de se contenter d'ouvrir des brèches dans les murs et les digues pour

reconnecter le lit majeur au lit mineur (ROTTCHER et TONSMANN, 2003 ; WOLTERS et al., 2001).

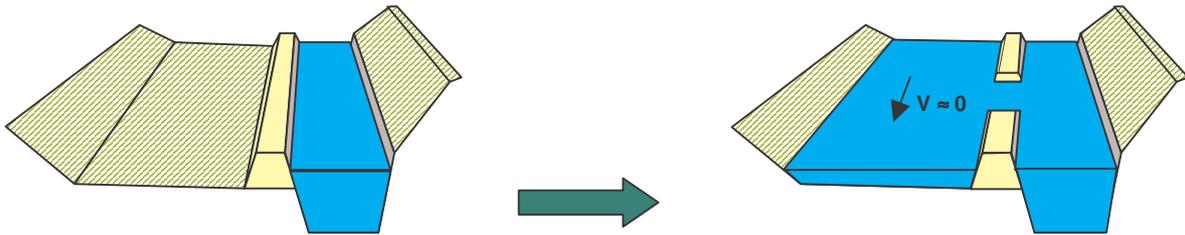


Figure 126 : illustration de la renaturation par création de casiers

Les casiers étant munis d'une seule ouverture, ils ne participent pas à l'écoulement de la crue. La vitesse de l'eau dans les casiers remplis est donc faible. La ligne d'eau diminue peu avec cette solution, mais le volume d'eau entré dans le casier est réellement stocké, puisqu'il ne retourne à la rivière qu'en fin de crue.

Ces deux options de renaturation sont caricaturales, mais le but de notre simulation prospective n'est pas de développer l'ingénierie de la renaturation. Nous voulons simplement montrer les potentialités et les contraintes de ce type d'aménagement appliqué à grande échelle. Nous avons testé ces deux options de renaturation dans le cadre de simulations prospectives sur la vallée de la Thur.

3.2.1.3 Résultats de la prospective sur la vallée de la Thur

La simulation prospective d'une renaturation de la Thur nécessite la modification de la géométrie du cours d'eau renseignée dans le modèle hydraulique. Cette modification peut être effectuée de manière simple et rapide pour les deux options retenues. Les résultats obtenus sur la vallée de la Thur sont plutôt étonnants.

Choix d'une renaturation « totale »

Du fait d'une urbanisation quasiment continue du fond de vallée, la Thur se prête assez mal à un projet de renaturation à grande échelle. Nous avons tout de même voulu tester l'impact d'une renaturation « totale » de la vallée. Nous avons donc « supprimé » tous les ouvrages de protection, y compris ceux qui protègent les zones urbanisées. Nous voulons en effet évaluer le potentiel maximum de la renaturation en terme de laminage des crues et de réduction de l'aléa à l'aval de la vallée.

Il est évident qu'un tel projet ne verra jamais le jour. Mais une renaturation localisée sur quelques centaines de mètres de rivière ne serait pas à l'échelle des crues violentes qui touchent la vallée. Seule une renaturation de grande envergure peut avoir un impact significatif sur les crues.

Les résultats attendus sont une réduction de la pointe de crue à l'aval du tronçon étudié. Ainsi, pour chaque option d'aménagement, nous avons comparé les hydrogrammes de crue obtenus par routage hydraulique à l'exutoire du bassin versant.

La renaturation aggraverait les crues à l'aval

Les résultats obtenus à l'aval pour les deux options de renaturation sont présentés ci-dessous (figure 15). Nous présentons seulement les crues de périodes de retour 1, 10, 50, 100 et 200 ans.

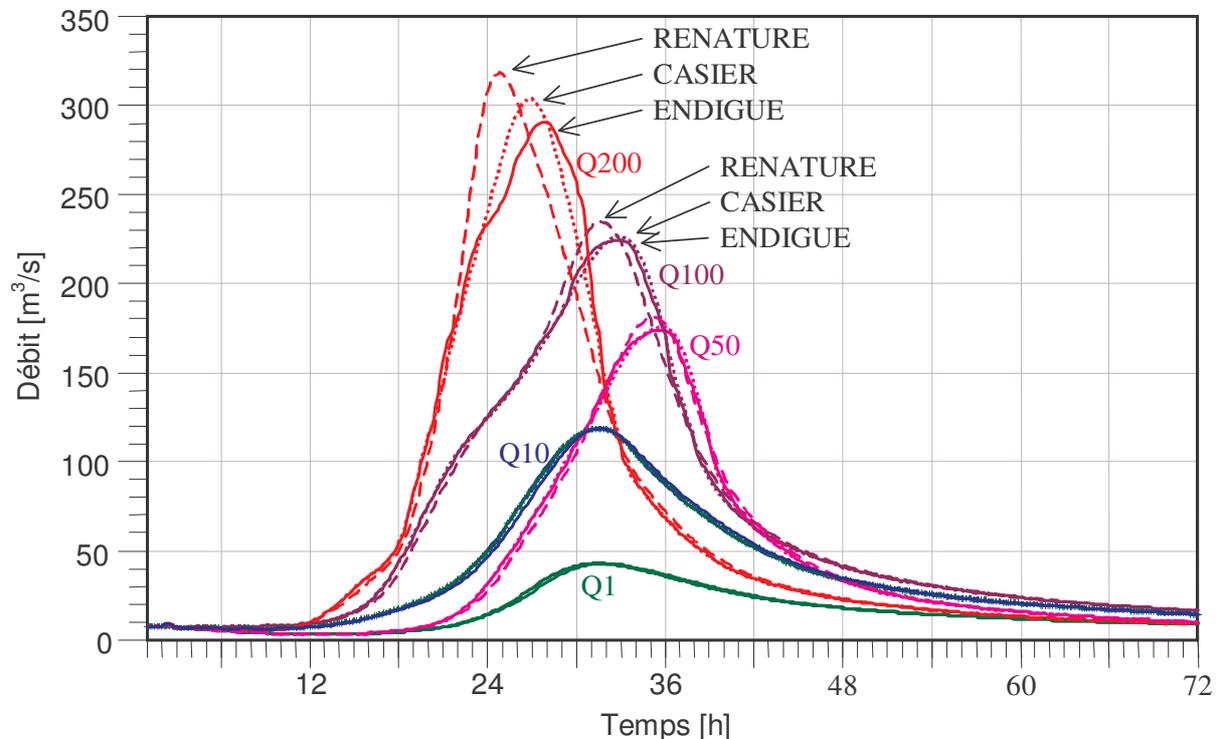


Figure 127 : comparaison du laminage des crues pour les deux options de renaturation

Le résultat est surprenant : pour les crues les plus fortes, on observe une aggravation du débit de pointe lorsqu'on supprime les endiguements. Cela contredit les discours tenus généralement sur le sujet. Le laminage naturel dans la vallée de la Thur ne semble pas être efficace.

Premiers éléments d'analyse

En observant les hydrogrammes ci-dessus on peut faire trois remarques :

- Pour les crues de périodes de retour inférieures à 10 ans, on ne remarque pas de différences entre les trois simulations. En effet, pour ces « petites » crues la plus grande partie du débit transite dans le lit mineur.
- Pour les crues fortes, on observe dans le cas ENDIGUE un décalage temporel progressif de l'hydrogramme. Ce décalage est le signe d'une rétention ponctuelle importante. Il correspond probablement à la surverse des digues et des murs qui protègent les zones urbanisées des crues cinquantennales à centennales. Lors de la surverse, un grand volume de stockage est disponible immédiatement, ce qui crée un laminage artificiel très efficace. Notons qu'on fait l'hypothèse que la surverse d'une digue ouvre une seule brèche localisée et que par conséquent l'eau reste stockée dans un « casier »

➤ L'option CASIER est un cas intermédiaire : la vitesse d'écoulement dans les casiers étant faible, ils permettent une rétention plus efficace qu'un lit majeur actif.

La renaturation de la Thur ne permet pas un laminage des crues plus efficace qu'il ne l'est actuellement. Toutefois, il serait dangereux de généraliser les résultats obtenus ici à d'autres rivières sans une analyse plus fine des phénomènes. Nous proposons de mener une approche similaire sur une rivière « virtuelle ».

3.2.2 Rivière « virtuelle » pour la généralisation

La mise au point d'une rivière simplifiée « virtuelle » ou « générique » n'est pas aussi simple qu'il y paraît, car sa géométrie doit être cohérente avec le régime hydrologique qu'on lui impose. Les apports d'une approche générique simplifiée sont nombreux. Elle contribue à une meilleure compréhension du fonctionnement des cours d'eau en crue, ainsi que des effets des aménagements. Elle permet de définir les potentialités et les contraintes d'une option d'aménagement dans un contexte géographique particulier. Dans un premier paragraphe, nous définissons les objectifs d'une approche générique simplifiée (cf. § 3.2.2.1). Ensuite, nous décrivons la construction de la géométrie de la rivière virtuelle (cf. § 3.2.2.2). Enfin, la prospective de renaturation appliquée à la rivière virtuelle permet de généraliser les résultats obtenus pour la vallée de la Thur (cf. § 3.2.2.3).

3.2.2.1 Objectifs d'une approche générique simplifiée

Les études de cas comme celle que nous avons menée sur la vallée de la Thur ne constituent pas une base rigoureuse pour produire des conclusions générales. Il est difficile de séparer ce qui relève du contexte local de l'étude et ce qui est généralisable à un contexte géographique plus large. L'utilisation d'une rivière « virtuelle » doit permettre d'aller au-delà de l'étude de cas.

S'affranchir des cas particuliers

Le premier objectif d'une approche générique est de mettre de côté les facteurs propres à une étude de cas particulière. En effet, pour la vallée de la Thur par exemple, nous avons vu que le tracé du cours d'eau et sa morphologie ont été profondément modifiés au fil des siècles. La suppression des digues ou l'ouverture de brèches ne permet pas une renaturation complète du fait de l'incision et des nombreux seuils présents sur la rivière. Nous avons voulu travailler à partir d'une rivière de moyenne montagne naturelle, dont les seuls aménagements seraient des digues de protection contre les crues.

Une approche générique permet de présenter aux acteurs de terrain les conséquences locales et globales de différents types d'aménagements. Le fait de présenter des résultats en dehors d'un contexte géographique ou politique particulier permet de dépassionner le débat et de concentrer l'attention sur l'approche technique de la problématique.

D'un point de vue pédagogique, il est plus simple de présenter une approche générique, car la rivière virtuelle présente des caractéristiques homogènes. Ainsi la réponse

aux aménagements est uniforme dans tout le bassin versant. Le message que l'on adresse aux acteurs de terrain est plus clair, car on évite les contre-exemples inhérents aux études de cas.

Homogénéiser les seuils de fonctionnement

La gestion du risque d'inondation ne peut pas se passer d'une approche probabiliste, ainsi les différentes gammes de fréquences doivent être prises en compte dans une approche générique. Nous avons vu précédemment que les rivières naturelles ou aménagées présentent des débits seuils au-delà desquels leur fonctionnement peut être très différent (DOYLE et al., 1999). Par exemple, une fois dépassé le débit à plein bord, la rivière déborde du lit mineur et inonde le lit majeur. De même, lorsque le débit dépasse le débit de dimensionnement des digues, l'inondation gagne les terrains qui étaient protégés.

Lorsqu'on étudie une rivière réelle, les débits seuils varient le long du cours d'eau en fonction de la géométrie du lit mineur. Par ailleurs, les murs et les digues de protection sont rarement dimensionnés pour la même période de retour. Les débordements interviennent donc de manière désorganisée pour des crues de périodes de retour très variables.

Pour permettre une meilleure compréhension des effets de seuil, nous avons créé une rivière virtuelle dont le fonctionnement est régi par un seuil de fréquence homogène d'amont en aval. Ainsi, on pourra mieux observer l'incidence des aménagements en fonction de la fréquence des crues. Il ne faut cependant pas perdre de vue que la simplification et l'homogénéisation n'aident pas toujours à la compréhension des cas réels complexes.

Faciliter les tests de sensibilité

Une rivière virtuelle simplifiée est très utile pour réaliser des tests de sensibilité aux paramètres du modèle hydraulique ou aux différentes morphologies de cours d'eau. En effet, on peut modifier rapidement et à grande échelle le modèle hydraulique et comparer les hydrogrammes ou les lignes d'eau obtenus.

Les simulations en régime transitoire sont beaucoup plus rapides et stables lorsqu'on utilise une géométrie simplifiée. On peut ainsi multiplier les essais avec plus de facilité que lorsqu'on travaille sur une rivière réelle. Les rivières virtuelles sont utiles également pour l'apprentissage du logiciel hydraulique, car elles génèrent moins d'instabilités que les rivières réelles complexes.

Une rivière virtuelle se prête à une gamme étendue de tests de sensibilité. On peut mener une approche exploratoire de certains phénomènes dont on perçoit l'existence lors d'études de cas ou lors d'observations de terrain.

Une rivière virtuelle permet d'envisager un grand nombre d'applications techniques et scientifiques, mais sa conception doit être rigoureuse.

3.2.2.2 Principes de construction de la rivière virtuelle

La construction d'une rivière virtuelle de moyenne montagne nécessite une réflexion approfondie sur les liens qui unissent la morphologie du cours d'eau et son hydrologie. La géométrie de la rivière virtuelle dépend du contexte géographique étudié. La morphologie de

la rivière virtuelle doit être comparable à la morphologie des rivières réelles étudiées. Les ouvrages de protection sont dimensionnés de manière homogène.

Choix des conditions hydrologiques

Nous avons fait le choix d'adapter la géométrie de la rivière virtuelle à l'hydrologie plutôt que l'inverse. Il est en effet plus facile de modifier la géométrie du cours d'eau pour obtenir des seuils de débordement homogènes que de modifier les hydrogrammes de crue en fonction d'une géométrie prédéterminée.

Pour faciliter la comparaison avec l'étude de cas sur la vallée de la Thur, nous avons utilisé les 8 hydrogrammes de référence simulés à Willer/Thur. Ces hydrogrammes ont des formes réalistes et ils correspondent bien à des crues de moyenne montagne.

Pour chaque crue, 50 % du débit de l'hydrogramme est injecté en amont et 50 % est injecté en route. Cette méthode permet d'avoir un débit constamment croissant de l'amont vers l'aval, avec une grande progressivité. On reproduit ainsi le fonctionnement d'un cours d'eau alimenté par de petits affluents répartis uniformément le long du tracé.

Construction d'une morphologie naturelle réaliste

Pour que la rivière virtuelle ait un comportement comparable à celui de la Thur, nous avons considéré un tronçon de même longueur, soit 30 km. La largeur de la rivière a été fixée à 10 m, ce qui est réaliste en regard des débits à transiter. Le contexte géographique est celui des rivières de moyenne montagne, nous avons donc retenu une pente uniforme de 6 ‰ (figure 128). Cette pente correspond à la pente moyenne de la Thur (hors seuils).

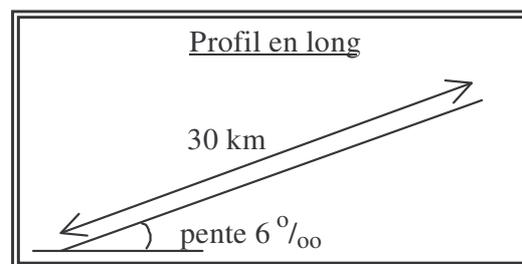


Figure 128 : profil en long de la rivière virtuelle de moyenne montagne

Une fois le profil en long de la rivière déterminé, on simule des crues biennale et bicentennale dans le but de construire une géométrie uniforme d'amont en aval (figure 129). On retient deux critères en particulier :

- La crue biennale remplit à plein bord le lit mineur (BRAVARD et PETIT, 1997)
- La crue bicentennale correspond à l'extension maximale du lit majeur

Les berges du lit mineur ont une pente de 2 pour 1 et la pente latérale du lit majeur vaut 6 ‰.

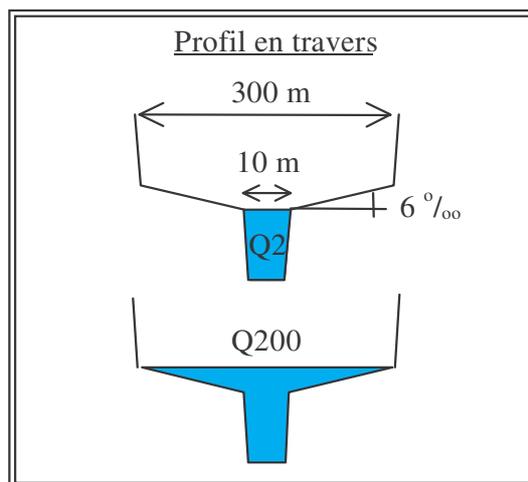


Figure 129 : profil en travers de la rivière virtuelle de moyenne montagne

Les valeurs de largeur sont données à titre indicatif car la largeur varie d'amont en aval. Une rivière construite de la sorte peut être considérée comme une rivière « naturelle » de moyenne montagne. Son lit mineur déborde à partir de la crue biennale et son lit majeur est étroit.

Protections contre les crues dimensionnées pour une seule fréquence

Pour comparer le fonctionnement de la rivière virtuelle naturelle et endiguée, nous avons ajouté des digues qui protègent le lit majeur des inondations jusqu'à la crue cinquantennale (figure 130). Les digues sont continues de l'amont à l'aval. Les crues centennale et bicentennale les surversent.

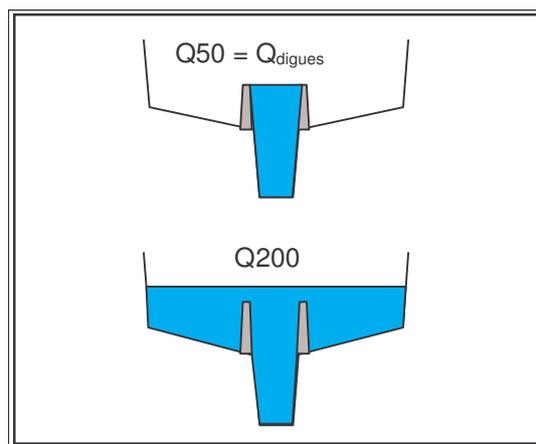


Figure 130 : dimensionnement des digues pour la crue cinquantennale

Nous avons mis au point une méthode de construction de rivière virtuelle qui permet d'obtenir une géométrie cohérente avec les conditions hydrologiques retenues. Les seuils de débordement sont uniformes sur l'ensemble des 30 km de rivière modélisés.

3.2.2.3 Généralisation de la prospective de renaturation

Nous avons effectué les mêmes tests de renaturation que ceux menés sur la vallée de la Thur dans le but de tirer des conclusions plus générales. L'option RENATURE correspond à la rivière virtuelle naturelle, tandis que les options ENDIGUE et CASIER correspondent respectivement à la rivière virtuelle endiguée et équipée de casiers.

Résultats obtenus pour la rivière virtuelle

Pour éviter les interférences dues à la proximité des seuils de débordement nous n'avons pas affiché les crues biennale et cinquantennale. Les hydrogrammes des crues de périodes de retour 1 an, 10 ans et 100 ans sont suffisants pour produire une généralisation des résultats obtenus sur la Thur (figure 131).

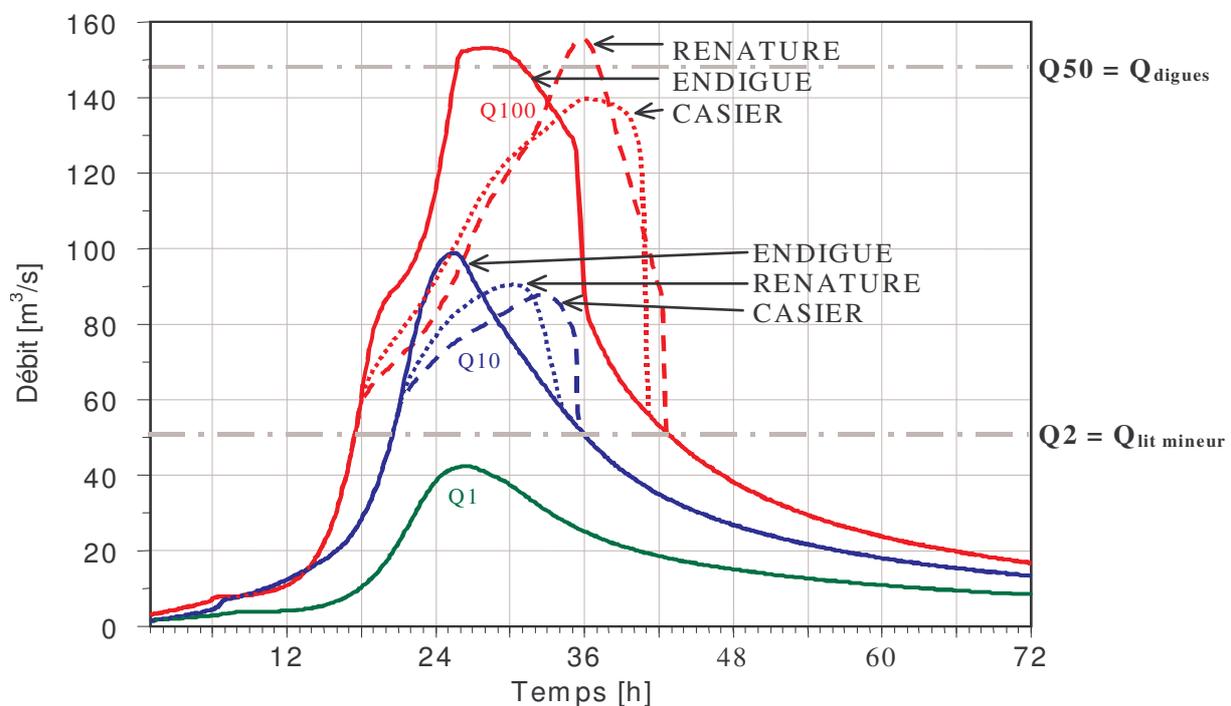


Figure 131 : résultats de la prospective de renaturation pour la rivière virtuelle

On obtient des résultats plus contrastés que dans le cas de la vallée de la Thur :

- La renaturation a pour effet d'aggraver les crues fortes par rapport à la situation ENDIGUE.
- Pour les crues de période de retour inférieure à l'objectif de protection, la renaturation diminue le débit de pointe des crues.

On observe très nettement l'effet de la surverse des digues sur la crue centennale dans l'option ENDIGUE. Le débit de pointe est fortement laminé du fait du volume de rétention disponible en arrière des digues. L'option CASIER est la plus performante en terme de laminage, quelle que soit l'ampleur de la crue considérée. ROTTCHER et TONSMANN (2003) obtiennent les mêmes résultats sur la rivière Lahn (Allemagne).

Mise en évidence de deux seuils de fréquence

Lorsqu'on examine en détail les résultats obtenus, on constate qu'il y a deux seuils de débit bien nets : le débit à plein bord du lit mineur et le débit de dimensionnement des digues. L'impact de la renaturation sur le laminage est différent selon que le débit de pointe est supérieur ou inférieur à ces seuils :

- si $Q_{\text{pointe}} < Q_{\text{lit mineur}}$: ENDIGUE est aussi efficace que RENATURE
- si $Q_{\text{lit mineur}} < Q_{\text{pointe}} < Q_{\text{dignes}}$: RENATURE est plus efficace qu'ENDIGUE
- si $Q_{\text{pointe}} > Q_{\text{dignes}}$: ENDIGUE est plus efficace que RENATURE

Dans le cas de la vallée de la Thur, le débit du lit mineur renaturé à plein bord est de période de retour supérieure à 2 ans, car le lit de la rivière est incisé en de nombreux endroits. Nous estimons la période de retour moyenne entre 10 ans et 20 ans. Par ailleurs, les riverains se sont protégés au fur et à mesure des crues en rehaussant les murs et les digues. Ils ont empiriquement atteint un objectif de protection situé autour de 50 ans. Ainsi, dans le cas de la Thur, la gamme de périodes de retour pour laquelle la renaturation est un moyen efficace pour diminuer les inondations à l'aval est très étroite ($20 \text{ ans} < T < 50 \text{ ans}$).

Dans le cas de la rivière virtuelle, l'option CASIER est la plus efficace quelle que soit la crue considérée, car le lit majeur permet un grand volume de rétention. L'absence d'incision permet une inondation plus importante du lit majeur et les volumes stockés dans les casiers sont significatifs. Dans le cas de la vallée de la Thur, la plus grande partie du débit transite dans le lit mineur et le volume des casiers est assez limité. Le peu de rétention obtenu n'a pas un impact significatif sur le laminage des crues.

Potentialités et contraintes de la renaturation

Dans le contexte des rivières de moyenne montagne, la renaturation n'apparaît pas comme une solution efficace pour lutter contre les crues les plus fortes. Pour qu'elle soit efficace, la renaturation ne doit pas se limiter à une simple suppression des digues, elle doit tenir compte de la morphologie de la rivière et de sa dynamique fluviale. Nous donnons deux pistes de réflexion :

- Si la rivière ne semble pas trop incisée et a une dynamique fluviale modérée : il est préférable d'adopter la méthode CASIER, qui consiste à ouvrir des brèches (déversoirs latéraux et/ou prise d'eau par exemple) dans les digues existantes pour favoriser la rétention des crues.
- Si la rivière présente une incision marquée : la morphologie du cours d'eau et sa dynamique fluviale doivent être étudiés en détail. Le reméandrement peut être envisagé pour corriger l'incision tout en augmentant sensiblement la longueur du cours d'eau. Ces travaux lourds impliquent la suppression ou la relocalisation des digues.

Notre propos n'est pas de discréditer la renaturation, mais au contraire d'en clarifier les potentialités, ainsi que les contraintes à prendre en compte. Il ne faut pas généraliser à la hâte des aménagements efficaces sur les grands fleuves, car ils ne sont pas toujours adaptés aux rivières de moyenne montagne. La renaturation peut être envisagée pour au moins deux bonnes raisons qui se suffisent à elles-mêmes : la dynamique des hydrosystèmes et la protection de la ressource en eau. La prospective de renaturation menée sur la vallée de la Thur utilise une représentation simplifiée des aménagements et les crues modélisées ont été choisies arbitrairement. Nous proposons de mettre en évidence les limites et les perspectives de cette approche dans des contextes variés.

3.2.3 Limites et perspectives

Les projets d'aménagement hydraulique des cours d'eau ont souvent pour effet de modifier le routage des crues. Le laminage peut être soit amélioré, soit dégradé. Dans les deux cas, cela se traduit par une modification du débit de pointe des crues à l'aval du tronçon aménagé. Les événements de référence utilisés pour les simulations prospectives conservent-ils la même fréquence après aménagement du cours d'eau ?

Dans un premier temps nous proposons une discussion sur cette problématique (cf. § 3.2.3.1). Ensuite, nous élargissons la prospective de renaturation en intégrant une évolution de l'occupation des sols (cf. § 3.2.3.2). Enfin, nous montrons l'importance de la prise en compte de l'équilibre géomorphologique de la rivière dans les perspectives de renaturation (cf. § 3.2.3.3).

3.2.3.1 Fréquence des événements simulés en prospective

Pour pouvoir affirmer qu'un aménagement diminue efficacement le débit de pointe d'une crue, il faut vérifier qu'on a exploré tous les événements possibles. Deux événements de même fréquence peuvent produire des effets différents selon la forme de la crue. Nous distinguons les rivières de moyenne montagne des rivières de plaine.

Cas des rivières de moyenne montagne

Les résultats obtenus sur la Thur et sur la rivière virtuelle montrent que la renaturation a un impact relativement limité sur le débit de pointe des crues de référence simulées. Si on trace les distributions de probabilités des débits de pointe, on obtient les résultats suivants (figure 132).

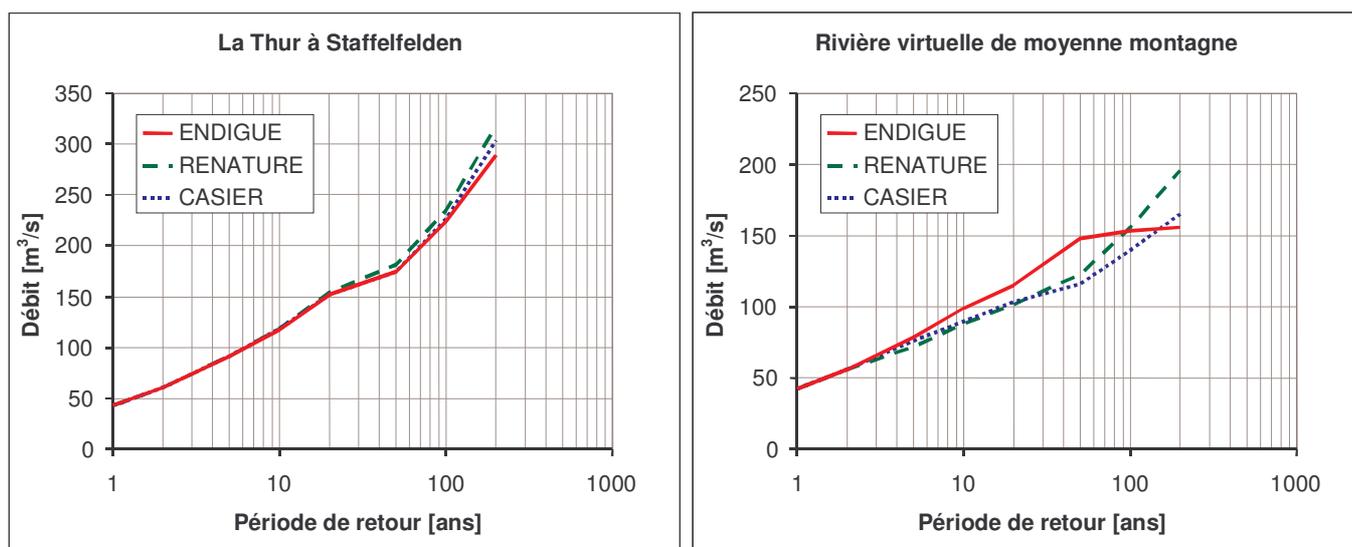


Figure 132 : distributions de probabilités du débit de pointe selon l'aménagement

Sur les deux graphiques ci-dessus, le débit de pointe est constamment croissant avec la période de retour. Cela doit toujours être vérifié, car les probabilités calculées sont des probabilités de non dépassement.

Quel que soit l'aménagement envisagé, le laminage des crues des rivières de moyenne montagne est limité par la forte pente et l'étroitesse du lit majeur. Le routage du débit de pointe apparaît peu sensible au volume de la crue. Ainsi, chaque événement de référence est représentatif de tous les événements ayant le même débit de pointe. On peut donc affirmer qu'un événement de référence conserve sa fréquence à l'aval de l'aménagement. Dans le cas des rivières de moyenne montagne, le recours à des événements de référence caractérisés uniquement par le débit de pointe est rigoureux. Il n'en va pas de même pour les rivières de plaine.

Cas des rivières de plaine

Pour explorer les limites de notre approche prospective, nous avons créé une rivière virtuelle de plaine sur le même principe que la rivière virtuelle de montagne. On utilise les événements de référence simulés à Staffelfelden comme conditions hydrologiques. La pente de la rivière vaut 1‰ et sa longueur est de 30 km (figure 133).

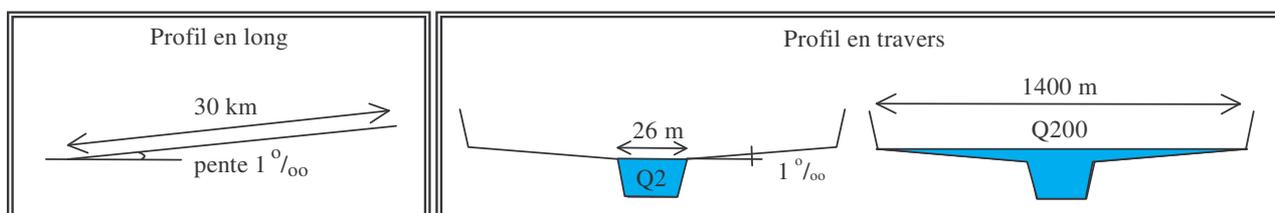


Figure 133 : caractéristiques de la rivière virtuelle de plaine

Comme dans le cas de la rivière virtuelle de moyenne montagne, l'option ENDIGUE correspond à une protection contre la crue cinquantennale. Le principe de simulation prospective est identique. Nous présentons les résultats obtenus pour les trois événements de référence de périodes de retour 1 an, 10 ans et 100 ans (figure 134).

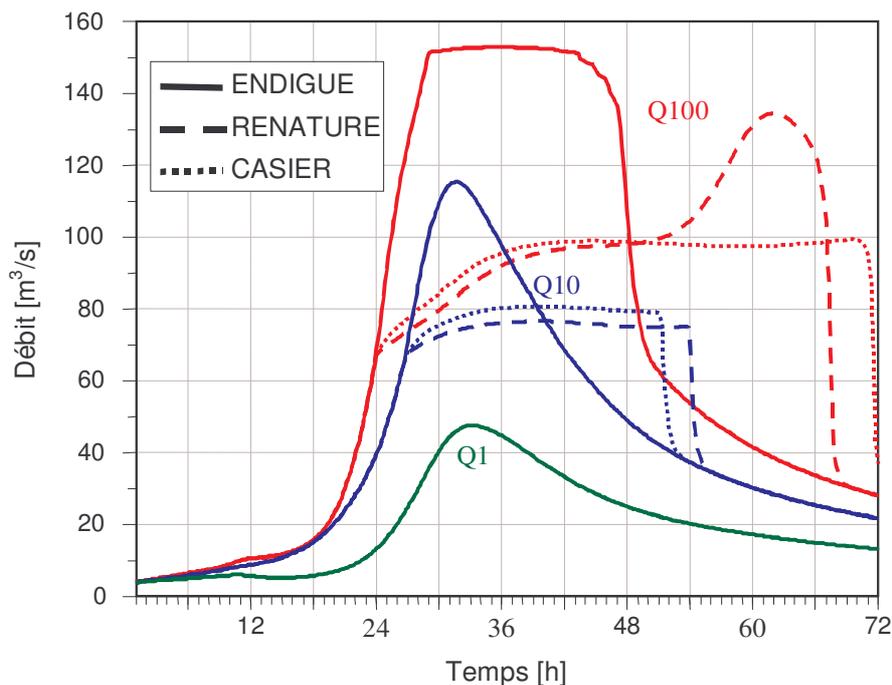


Figure 134 : impact de la renaturation sur la rivière virtuelle de plaine

On constate que le laminage offert par la renaturation est beaucoup plus important pour une rivière de plaine que pour une rivière de moyenne montagne. Le décalage dans le temps et l'aplatissement de l'onde de crue est bien marqué. Cependant, pour la crue centennale, on observe qu'au-delà d'une certaine durée de crue, le laminage en lit majeur est moins efficace. La pointe de crue n'est pas laminée car le lit majeur est déjà inondé lorsque l'onde de crue traverse le bassin versant. La durée de la crue est un critère très important pour apprécier le laminage. L'infiltration des eaux en lit majeur serait aussi à prendre en compte.

La renaturation n'est efficace que pour les crues de courte durée. On doit donc tenir compte de la forme des événements autant que de leur débit de pointe. Le tracé des distributions de probabilités du débit de pointe met en évidence l'inefficacité de l'approche pour les crues les plus fortes (figure 135).

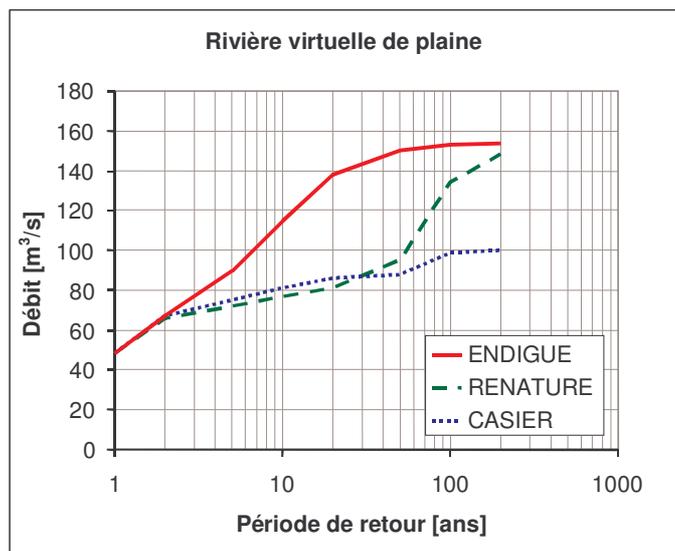


Figure 135 : distributions de probabilités du débit de pointe pour une rivière de plaine

Les distributions obtenues pour les options ENDIGUE et CASIER sont peu sensibles au volume de la crue, ainsi les quantiles estimés après aménagements sont réalistes. Par contre, la distribution du débit de pointe pour l'option RENATURE est trop irrégulière. L'estimation des quantiles de débit de pointe après aménagement doit tenir compte du volume des crues.

L'option CASIER semble être la solution la plus efficace pour laminier les crues, tout en offrant un fonctionnement plus naturel aux hydrosystèmes. Ce résultat est à rapprocher de ceux obtenus en Allemagne sur la rivière Lahn (ROTTCHER et TONSMANN, 2003).

Prise en compte du volume des crues

Dans le contexte des rivières de moyenne montagne, la prise en compte du volume des crues n'est pas nécessaire, car les volumes de rétention sont faibles par rapport au volume des crues. Le choix de ne retenir que le débit de pointe étant justifié, le diagnostic et les simulations prospectives peuvent se contenter du seul débit de pointe pour attribuer une fréquence à un événement.

Dans le cas des rivières de plaine, il apparaît qu'au-delà de certaines durées d'inondation, le laminage naturel offert par le lit majeur n'est plus efficace. Ainsi, des crues de débit de pointe modéré, mais de volume important, peuvent produire un débit de pointe élevé à l'aval d'un tronçon de cours d'eau renaturé.

Pour adapter l'approche prospective aux rivières de plaine, il faudrait sélectionner un plus grand nombre d'événements sur d'autres critères que le seul débit de pointe (KREIS, 2003). Dans un cadre non opérationnel, on pourrait envisager la simulation hydraulique d'un grand nombre d'événements. On pourrait alors attribuer une nouvelle fréquence à chaque événement sur la base des hydrogrammes routés par le modèle hydraulique.

Plus simplement, l'intégration d'un modèle hydraulique de routage dans le modèle hydrologique (BENTURA et MICHEL, 1997 ; KREIS, 2001) permettrait de rechercher des événements dont la fréquence est peu modifiée par l'aménagement. On pourrait ainsi mieux définir les contraintes hydrologiques d'aménagements de ralentissement dynamique.

Les simulations prospectives que nous avons menées ne sont adaptées qu'aux rivières de moyenne montagne. L'extension de cette approche aux rivières de plaine nécessite une prise en compte plus complète des différentes formes de crue ayant un même débit de pointe.

3.2.3.2 Evolution de l'occupation du sol

Une autre limite de notre approche est de considérer que l'occupation du sol ne change pas après un aménagement de type renaturation. On pourrait tenter d'améliorer le laminage des crues en plantant des forêts en lit majeur. L'impact hydraulique du boisement des lits majeurs dépend du contexte géographique et de l'étendue des boisements.

Boisement des lits majeurs

Les forêts alluviales fonctionnelles présentent un étagement de végétation complet, avec des strates arbustives denses qui favorisent le ralentissement des écoulements (LAVABRE et al., 2002 ; RICHARD, 2002). Leur développement permettrait d'agir directement sur la rugosité du lit majeur et ainsi de freiner l'écoulement des crues.

L'implantation de forêts alluviales permettrait également d'améliorer l'autoépuration des eaux souterraines et de contrôler l'érosion des sols. La biodiversité de ces écosystèmes est très supérieure à celle des parcelles agricoles vouées à une exploitation intensive.

D'un point de vue paysager, il est vrai que les forêts s'intègrent mieux dans les grandes plaines que dans les fonds de vallées étroites.

Impact hydraulique du boisement des lits majeurs

Nous avons fait varier la rugosité du lit majeur des rivières virtuelles de moyenne montagne et de plaine entre $n = 0,05$ (lit majeur non boisé) et $n = 0,1$ (lit majeur boisé) (figure 24). Nous utilisons les mêmes événements de référence que ceux utilisés précédemment. Dans les deux cas on utilise la géométrie de la rivière naturelle, sans digues ni casiers.

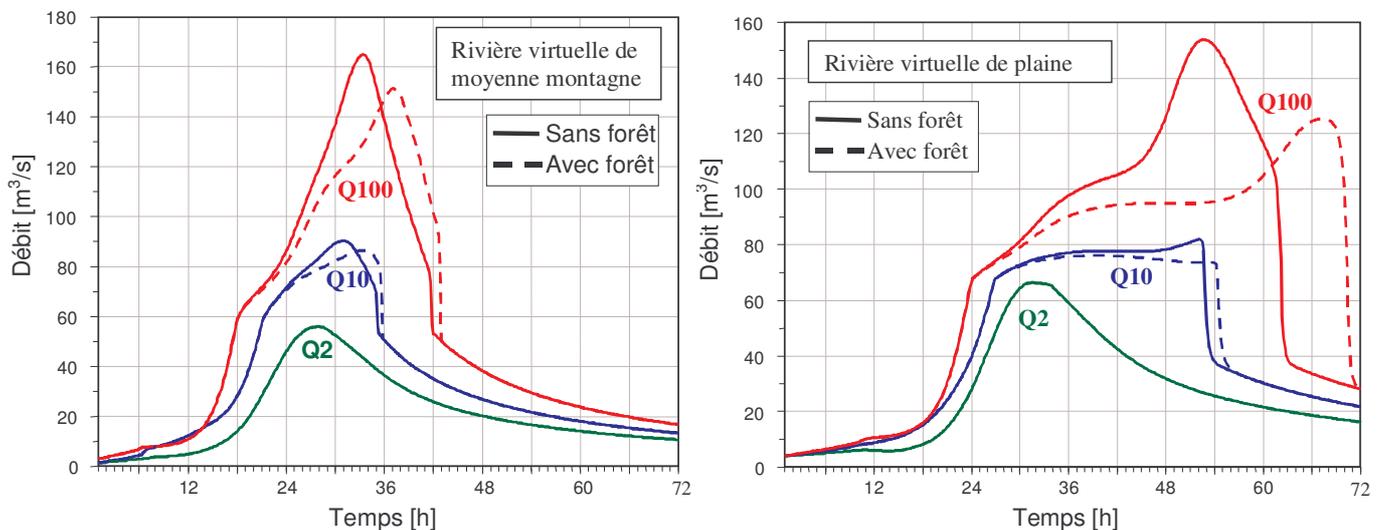


Figure 136 : impact des boisements sur le laminage des crues (RENATURE)

On constate que les boisements permettent d'améliorer de façon significative le laminage des rivières de plaine. Par contre, leur effet est limité pour les rivières de moyenne montagne. A nouveau, la pente et la largeur du lit majeur apparaissent comme les facteurs les plus limitants.

Longueur du cours d'eau et laminage

Jusqu'ici nous avons toujours considéré une longueur de cours d'eau de 30 km. Pour tester l'influence de ce paramètre sur le laminage, nous avons relevé l'hydrogramme de crue à des distances différentes le long de la rivière virtuelle de plaine. Pour que le laminage soit plus manifeste, nous n'injections pas de débit en route. Il s'agit de la crue centennale (figure 137).

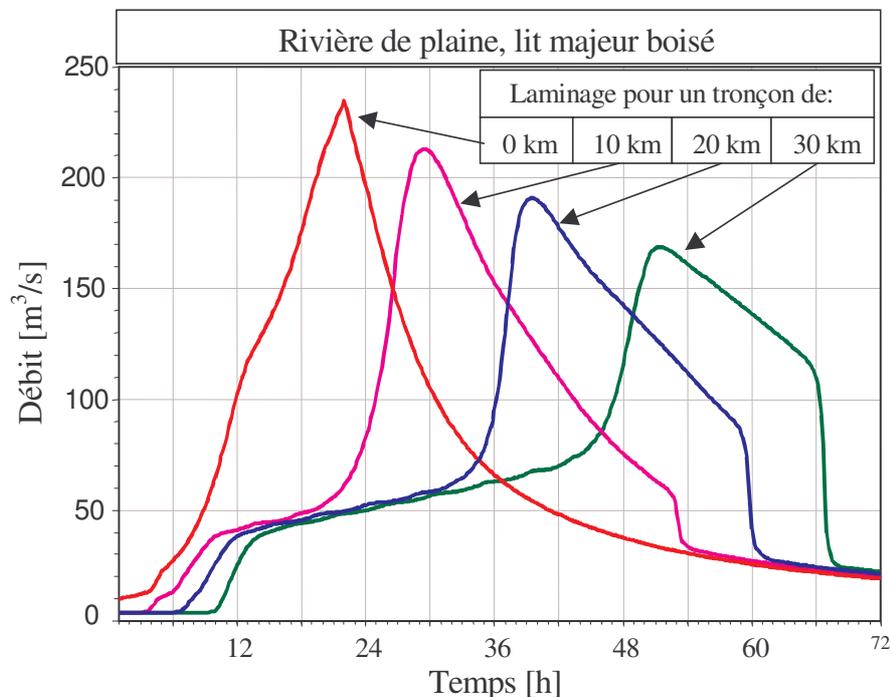


Figure 137 : efficacité du laminage en fonction de la longueur de rivière renaturée

Sur la figure ci-dessus, on observe que le laminage naturel est proportionnel à la longueur de cours d'eau renaturée. Les projets de renaturation doivent donc être envisagés à grande échelle.

La renaturation des rivières (suppression des digues, boisement...) peut être un moyen efficace pour réduire l'aléa. Mais ce type d'aménagement s'adresse aux rivières à faible pente et pour lesquelles il subsiste suffisamment d'espace pour l'épandage des crues. La vallée de la Thur est mal adaptée pour développer ce type de projet, car la pente est forte et la plus grande partie du lit majeur est déjà urbanisée.

3.2.3.3 Equilibre géomorphologique de la rivière

Dans l'approche prospective que nous avons menée, nous avons considéré que le lit mineur du cours d'eau conserve la morphologie actuelle. Cette hypothèse est loin d'être vérifiée lorsqu'on envisage une renaturation totale de la rivière. La morphologie des cours d'eau est souvent en équilibre dynamique, mais les ajustements morphologiques peuvent parfois prendre plusieurs années (PIEGAY et STROFFEK, 2000). Si la rivière change profondément de morphologie, cela peut avoir des conséquences sur le laminage des crues.

Fuseaux de mobilité

Les projets de renaturation des cours d'eau sont souvent l'occasion de définir des fuseaux de mobilité dans lesquels la rivière peut divaguer librement (MALAVOI et al., 1998). Ces zones naturelles sont très intéressantes, car les crues modifient sans cesse la topographie en ouvrant de nouveaux chenaux et en déposant des alluvions. La dynamique végétale est entretenue par ces bouleversements réguliers et on peut observer toutes les strates de végétation sur une surface limitée. La biodiversité de ces zones est très importante, tant pour la flore que pour la faune.

Sur les cours d'eau de montagne, on assiste parfois à une mobilité impressionnante du lit mineur, celui-ci pouvant se déplacer de plusieurs dizaines de mètres à l'occasion d'une crue. La divagation du lit mineur tend à recréer, plus ou moins rapidement, la morphologie naturelle de la rivière qui dépend de la pente de la vallée et de la granulométrie des alluvions dans laquelle elle fraye son passage.

Dans les vallées vosgiennes, la plupart des cours d'eau présentaient une morphologie à tresses dans la basse vallée et la zone de piémont (SCHMITT, 2001). Lorsqu'on crée des fuseaux de mobilité, comme dans le cas de la zone nature de la Thur, on observe dans un premier temps la mise en place d'un large lit moyen dans lequel divague le lit mineur. Cet ajustement morphologique n'est pas sans conséquences sur le laminage des crues, car le lit moyen permet de faire transiter sans débordement des crues de périodes de retour élevées. On observe donc moins souvent l'inondation des prairies environnantes, ce qui est contradictoire avec l'objectif initial de la renaturation. Nous avons testé l'impact de cet ajustement morphologique sur le laminage des crues.

Impact hydraulique des ajustements morphologiques

A partir de la rivière virtuelle de moyenne montagne, nous avons créé une nouvelle géométrie de cours d'eau intégrant un lit moyen capable de faire transiter la crue vingtennale. Le profil en long est inchangé, mais le profil en travers est adapté pour correspondre à cette hypothèse (figure 138).

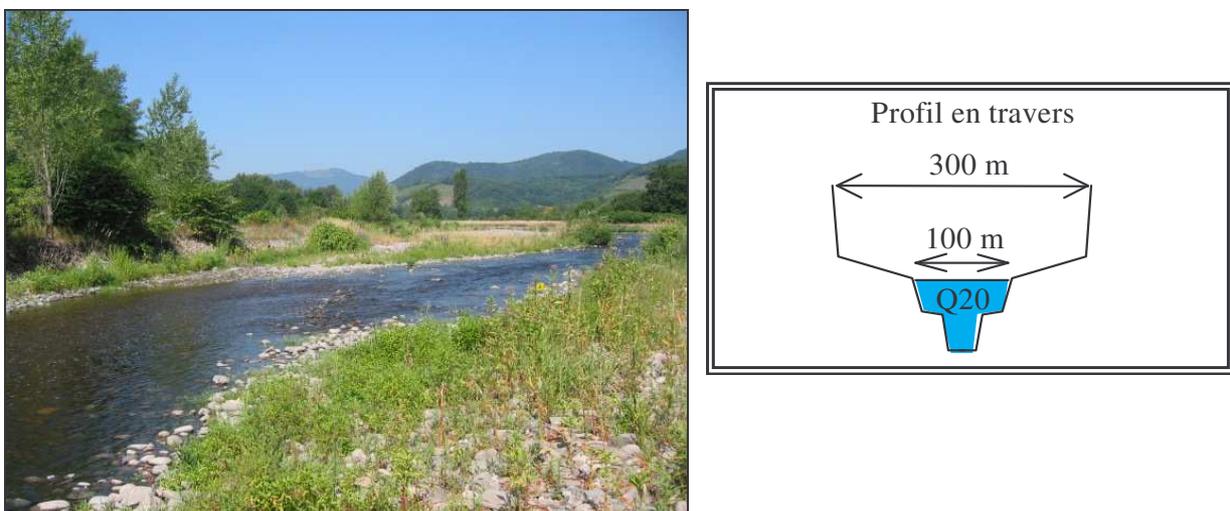


Figure 138 : géométrie de la rivière virtuelle après ajustement morphologique

Nous avons considéré une largeur de divagation d'une centaine de mètres, car c'est ce qu'on peut observer dans la vallée de la Thur, sur la zone nature entre Thann et Cernay (photo de la figure 138). Les résultats obtenus en terme de laminage sont comparés à la situation RENATURE sans ajustement morphologique (figure 139). Nous présentons les crues biennale, décennale et centennale.

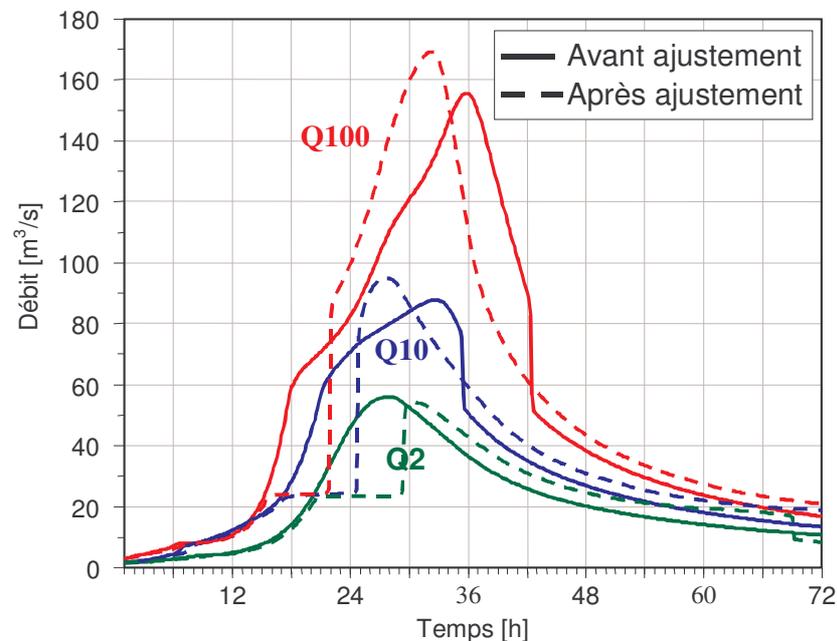


Figure 139 : conséquence d'un ajustement morphologique sur le laminage des crues

On constate que l'ajustement morphologique a pour effet de diminuer le laminage des crues, ce qui entraîne une hausse du débit de pointe. Toutefois, cette incision du cours d'eau semble n'être qu'une étape dans la mise en place du fuseau de mobilité. A long terme, il est probable que le cours d'eau retrouve un équilibre plus favorable au laminage des crues. L'étude des ajustements géomorphologiques dans les fuseaux de mobilité, à moyen et long terme, permettrait d'apporter une réponse plus juste à la question de leur impact sur le laminage des crues.

Certains projets de renaturation prévoient la création artificielle d'un lit moyen de forte débitance. Cela permet de diminuer significativement les hauteurs d'eau localement, mais on constate que les conséquences en terme de laminage des crues peuvent être négatives à l'aval du tronçon aménagé.

Intégration des processus géomorphologiques à la prospective

La géomorphologie est une discipline scientifique complexe, car les facteurs qui influencent l'équilibre d'un cours d'eau sont nombreux. La plupart des rivières sont en cours d'ajustement morphologique suite aux aménagements massifs de la fin du XX^e siècle. Aujourd'hui, on n'observe pas un état de référence, mais un état transitoire sur une trajectoire d'ajustement. La compréhension de la dynamique actuelle d'un cours d'eau est indispensable pour prévoir les futurs possibles du tronçon étudié (BRAVARD et al., 1999).

La renaturation des rivières ne doit pas mener à un abandon complet de la gestion des érosions de berges. Dans certains cas il peut être souhaitable de maintenir une certaine stabilité morphologique dans le but de conserver une bonne inondabilité.

La renaturation n'offre pas des perspectives intéressantes en terme de réduction de l'aléa dans les vallées de moyenne montagne. S'il ne faut pas attendre de miracles de la restauration des champs d'expansion de crues d'un point de vue hydraulique, on doit néanmoins poursuivre les efforts visant à rétablir un meilleur fonctionnement écologique des hydrosystèmes. La renaturation contribue aussi à la protection de la ressource en eau, tant du point de vue quantitatif que qualitatif. Ces projets s'inscrivent bien dans une démarche de gestion intégrée, car ils contribuent au développement durable du cours d'eau à l'échelle du bassin versant.

Nous avons poursuivi la démarche prospective afin de dégager des plans d'action garantissant une gestion intégrée du risque d'inondation pour les rivières de moyenne montagne.

3.3 Vers une protection durable contre les crues

La prospective de renaturation a montré que la réouverture des champs d'expansion de crues ne permet pas une réduction significative de l'aléa dès lors que la pente du cours d'eau est forte. Nous avons également montré que l'endiguement d'une vallée de moyenne montagne aggrave les crues de périodes de retour inférieures à l'objectif de protection. Mais pour les crues plus fortes que l'objectif de protection, les endiguements permettent une meilleure rétention de la pointe de crue et ainsi un laminage efficace des crues. Partant de ce constat, et étant à la recherche d'une gestion durable des inondations, nous proposons une prospective d'endiguement généralisé (cf. § 3.3.1). Dans un deuxième temps, nous présentons une prospective intégrant le changement climatique, afin de quantifier son impact sur le risque d'inondation à l'échelle du bassin versant (cf. § 3.3.2). Enfin, nous proposons une nouvelle gestion du risque d'inondation, fondée sur une stratégie de résilience (cf. § 3.3.3).

3.3.1 Endiguement généralisé d'une vallée

L'endiguement des cours d'eau a été l'aménagement de protection prédominant jusqu'à la fin du XX^e siècle. Aujourd'hui, les digues sont perçues moins positivement par les aménageurs. Nous voulons donner une vision rationnelle de cet aménagement de protection. Les pays du Nord de l'Europe ont une relation aux inondations et aux endiguements très différente de la nôtre. Ils font confiance aux ouvrages de protection, mais ils ont conscience de leur risque de rupture ou de dépassement. Nous proposons d'étudier si les endiguements constituent une bonne option d'aménagement pour la gestion intégrée du risque d'inondation, dans le contexte des rivières de moyenne montagne. Dans un premier temps, nous rappelons l'objectif des endiguements (cf. § 3.3.1.1). Ensuite, nous présentons les résultats de la prospective d'endiguement appliquée à la vallée de la Thur et à la rivière virtuelle (cf. § 3.3.1.2). Enfin, nous mettons en évidence les limites des endiguements dans le cadre d'une gestion intégrée du risque d'inondation (cf. § 3.3.1.3).

3.3.1.1 Objectif des endiguements

Les digues constituent le moyen de lutte contre les inondations le plus direct et le plus simple. Elles créent une frontière étanche entre le champ d'inondation et les terrains à protéger, tant que les crues ne dépassent pas l'objectif de protection. Une analyse coût - bénéfice d'un projet d'endiguement généralisé est proposée.

Objectif de protection

La protection contre les crues ne pourra jamais être totale, car les crues les plus rares sont très violentes. Il faudrait construire des ouvrages de protection colossaux pour les

contenir, le coût serait hors de proportion avec la valeur des enjeux exposés. C'est pour cette raison que le dimensionnement des digues nécessite la définition de l'**objectif de protection** de l'ouvrage.

Nous avons vu plus haut que la vallée de la Thur a été progressivement protégée contre des crues de périodes de retour allant de 10 ans à 50 ans. Il n'y a pas d'objectif de protection bien défini, car beaucoup d'aménagements ont été édifiés de manière empirique. Les digues et les murs les plus récents offrent cependant une protection plus homogène, car ils ont tous été dimensionnés pour contenir la crue centennale. Toutefois, il subsiste des incertitudes sur l'estimation du débit de référence et l'efficacité réelle des protections.

La crue centennale est l'objectif de protection le plus couramment utilisé dans les zones urbanisées. En effet, on estime qu'avec ce niveau de protection un riverain sédentaire est susceptible de subir en moyenne une inondation de telle ampleur dans sa vie. Ce risque est considéré comme acceptable, car il n'y a pas répétition du traumatisme. Toutefois, l'objectif de protection ne doit pas être imposé aux décideurs. Dans certains cas, on peut être amené à déterminer par la négociation un objectif de protection plus fort ou plus faible :

- Dans le cas des zones agricoles, par exemple, le risque encouru ne justifie pas un objectif de protection aussi élevé que dans les zones urbanisées. On préconise au contraire une non protection assortie d'une indemnisation (par assurance ou solidarité) des exploitants si les crues sont préjudiciables et fréquentes.
- Si des sites particulièrement sensibles sont menacés, comme des pôles chimiques ou hospitaliers, il peut être prévu un objectif de protection plus élevé. C'est pour cette raison qu'il est important d'étudier l'extension d'une crue plus forte que la crue centennale.

Les digues doivent être dimensionnées conformément à l'objectif de protection défini par les acteurs. Leur positionnement dépend quant à lui de la vocation de la protection.

Protection rapprochée et protection des zones constructibles

La plupart des digues sont construites pour protéger des constructions existantes se trouvant dans une zone où l'aléa est fort. Ces constructions présentent un risque fort qui n'est pas acceptable pour la société. Afin de conserver un lit majeur le plus large possible, on place en général les digues au plus près de ces zones urbanisées. C'est ce qu'on appelle une **protection rapprochée**. Ces endiguements permettent de conserver une partie du lit majeur pour l'étalement des crues. Les zones non protégées sont en principe déclarées inconstructibles.

Dans le cas de vallées très étroites ou en présence d'une pression foncière importante, certains élus demandent une protection plus large permettant l'extension de l'urbanisation dans le lit majeur. La réglementation française est assez restrictive dans ce domaine, puisqu'elle oblige les aménageurs à compenser le volume de rétention soustrait à la zone inondable par du surstockage ou de nouvelles zones inondables. Les endiguements non rapprochés restreignent de façon importante la section d'écoulement du cours d'eau (figure 140) ce qui est susceptible d'accélérer les crues. En cas de rupture de digue, le risque derrière la digue est aggravé, car les hauteurs d'eau peuvent être très importantes.

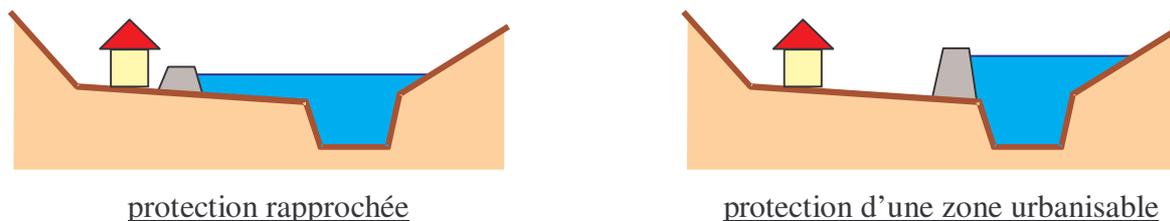


Figure 140 : exemple de protection rapprochée et de protection d'une zone urbanisable

Nous avons retenu la seconde option d'aménagement dans le cadre du test prospectif d'endiguement de la vallée de la Thur. En effet, nous cherchons à accentuer l'effet des endiguements sur le routage des crues. Les digues que nous avons intégrées protègent l'ensemble du fond de vallée contre la crue centennale, permettant ainsi de supprimer les zones à risque fort et moyen.

Analyse coût - bénéfice

Les digues sont des ouvrages peu coûteux, car il s'agit essentiellement de travaux de terrassement. Dans le cas où l'on dispose de peu de place entre les zones urbanisées et la rivière, on doit construire des murs de rive ce qui est plus onéreux.

On peut observer la variation du coût moyen annuel des dommages en fonction de l'objectif de protection adopté sur la vallée de la Thur (figure 141). On note qu'une protection contre la crue centennale permettrait d'économiser plus de 800 000 €/an de dommages potentiels.

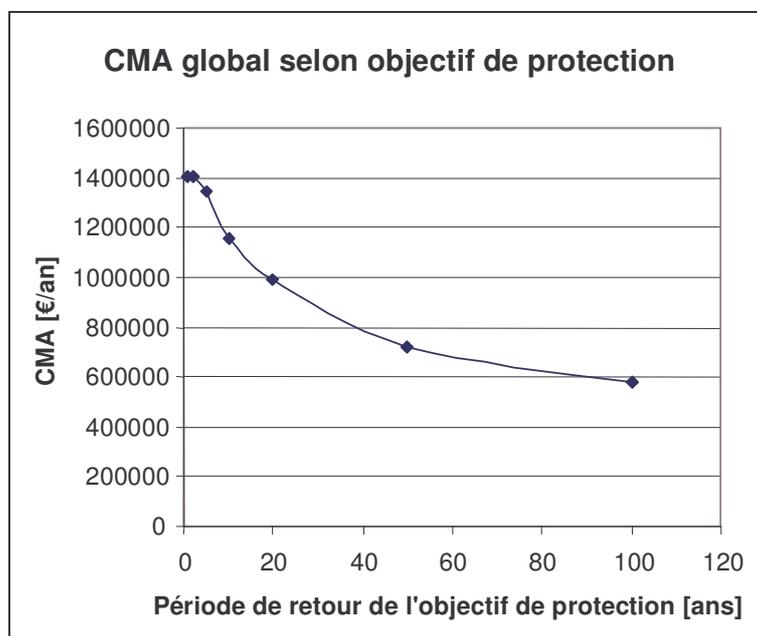


Figure 141 : variation du CMA des dommages sur la Thur selon l'objectif de protection

En comparant le coût de la protection à l'économie de coût moyen annuel, on peut calculer le temps de retour sur investissement de l'aménagement. La protection contre les crues des zones déjà urbanisées est le plus souvent rentable d'un point de vue économique. Ce raisonnement conduit en général à une protection contre des périodes de retour élevées (GILARD et GENDREAU, 1998b).

La protection des enjeux par endiguement est une réponse efficace et économiquement rentable pour lutter contre les inondations. Nous avons exploré les conséquences positives et négatives de ces aménagements sur les inondations dans la vallée de la Thur.

3.3.1.2 Prospective d'endiguement généralisé

Le modèle hydraulique dont nous disposons sur la Thur peut être modifié pour simuler un endiguement généralisé du cours d'eau, avec un objectif de protection contre la crue centennale. La modification des modèles porte exclusivement sur le modèle hydraulique. Nous avons observé l'impact des endiguements sur l'extension des crues et sur leur laminage.

Modification de la géométrie du modèle hydraulique

Nous avons choisi de modéliser un endiguement de la rivière contre une crue centennale, afin de visualiser ses effets sur l'inondation et sur les hydrogrammes produits à l'aval du tronçon étudié. Avec logiciel HEC-RAS, les digues sont matérialisées par des points de levées (figure 142).

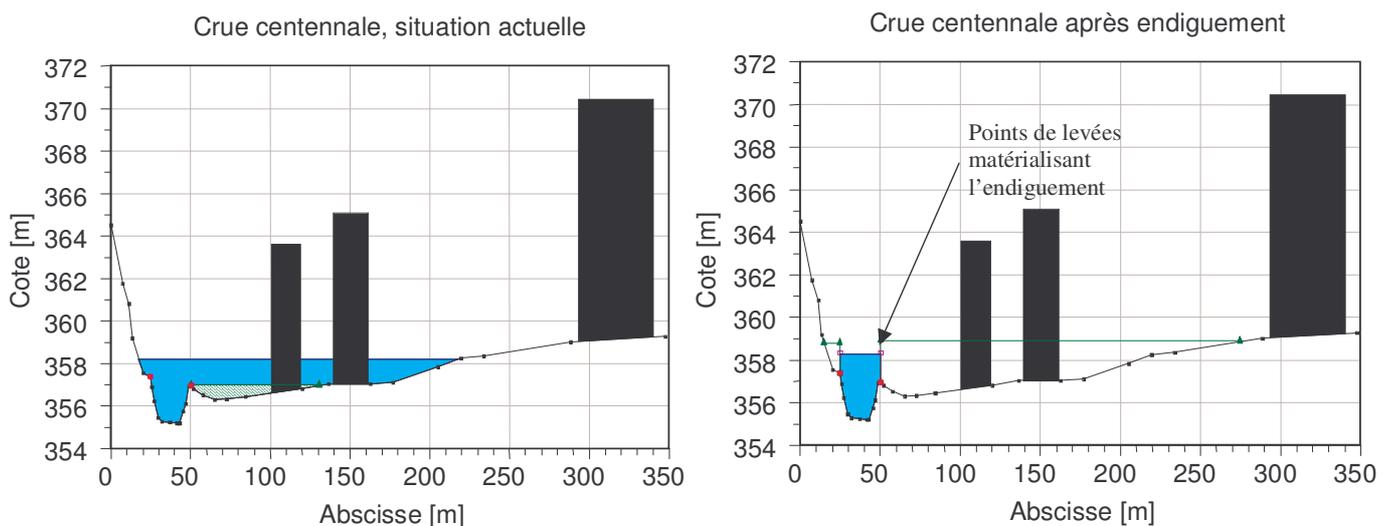


Figure 142 : exemple de profil en travers avant et après endiguement (crue centennale)

La hauteur des digues a été ajustée, pour qu'en tout point les digues protègent de la crue centennale. Nous avons pris une marge de 10 cm pour assurer le non débordement. L'extension de l'inondation pour les crues de périodes de retour inférieures ou égales à 100 ans est ainsi limitée au lit mineur. Cet aménagement extrême du cours d'eau est destiné à rendre plus tangible l'effet des endiguements sur le laminage des crues. Notre approche est plus pédagogique que technique.

Impact des endiguements sur l'extension des crues

On peut observer (figure 142) que dans les zones urbanisées qui étaient inondées par la crue centennale, les endiguements diminuent le niveau d'aléa. En effet, ils empêchent tout débordement pour les crues plus fréquentes que la crue centennale. Nous rappelons que nous

avons placé des digues continues sur tout le linéaire du cours d'eau, y compris au niveau des zones naturelles.

Dans certains cas, l'endiguement ne modifie pas la situation actuelle. En effet, grâce à l'incision du lit mineur ou aux protections existantes, la crue centennale n'est pas toujours débordante. L'existence de ces zones protégées explique le niveau de risque contenu de la vallée de la Thur, malgré la forte densité de population en lit majeur.

Les endiguements étant dimensionnés conformément à l'objectif de protection, la crue bicentennale surverse (figure 143).

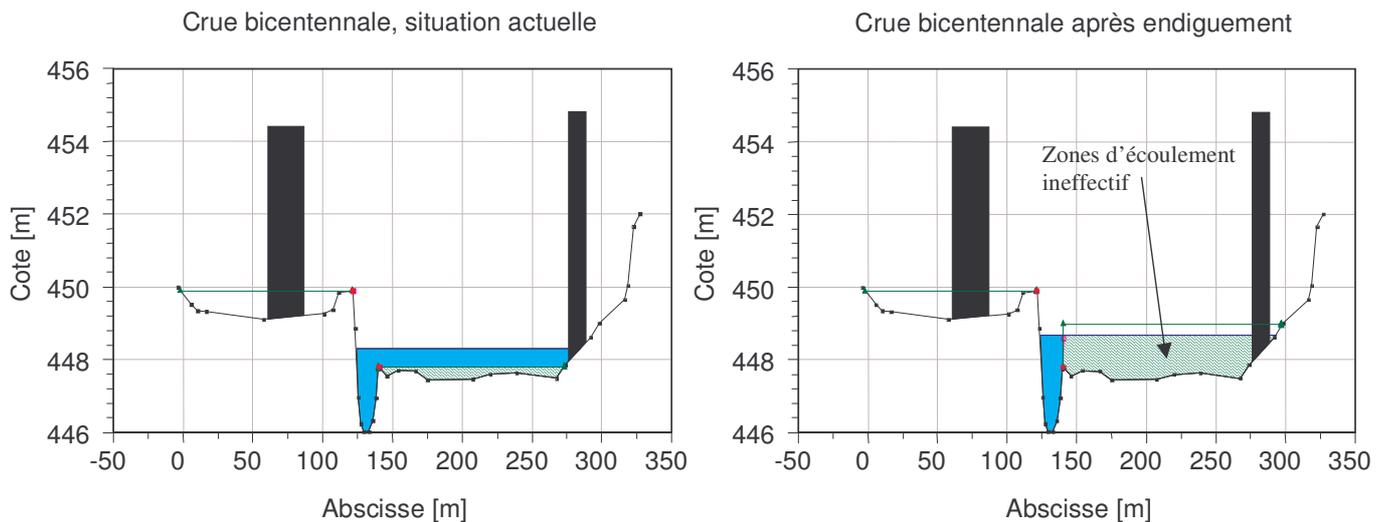


Figure 143 : extension de la crue bicentennale avant et après endiguement

La principale différence entre la situation actuelle et après endiguement vient du fait qu'une partie du volume de la crue est retenue derrière les digues. Ainsi ce volume d'eau ne participe pas à l'écoulement. Par ailleurs, on observe une augmentation des hauteurs d'eau en lit majeur, car l'endiguement impose une ligne d'eau plus élevée en lit mineur.

Impact sur le laminage des crues

Le test de renaturation effectué préalablement sur la rivière virtuelle (cf. § 3.1.2) a montré que les endiguements aggravent les crues de périodes de retour inférieures à l'objectif de protection, tandis qu'ils améliorent artificiellement le laminage pour les crues plus fortes. On retrouve ces résultats pour la vallée de la Thur lorsqu'on observe les hydrogrammes produits par le modèle hydraulique (figure 144). On a utilisé les événements de référence sélectionnés pour le diagnostic.

Pour les crues de périodes de retour inférieures à l'objectif de protection, l'endiguement généralisé de la vallée de la Thur provoquerait une aggravation importante du débit de pointe et de la vitesse de propagation de la crue. Pour les crues plus fortes que l'objectif de protection, le laminage artificiel produit par la surverse des digues est très efficace. Cela permet de limiter le débit de pointe à l'aval. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que ce laminage artificiel est produit par l'inondation de zones urbanisées implantées à l'abri des digues.

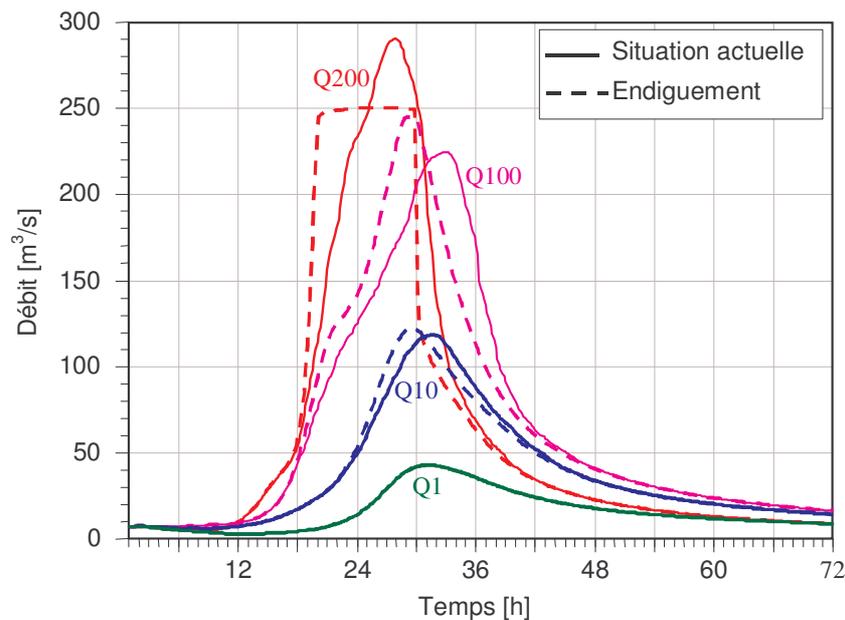


Figure 144 : comparaison du laminage obtenu avant et après endiguement

La prospective d'endiguement envisagée sur la Thur montre que ce type d'aménagement permet une protection efficace contre les crues. Une équipe polonaise a fait le même constat en réalisant un test similaire sur la vallée de la Bierbza (MIROSLAW-SWIATEK et al., 2003). Cependant l'endiguement d'une rivière a un certain nombre d'impacts négatifs.

3.3.1.3 Les limites des endiguements

Le but de la prospective est d'identifier des modes de gestion des inondations qui soient respectueux de tous les usages de l'eau à l'échelle du bassin versant. Les endiguements sont apparemment efficaces, mais ils sont loin d'être sans défauts : c'est une gestion localisée, à court terme et elle n'offre qu'une protection partielle.

Gestion localisée

Les endiguements constituent sans aucun doute une réponse efficace au plan local. La stratégie qui consiste à protéger localement les enjeux sans se soucier des conséquences de l'aménagement à l'aval a conduit à la situation complexe que l'on doit gérer aujourd'hui. Le test d'endiguement généralisé mené sur la Thur montre clairement que la suppression totale des champs d'expansion des crues a un impact négatif pour les riverains situés à l'aval.

Le premier impact est une augmentation du débit de pointe, et donc des hauteurs d'eau maximales, pour les crues de périodes de retour inférieures ou égales à l'objectif de protection. Or, la plupart des ouvrages existants (ponts, murs, digues) sont soit en limite de capacité, soit déjà dépassés pour les crues moyennes à fortes. Une augmentation de seulement 20 m³/s peut faire une différence énorme si cette augmentation de débit est supérieure à la marge actuellement disponible sur les ouvrages. C'est pour cette raison que l'endiguement des rivières a souvent tendance à être « contagieux » de l'amont vers l'aval. La protection des uns entraîne l'inondation des autres et ainsi de suite...

Le second impact est l'augmentation de la vitesse de propagation des crues. Pour la crue centennale l'onde de crue, qui met actuellement 6 heures à transiter de l'amont vers l'aval, ne mettrait plus que 3 heures si la rivière était endiguée. Cela rendrait l'annonce des crues très difficile. L'organisation des secours serait rendue très difficile et les conséquences en terme de dommages et de pertes en vies humaines seraient très graves. Le développement de protections individuelles de type batardeaux serait impossible avec une onde de crue aussi rapide.

Gestion à court terme

Un endiguement généralisé ne permet pas une gestion durable et intégrée des inondations, car les endiguements ont un impact sur l'équilibre géomorphologique du cours d'eau, l'écologie des hydrosystèmes et la ressource en eau.

En effet, la suppression des écoulements en lit majeur a pour effet d'augmenter sensiblement la force tractrice dans le lit mineur. Le nouveau débit à plein bord étant la crue centennale, la stabilité du lit mineur serait mise à mal dès les premières crues fortes. La pérennité des digues et des murs ne serait pas longtemps assurée. Il est possible de stabiliser la morphologie du cours d'eau à l'aide de protections de berges (enrochement, tunage...), mais cela a un coût non négligeable, ainsi qu'un impact négatif sur la faune et la flore des cours d'eau.

D'un point de vue écologique l'endiguement généralisé d'un cours d'eau est lourd de conséquences pour les hydrosystèmes. La biodiversité animale et végétale se trouverait fortement diminuée, car la diversité des habitats serait réduite au seul lit majeur endigué. Les écosystèmes alluviaux riverains n'étant plus soumis à des inondations régulières, ils perdraient leur fonctionnalité et leur richesse.

La ressource en eau pourrait également se dégrader, tant du point de vue quantitatif que qualitatif. La recharge des nappes alluviales et le soutien des étiages seraient réduits. L'autoépuration des eaux assurée par les prairies et les forêts alluviales ne serait plus active, car le niveau de la nappe alluviale ne varierait plus beaucoup au cours de l'année.

L'endiguement des cours d'eau ne peut en aucun cas être considéré comme une gestion durable et intégrée du risque d'inondation. La justification de ce type de protection ne peut se faire que d'un point de vue économique et même sur ce point la protection offerte n'est que partielle.

Protection partielle

Les digues sont dimensionnées en fonction de l'objectif de protection retenu par les décideurs. Les crues plus fortes surversent et elles occasionnent des dégâts importants.

Dans le cas de la Thur, on peut observer la contribution des 8 crues de référence au coût moyen annuel (figure 145). On constate que les crues de périodes de retour supérieures ou égales à 100 ans représentent plus de 40 % des dommages (les résultats détaillés sont disponibles en **Annexe 7**).

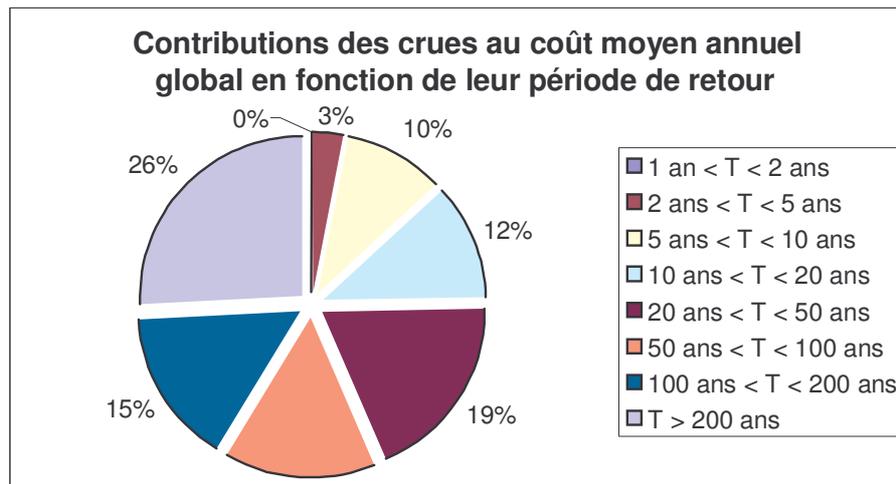


Figure 145 : contribution des crues de référence au coût moyen annuel des dommages

Même si on atteint une protection complète de la vallée contre une crue centennale, plus de 40 % des dommages ne pourront pas être évités. Il faut rendre les décideurs attentifs à cette limite importante, notamment en terme de gestion de l'urbanisation derrière les digues. Si on laisse se développer l'urbanisation derrière les digues, le coût moyen annuel augmentera. En effet, ces nouvelles constructions sont soumises à un risque résiduel faible mais réel. Il faut également tenir compte du risque de rupture de digue qui est toujours présent et qui contribue à augmenter le coût moyen annuel des dommages.

L'endiguement des vallées de moyenne montagne ne permet pas la gestion intégrée du risque d'inondation. Ce type d'aménagement n'est pas durable et il ne tient pas compte des besoins à l'échelle du bassin versant. Il ne respecte pas non plus les usages non marchands de l'eau que sont les hydrosystèmes et la biodiversité. Par ailleurs, la construction de ces protections contre les crues donne un faux sentiment de sécurité à des riverains qui ont déjà trop peu de culture du risque. La perte de conscience collective du risque est peut-être la conséquence la plus dangereuse des endiguements.

Nous avons poursuivi la prospective en abordant une question d'actualité : quelle est la sensibilité du risque d'inondation au changement climatique ?

3.3.2 Prospective de changement climatique

Jusqu'à présent, dans nos scénarios de prospective, nous avons fait l'hypothèse de la stationnarité des conditions hydrologiques. Nous avons toujours utilisé les événements de référence sélectionnés pour établir le diagnostic du risque. On observe aujourd'hui que le climat change de plus en plus vite sous l'influence des activités humaines. Ces changements pourraient avoir des répercussions sur la pluviométrie à l'échelle régionale. Ainsi, il nous a paru intéressant d'étudier la sensibilité des inondations au changement climatique. Nous présentons tout d'abord les scénarios de changement climatique que nous avons considérés (cf. § 3.3.2.1). Puis, nous donnons les résultats de la prospective de changement climatique

appliquée à la vallée de la Thur (cf. § 3.3.2.2). Enfin, nous proposons une discussion sur la méthode employée et les résultats obtenus (cf. § 3.3.2.3).

3.3.2.1 Scénarios de changement climatique

Les recherches en cours sur le changement climatique sont très actives. Les modèles d'évolution du climat sont sans cesse améliorés et ils permettent de fournir des informations de plus en plus détaillées sur l'évolution attendue de la météorologie à l'horizon 2050 ou 2100. La plupart des scénarios sont basés sur une hypothèse de réchauffement climatique. Nous avons utilisé des scénarios couramment employés pour le bassin Rhin-Meuse, ce qui peut poser des problèmes de changement d'échelle.

Hypothèses de travail

Les activités humaines, et notamment la combustion des énergies fossiles, ont pour effet une augmentation importante de la teneur en gaz à effet de serre dans l'atmosphère. La conséquence attendue est un réchauffement rapide de l'atmosphère, qui pourrait avoir des conséquences importantes sur la météorologie et l'hydrologie (GIEC, 2001). Les conséquences suivantes sont qualifiées par le GIEC de très probables :

- Températures maximales plus élevées et vagues de chaleur ayant des conséquences sur la santé, l'élevage, les cultures et la consommation électrique.
- Températures minimales plus élevées, hivers plus doux, donc un effet positif sur la consommation d'énergie et la production agricole, mais une prolifération de certaines espèces au détriment des autres.
- Episodes de précipitations intenses plus fréquents, qui auraient pour effet d'augmenter les dommages dus aux inondations, d'accélérer l'érosion des sols, mais d'améliorer la recharge des nappes phréatiques.

On constate que le réchauffement climatique peut avoir des conséquences importantes sur l'hydrologie et plus particulièrement sur le risque d'inondation. Nous avons donc choisi d'examiner cette question en prospective.

Il existe également des scénarios qui prévoient un refroidissement climatique suite à une Inversion de la Circulation Thermohaline de l'Océan Atlantique Nord (ICTOAN). Cette inversion pourrait survenir à tout moment, si elle survenait en 2050 on retournerait à la situation actuelle. Par curiosité, nous avons envisagé l'effet qu'aurait un tel scénario sur le risque d'inondation s'il survenait dès maintenant. L'inversion de la circulation thermohaline aurait pour effet un refroidissement marqué et une diminution des précipitations.

Tous ces scénarios comportent de grandes incertitudes, mais ils permettent une exploration quantitative des conséquences du changement climatique sur les inondations.

Scénarios pour le bassin Rhin-Meuse

Nous avons utilisé les scénarios de type WB21 issus des modèles du KNMI (institut météorologique hollandais) qui sont utilisés dans les travaux de recherche menés dans le bassin Rhin-Meuse (MIDDELKOOP et KWADIJK, 2000 ; DROGUE et al., 2004). Pour tenir

compte des incertitudes des climatologues sur l'évolution de la météorologie, on distingue pour chaque échéance (2050 ou 2100) une estimation centrale (EC) et une estimation haute (EH). Le scénario de refroidissement climatique est appelé ICTOAN (Inversion de la Circulation Thermohaline dans l'Océan Atlantique Nord). Les conséquences attendues sur les précipitations et l'évapotranspiration sont les suivantes (tableau 22).

Variation des précipitations et de l'évapotranspiration			
Scénarios	Saison	ΔP	ΔETP
2050 EC	Eté	+ 10 %	+ 4 %
	Hiver	+ 10 %	+ 4 %
2100 EC ou 2050 EH	Eté	+ 20 %	+ 8 %
	Hiver	+ 20 %	+ 8 %
2100 EH	Eté	+ 40 %	+ 16 %
	Hiver	+ 40 %	+ 16 %
ICTOAN	Eté	- 20 %	- 8 %
	Hiver	- 20 %	- 8 %

Tableau 22 : modifications des précipitations et de l'évapotranspiration selon les scénarios de changement climatique (source KNMI)

Cette modification des précipitations est valable pour les cumuls sur 10 jours aussi bien que pour l'intensité de chaque averse. On peut noter que les scénarios ci-dessus n'introduisent pas de différence entre l'été et l'hiver, la variation étant identique pour les deux saisons. Pour les régions plus continentales on prévoit une diminution des précipitations en été (MENZEL et BURGER, 2002).

Changement d'échelle

La difficulté majeure de l'intégration de scénarios de changement climatique dans une modélisation hydrologique est la question du changement d'échelle. En effet, les modèles climatiques utilisés pour donner des estimations de variation des précipitations et de l'évapotranspiration ont une résolution de plusieurs dizaines de kilomètres. Il est donc difficile de prévoir les variations réelles à échelle plus petite comme c'est le cas avec le petit bassin versant que nous étudions. Des travaux récents ont été menés au Luxembourg (DROGUE et al., 2004). Ils ont porté sur la transposition à échelle régionale des scénarios de changement climatique. Les évolutions prévues dans les scénarios de changement climatique ont été appliquées à des chroniques pluviométriques journalières historiques afin de créer de nouvelles chroniques de pluie intégrant le changement climatique. Les résultats montrent une sensibilité différente des bassins versants en fonction du relief, de la pédologie et de l'occupation du sol.

Pour appliquer les scénarios de changement climatique à la vallée de la Thur, nous avons appliqués les scénarios de changement climatique aux épisodes de pluie générés par la méthode SHYPRE. Nous avons modifié les hyétogrammes générés par le modèle de pluie, afin de reproduire une augmentation ou une diminution uniforme de la lame d'eau précipitée.

3.3.2.2 Prospective appliquée à la Thur

La modification de la chaîne de modèles a porté uniquement sur le modèle de pluie. Tous les autres modèles ont été conservés à l'identique, car nous faisons l'hypothèse d'un changement climatique « toutes choses égales par ailleurs ».

Modification du modèle de pluie

Initialement, chaque hyétogramme simulé par le modèle de pluie est statistiquement équivalent à la pluviométrie actuelle. Les scénarios de changement climatique prévoyant une augmentation uniforme des précipitations quelle que soit leur durée, nous avons appliqué un coefficient multiplicateur qui augmente uniformément la lame du hyétogramme. On peut noter qu'en l'absence de raisons particulières favorisant la fréquence de certains types de temps (DROGUE et al., 2004), il est plutôt pessimiste de penser que l'augmentation porte sur les intensités à tout pas de temps. Pour chaque sous-bassin versant le coefficient de changement climatique se combine (multiplication) avec le coefficient de pluviométrie annuelle (cf. § 2.2.2.3) (tableau 23).

Bassins versants	Superficie [km ²]	Coefficient de pluviométrie annuelle	Coefficient de changement climatique	Coefficient correcteur global de la pluie
0, 1, 2, 3	21.5	1.12	1.20	1.34
4, 5, 6,	23.7	0.88	1.20	1.06
8, 9	23.9	0.67	1.20	0.80
Willer/Thur	160	1.01	1.20	1.21
Staffelfelden	250	0.88	1.20	1.07

Tableau 23 : calcul du coefficient correcteur global, scénario « 2050 EH ou 2100 EC »

On réalise une nouvelle série de simulations stochastiques permettant de générer un grand nombre d'événements de crue pour chaque scénario de changement climatique.

Augmentation du débit de pointe

La méthode SHYPRE permet d'estimer les nouvelles distributions de probabilités du débit de pointe sous l'effet du changement climatique. Les résultats sont présentés pour le bassin versant global à Staffelfelden (figure 146).

L'augmentation du débit de pointe est très nette, y compris avec le scénario le plus optimiste (2050 EC). Par exemple, le débit de pointe centennal augmenterait de plus de 20 m³/s dès 2050 et cette augmentation pourrait atteindre 80 m³/s en 2100. Dans le cas d'un refroidissement, le débit de pointe centennal diminuerait d'environ 10 m³/s.

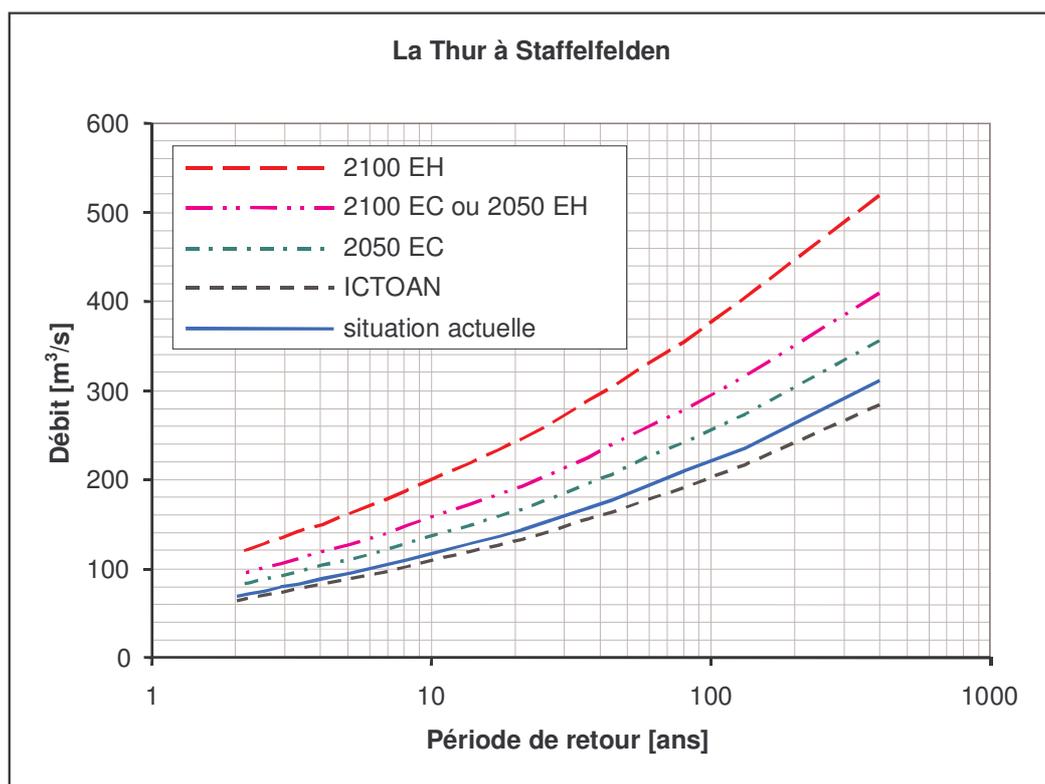


Figure 146 : distributions de probabilités du débit de pointe pour chaque scénario

On peut décrire le changement climatique sous deux angles différents :

- On compare l'évolution du débit de pointe pour une période de retour donnée.
- On observe le glissement en fréquence du débit de pointe des crues de référence actuelles. Pour chaque débit de pointe de référence on peut estimer la nouvelle période de retour après changement climatique (tableau 24).

Situation actuelle		Nouvelle période de retour [ans]			
Débit [m³/s]	Période de retour [ans]	2050 EC	2100 EC ou 2050 EH	2100 EH	2050 NAOI
117	10	6	4	2	12
142	20	10	7	3	25
183	50	25	15	7	60
220	100	55	35	14	130
264	200	110	75	25	300

Tableau 24 : glissement en fréquence des événements de référence à Staffelfelden

Le glissement en fréquence est très important : il est possible qu'en 2050 l'actuelle crue centennale n'ait plus une période de retour de 100 ans, mais de seulement 35 à 55 ans. La fréquence de cet événement extrême pourrait donc doubler, voire tripler à l'horizon 2050. Les ouvrages de protection étant construits sur la base de la crue centennale actuelle, ils n'auront plus l'efficacité escomptée dès lors que les conditions hydrologiques changent.

Pour cartographier le risque d'inondation sous l'effet du changement climatique, il faut s'assurer que le glissement en fréquence est le même pour toutes les tailles de bassins versants (figure 147).

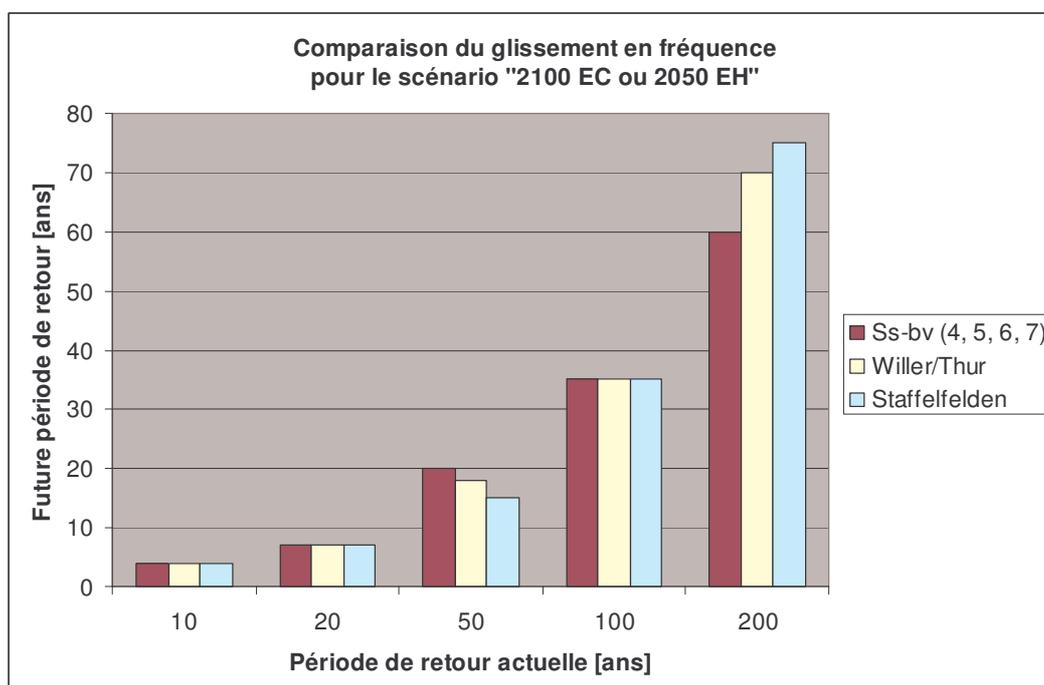


Figure 147 : comparaison du glissement en fréquence selon le bassin versant considéré

Les différences de glissement en fréquence sont minimales. On peut donc estimer que le glissement en fréquence est homogène sur l'ensemble du bassin versant de la Thur. Ainsi, les événements de références sélectionnés pour le diagnostic conservent une fréquence homogène d'amont en aval. On peut leur affecter une nouvelle fréquence selon le scénario de changement climatique considéré.

Extension du risque d'inondation et coût moyen annuel

Pour établir la nouvelle carte du risque nous avons exploité le scénario médian « 2050 EH ou 2100 EC ». Nous utilisons les enveloppes des crues de références établies pour le diagnostic, mais nous avons modifié leur fréquence en fonction des résultats obtenus ci-dessus. La grille d'analyse du risque est la même que celle utilisée pour le diagnostic et on fait l'hypothèse que la vulnérabilité n'évolue pas. La nouvelle carte de risque (figure 148) peut être comparée à la carte du risque actuel (figure 149). La cartographie complète du risque après changement climatique est présentée en **Annexe 8**.

On constate une aggravation très sensible du risque d'inondation pour l'ensemble des zones urbanisées. Les centres urbains seraient soumis à un risque fort pour la plupart des communes, alors qu'aujourd'hui ils présentent un risque moyen ou faible. Par contre, les prairies et les forêts alluviales seraient plus fréquemment inondés, ce qui représente un atout écologique.

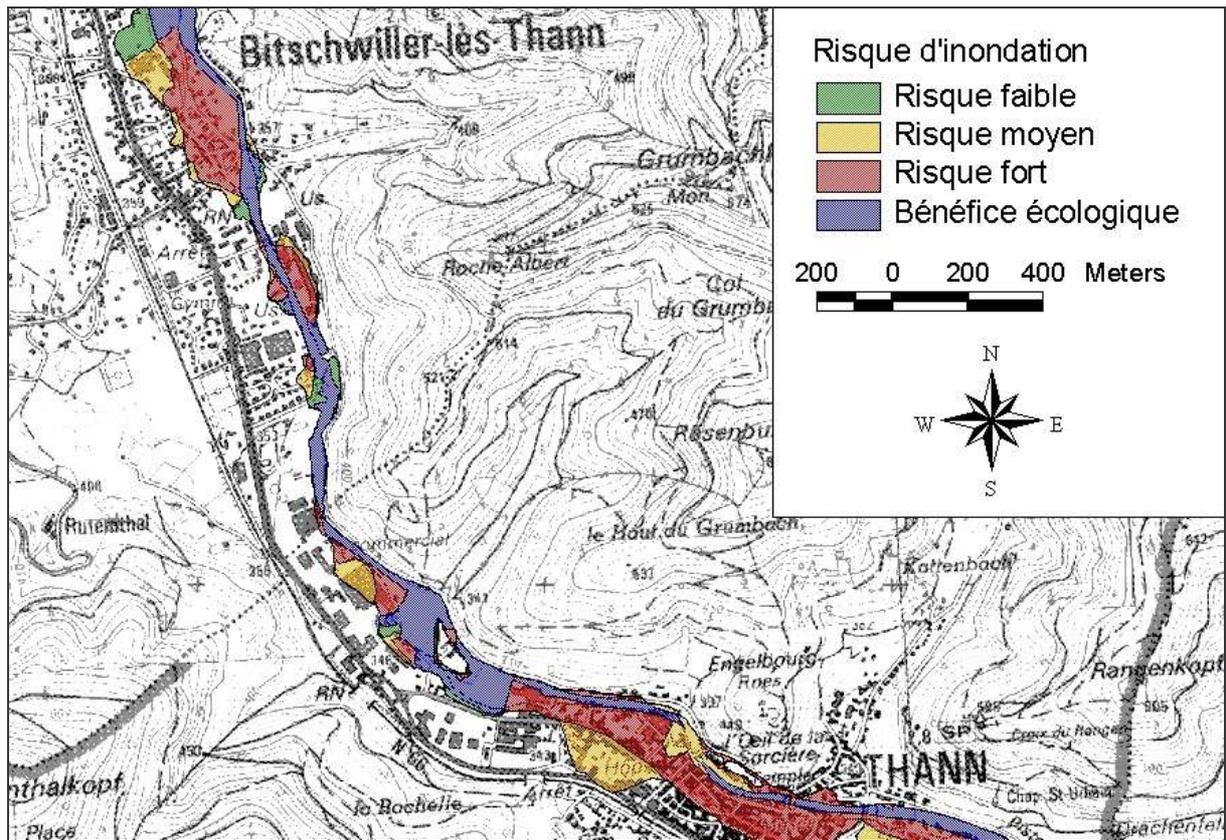


Figure 148 : nouvelle carte du risque d'inondation (scénario « 2050 EH ou 2100 EC »)

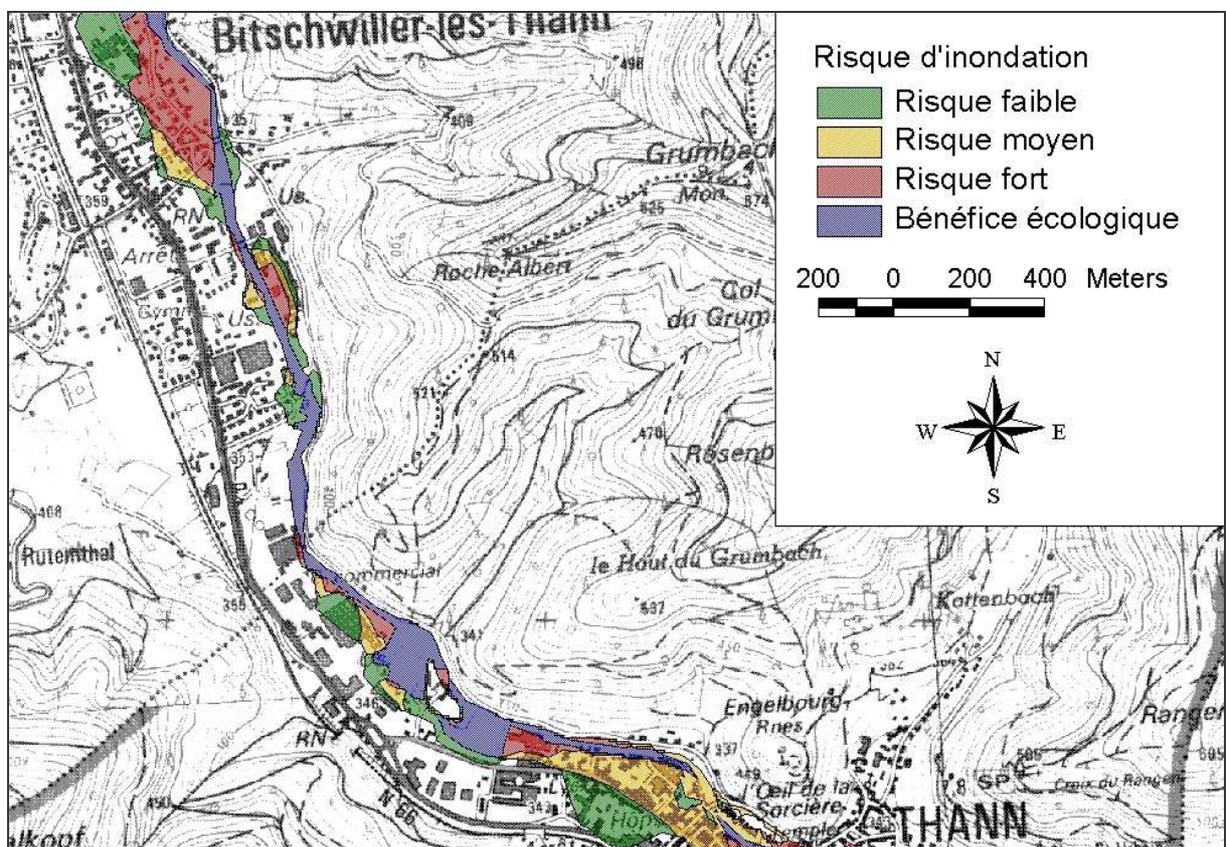


Figure 149 : carte du risque d'inondation actuel

En modifiant la fréquence de submersion des différents biens touchés par les événements de référence, on peut calculer un nouveau coût moyen annuel pour le scénario « 2050 EH ou 2100 EC » (tableau 25).

Nouvelle période de retour [ans]	Nombre d'habitations touchées H < 20 cm	Nombre d'habitations touchées H > 20 cm	Superficie de zones industrielles ou commerciales [m ²]	Superficie centre ville de Thann [m ²]
4	24	51	6540	1375
7	16	74	10180	4036
15	24	143	28556	37902
35	29	275	88489	58926
75	49	503	214943	84789
Coût Moyen Annuel CMA	1 360 000 €/an		≈ 1 760 000 €/an	≈ 940 000 €/an

Tableau 25 : évaluation quantitative du risque et calcul du coût moyen annuel

L'augmentation du coût moyen annuel est conséquente, puisqu'il atteindrait au total plus de **4 000 000 €/an** contre **1 400 000 €/an** actuellement. Pourtant il ne s'agit pas du scénario le plus pessimiste. La prospective que nous avons développée permet de prendre conscience d'une nouvelle réalité. Le climat change et par conséquent le coût des inondations pourrait augmenter malgré la réglementation de l'urbanisation et les aménagements de protection. Cette prospective apporte un éclairage nouveau sur l'évolution du risque d'inondation, mais elle a aussi un certain nombre de limites qu'il faut préciser.

3.3.2.3 Apports et limites de la prospective

La prospective permet d'explorer les futurs possibles (« futuribles ») du risque d'inondation. Le but principal du développement de cet outil est l'aide à la décision. La prospective de changement climatique constitue une première approche qui comporte un grand nombre d'incertitudes.

Pédagogie pour l'aide à la décision

Les scénarios de changement climatique que nous avons utilisés sont relativement grossiers, mais ils permettent tout de même de mettre en évidence la sensibilité d'un bassin versant au changement climatique. L'évolution de l'intensité des crues est un sujet préoccupant pour les aménageurs. Il est important de leur donner une vision réaliste du risque d'inondation à moyen et long terme. Nous avons choisi d'utiliser des hypothèses à intégrer aux modèles, afin de donner des résultats comparables à ceux que nous avons présentés dans la phase de diagnostic. De cette manière, les décideurs peuvent comparer la situation actuelle et les évolutions futures.

Lorsque nous avons présenté les premiers résultats aux élus de la vallée de la Thur, ils ont été effrayés par l'évolution catastrophique du risque d'inondation dans leur vallée. Cette prise de conscience permet notamment de mieux leur faire accepter les plans de prévention des risques. Ils comprennent que les zones inconstructibles proposées aujourd'hui constituent l'extension minimale de la crue centennale et qu'il faut respecter ce zonage pour contenir le coût des dommages.

La présentation d'une telle prospective doit être complétée par une explication des limites de la démarche et des facteurs aggravant ou compensant le changement climatique.

Sensibilité à la saturation initiale

La saturation initiale des sols avant un événement pluvieux conditionne de façon importante la réponse du bassin versant à la pluie. Pour un même épisode pluvieux, un bassin versant saturé en eau par les pluies antérieures va produire une crue beaucoup plus forte qu'un bassin versant disposant encore d'une capacité de rétention (cf. § 2.1.2.2).

Nous utilisons un modèle pluie-débit événementiel pour lequel la saturation initiale est un paramètre calé sur les données observées. On ne peut pas déterminer *a priori* l'évolution de la saturation initiale sous l'effet du changement climatique. Nous avons commencé ce travail à l'aide de la méthode CECP (LEVIANDIER et al., 2000). Cette approche nous avait permis d'intégrer l'évolution de la saturation initiale, calculée par un modèle auxiliaire fonctionnant en continu au pas de temps journalier. Nous faisons l'hypothèse d'une augmentation du nombre d'épisodes pluvieux en hiver. Cette approche n'a pas été reconduite pour la prospective sur la Thur, car nous avons besoin d'une modélisation au pas de temps horaire.

Nous avons fait l'hypothèse qu'il n'y a pas de variation importante de la saturation des sols en début d'événement. Il n'est pas évident que dans la réalité il en soit ainsi. En effet, si les épisodes pluvieux tendent à devenir plus long ou plus fréquent, il y a de fortes chances pour que le taux de saturation en début d'événement soit plus élevé. A l'inverse, l'augmentation de l'évapotranspiration pourrait mener à une diminution du taux de saturation.

Pour toucher du doigt l'importance du paramètre de saturation initiale, nous avons réalisé un test de sensibilité sur la base du scénario « 2100 EH ». Nous avons testé une augmentation du taux de saturation initiale du réservoir de production (S_0/A) de 20 % et une diminution de 20 %. Les valeurs de S_0/A retenues pour les différents bassins versants sont les suivantes (tableau 26).

Bassins versants	Eté			Hiver		
	S_0/A actuel	S_0/A -20%	S_0/A +20 %	S_0/A actuel	S_0/A -20%	S_0/A +20 %
0, 1, 2, 3	0.34	0.27	0.41	0.73	0.58	0.88
4, 5, 6, Wissbach	0.34	0.27	0.41	0.73	0.58	0.88
8, 9	0.34	0.27	0.41	0.73	0.58	0.88
Willer/Thur	0.49	0.39	0.59	0.98	0.78	1.00
Staffelfelden	0.53	0.42	0.64	0.95	0.76	1.00

Tableau 26 : valeurs de taux de saturation initial utilisées pour le test de sensibilité

On constate que le taux de saturation initial plafonne à 100 % en hiver pour les bassins versants de Willer/Thur et Staffelfelden. Les distributions de probabilités du débit de pointe à Staffelfelden sont les suivantes (figure 150).

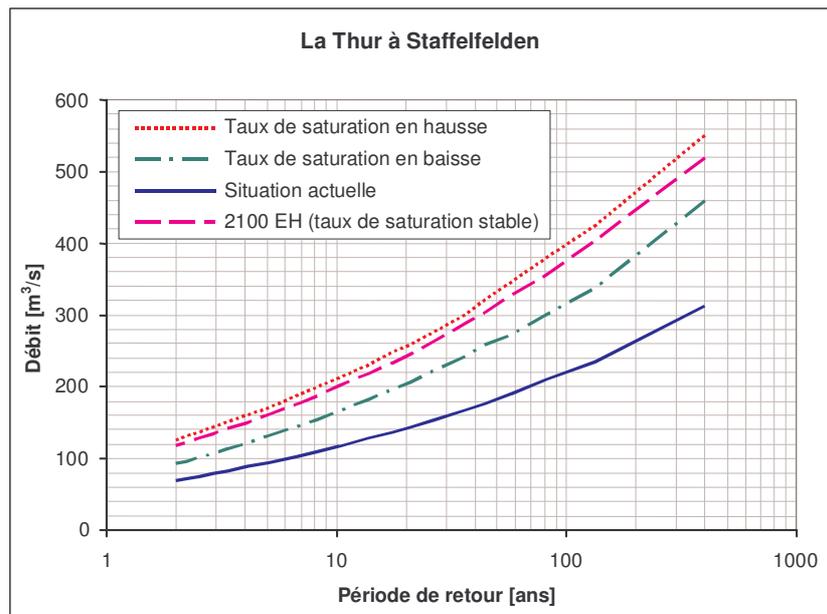


Figure 150 : distributions de probabilités du débit de pointe selon le taux de saturation

Le débit de pointe est peu sensible à l'augmentation du taux de saturation initial, car il est déjà élevé dans la situation actuelle et il plafonne à 100% en hiver. On constate qu'une diminution importante (20 %) du taux de saturation initial ne compense qu'en partie l'augmentation du débit de pointe due au changement climatique. La distribution apparaît très sensible au taux de saturation initial, mais il est difficile de prévoir son évolution à long terme. Notons par ailleurs que la stationnarité des autres paramètres du modèle n'est pas certaine. Une simulation continue prenant en compte le changement climatique pourrait apporter une réponse pertinente à ces questions (BLAZKOVA et BEVEN, 2004).

Adaptation progressive des activités humaines

Le changement climatique n'est pas un phénomène brutal. Ainsi, une prospective « toutes choses égales par ailleurs » ne donne pas une image réaliste de la situation à l'horizon 2050 ou 2100. Les activités humaines s'adapteront progressivement au changement climatique en augmentant la capacité des ouvrages de protection ou en modifiant l'occupation du sol.

Certains chercheurs se sont interrogés sur l'efficacité d'un changement d'occupation des sols, notamment agricoles, pour contrer le changement climatique. Les résultats sont décevants, surtout pour les crues fortes, car quelque soit l'occupation du sol, le volume des crues et leur intensité restent exceptionnels (NAEF et al., 2002 ; NIEHOFF et al., 2002).

Le changement climatique est susceptible de conduire à une augmentation de la fréquence des inondations catastrophiques. Les réponses habituellement adoptées par les aménageurs ne sont plus adaptées si l'aléa évolue plus vite que les ouvrages de protection. Il faut donc rechercher de nouvelles stratégies de gestion du risque qui soient respectueuses de tous les usages, à l'échelle des grands bassins versants, dans la perspective d'une aggravation sensible de l'aléa.

3.3.3 Une nouvelle gestion du risque : la résilience

Pour diminuer le risque d'inondation, une solution simple consiste à diminuer la vulnérabilité des activités humaines aux inondations. Cette gestion du risque d'inondation est appelée « résilience ». Elle consiste à renforcer la capacité de la société à retrouver un fonctionnement normal suite à une catastrophe naturelle. Cette nouvelle stratégie implique une adaptation structurelle, mais surtout le développement de la culture du risque des riverains des cours d'eau. Tout d'abord, nous définissons la notion de résilience et les objectifs des stratégies de résilience (cf. § 3.3.3.1). Ensuite, nous présentons les résultats d'une prospective de résilience appliquée à la vallée de la Thur (cf. § 3.3.3.3). Enfin, nous proposons une discussion sur les potentialités et les contraintes de ce type de gestion du risque (cf. § 3.3.3.3).

3.3.3.1 Définition et objectifs de la résilience

Les inondations représentent une perturbation du fonctionnement normal de la société. L'objectif des stratégies de résilience est d'améliorer la capacité de la société à retrouver un fonctionnement normal après une inondation. On peut comparer cette stratégie à celle du roseau par rapport à celle du chêne dans les Fables de La Fontaine. L'amélioration de la résilience implique l'adaptation structurelle et fonctionnelle des populations riveraines.

Analogie à la mécanique des solides

Le Grand Dictionnaire Terminologique définit la résilience comme :

« Caractéristique mécanique définissant la résistance aux chocs d'un matériau (valeur de la ténacité). Propriété d'un corps qui, subissant une contrainte, libère son énergie accumulée lorsque cette contrainte ne s'exerce plus (si ce corps est élastique, il libère cette énergie en accomplissant le travail qui lui permet de revenir à sa forme, ou à ses dimensions, ou à sa position, initiales). »

Par analogie, on peut dire qu'une stratégie de résilience doit permettre à la société de mieux résister au traumatisme de l'inondation en facilitant le retour à un fonctionnement normal. Le terme résilience est également défini par les psychologues comme :

« Aptitude à faire face avec succès à une situation représentant un stress intense en raison de sa nocivité ou du risque qu'elle représente, ainsi qu'à se ressaisir, à s'adapter et à réussir à vivre et à se développer positivement en dépit de ces circonstances défavorables. »

On peut souligner la notion d'adaptation à des circonstances défavorables, qui correspond bien à la situation de la société confrontée à un risque d'inondation de plus en plus fort. Il est également question de développement : c'est un objectif de la résilience appliquée au risque d'inondation. Elle doit permettre un développement durable et équilibré du territoire sous la menace des crues. Pour atteindre cet objectif, les stratégies de résilience s'appuient sur des adaptations structurelles et fonctionnelles.

Adaptation structurelle

Lorsqu'on s'intéresse aux pays qui sont confrontés à des inondations très fréquentes, comme en Asie du Sud-Est, on constate qu'ils ont développé une urbanisation adaptée aux inondations (MENZEL et KUNDZEWICZ, 2003). Les maisons sont construites sur pilotis ou bien elles sont flottantes. L'accès aux maisons se fait une partie de l'année par la voie des eaux. Notre habitat n'est pas adapté, car les inondations auxquelles sont soumises nos sociétés occidentales sont moins importantes en fréquence, en durée et en ampleur. Pourtant, nous disposons de tous les moyens techniques pour améliorer notre résilience face aux inondations (KUNDZEWICZ, 2002 ; MIODUSZEWSKI, 2003).

L'agence américaine FEMA (Federal Emergency Management Agency) a édité un rapport qui précise les stratégies de résilience possibles (*Homeowner's guide to retrofitting : six ways to protect your house from flooding*). Ils proposent une solution appelée *elevation* (figure 151). Le propriétaire peut choisir de :

- placer le premier plancher 50 cm au-dessus de la cote des plus hautes eaux,
- construire sur pilotis,
- désaffecter le rez-de-chaussée au profit des étages supérieurs (bâti existant),
- construire de nouveaux planchers surélevés (bâti existant).

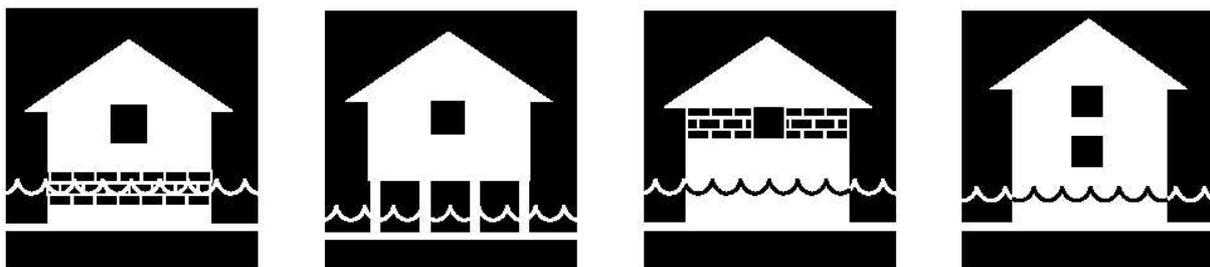


Figure 151 : stratégies de résilience par élévation (source FEMA)

Pour protéger les constructions existantes la FEMA propose deux stratégies de résilience : le « *wet floodproofing* » et le « *dry floodproofing* » (figure 152).



Figure 152 : deux stratégies de résilience pour l'urbanisation existante (source FEMA)

Dans le premier cas (« laissé inondé »), on adapte l'intérieur de l'habitation pour qu'il résiste mieux à l'inondation. Lorsqu'une maison a déjà été inondée, au moment de la reconstruction, il faut penser à choisir des matériaux mieux adaptés au lavage et au séchage, ou plus aisés et moins coûteux à remplacer. En préventif, on peut protéger les installations

électriques et de chauffage, en remontant les prises et les tableaux électriques, ainsi qu'en sécurisant le stockage du fuel domestique.

La seconde stratégie (« maison étanche ») consiste à isoler la maison de l'inondation grâce à l'installation de batardeaux étanches dans les ouvertures (figure 153).

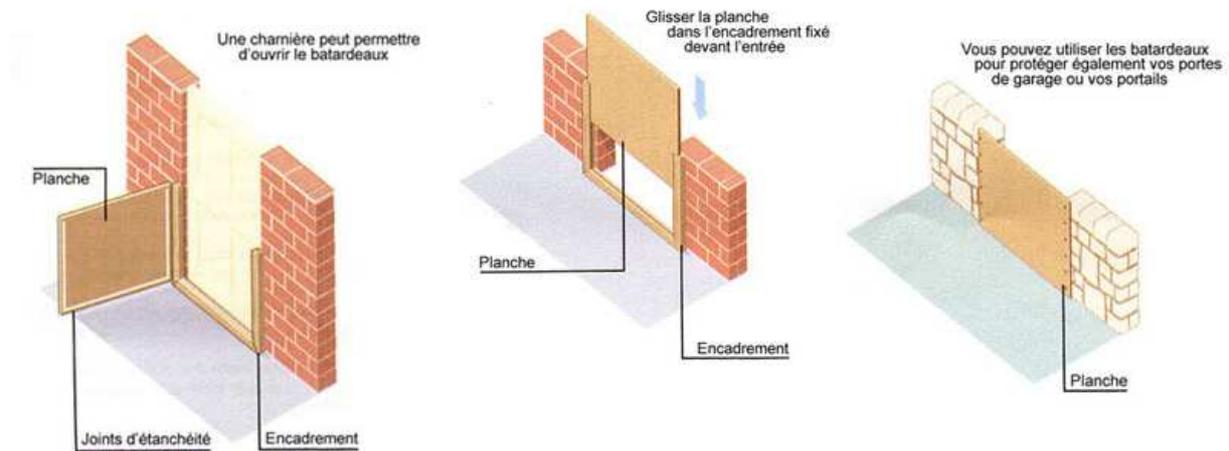


Figure 153 : exemple de mise en place de batardeaux (source Prim.net)

Cette solution est efficace. Des firmes internationales, comme BAUER ou GEODESIGN, commercialisent des systèmes faciles à mettre en place. Il existe également des moyens plus rustiques, comme les traditionnels sacs de sable. La technique de l'emballage assure une meilleure protection des murs pendant les inondations longues (figure 154).

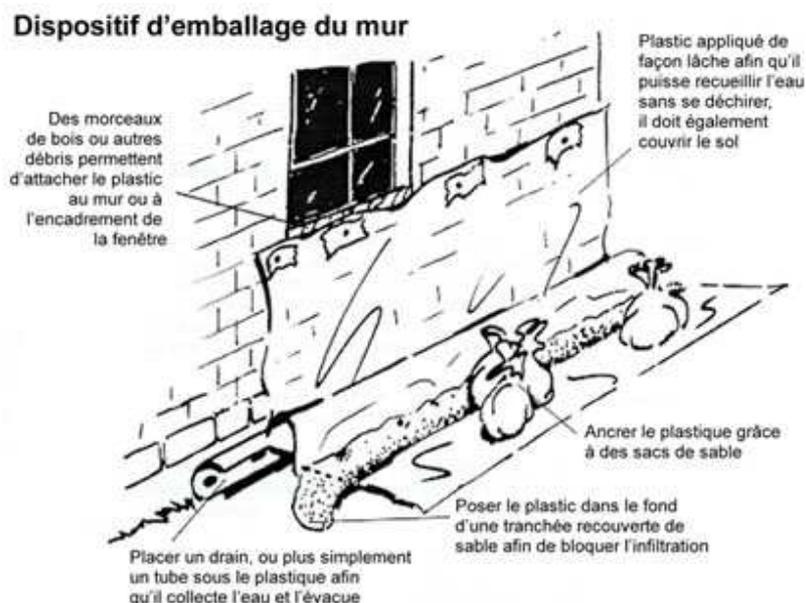


Figure 154 : principe d'étanchéité par emballage du mur (source Prim.net)

Toutes ces techniques sont efficaces tant que les hauteurs d'eau ne sont pas trop importantes. En effet, au-delà d'une hauteur d'eau de 1 mètre, les sous-pressions hydrostatiques exercées sur les murs deviennent dangereuses. Les fondations peuvent se déformer, les murs risquent de s'écrouler ou bien la maison peut se mettre à flotter. De ce point de vue, l'inondation de la maison est préférable, car elle annule les sous-pressions hydrostatiques.

Dans le cas des vallées de moyenne montagne, la hauteur d'eau est souvent assez faible. L'installation de batardeaux peut être efficace, mais encore faut-il être prévenu à temps de l'arrivée de la crue pour les mettre en place.

Adaptation fonctionnelle

Pour permettre la mise en place de protections individuelles mobiles, il faut améliorer l'annonce des crues (MIODUSZEWSKI, 2003). Dans les bassins versants de petite taille, comme la vallée de la Thur, l'annonce des crues par observation du débit à l'amont n'est pas suffisante car l'onde de crue se propage en à peine 6 heures d'amont en aval. Il faudrait développer la prévision des crues en utilisant des outils modernes, comme les radars météorologiques. Le couplage de prévisions météorologiques, d'images radar, d'une modélisation hydrologique et d'un modèle hydraulique permettrait de déterminer avec quelques heures d'avance les zones de débordement. Des travaux importants doivent être engagés pour progresser vers cet objectif opérationnel.

Le public doit également être informé sur les risques et formé à l'utilisation des moyens de protection individuelle. Il faut organiser des entraînements réguliers pour s'assurer de la bonne mise en place des protections. Les riverains doivent être responsabilisés, car ils sont les principaux acteurs de l'amélioration de la résilience.

Le système d'assurance des dommages doit être revu, afin de garantir l'indemnisation des riverains ayant suivi les recommandations, même si les inondations sont fréquentes. Le coût de la protection étant porté par les riverains alors qu'auparavant il incombait à l'Etat, il faut prévoir les subventions qui peuvent leur être accordées. Un double système d'incitation et de sanction (franchises plus élevées si aucune mesure n'est prise) devrait permettre d'atteindre rapidement une protection individuelle satisfaisante.

La non protection des espaces agricoles doit être accompagnée de mesures compensatoires à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation agricole (HESS et al., 2003 ; PIVOT et al., 2002). La solidarité entre les grandes agglomérations et le monde rural doit être matérialisée par un partage des masses d'eau, mais aussi des ressources fiscales.

3.3.3.2 Prospective de résilience appliquée à la Thur

Nous nous sommes livrés à cet exercice de prospective dans les conditions climatiques actuelles, à occupation du sol identique et sans autre aménagement que les protections individuelles. L'aléa n'est pas modifié, mais la vulnérabilité de l'occupation du sol évolue. On modifie donc la grille d'analyse du risque. On obtient un nouvel état du risque d'inondation qui peut être comparé au diagnostic actuel.

Modification de la grille d'analyse du risque

La résilience permet aux zones urbanisées de mieux résister aux inondations. Ainsi, les inondations de fréquence moyenne sont plus acceptables qu'elles ne l'étaient auparavant. Nous avons considéré que la nouvelle période de retour d'inondation acceptable est la crue décennale. En effet, cette fréquence est suffisamment élevée pour maintenir la vigilance des riverains, et assez faible pour leur permettre de mener une vie normale.

Nous obtenons ainsi une nouvelle grille d'analyse du risque (tableau 27) qui remplace la grille utilisée pour le diagnostic (tableau 17).

	Vulnérabilité faible (prairies, forêts)	Vulnérabilité moyenne (cultures)	Vulnérabilité forte (constructions)
Aléa faible T > 10 ans	Risque faible	Risque faible	Risque faible
Aléa fort T ≤ 10 ans	Bénéfice écologique	Risque faible	Risque fort

Tableau 27 : nouvelle grille d'analyse du risque

Les cultures pouvant être adaptées aux inondations, moyennant une indemnisation des agriculteurs, nous avons considéré qu'elles ne constituent plus un risque d'inondation. Les seules zones à risque fort sont les zones urbanisées menacées par une crue décennale ou plus fréquente.

L'application spatialisée de cette nouvelle grille d'analyse du risque aboutit à une nouvelle cartographie du risque.

Résultat qualitatif

L'approche qualitative du risque est utile pour comparer le niveau de risque actuel (figure 116) et la nouvelle cartographie tenant compte d'une amélioration de la résilience (figure 155). La cartographie complète de la vallée est présentée en **Annexe 9**. On constate que les zones à risque fort ont presque complètement disparu. Cette gestion du risque est donc efficace.

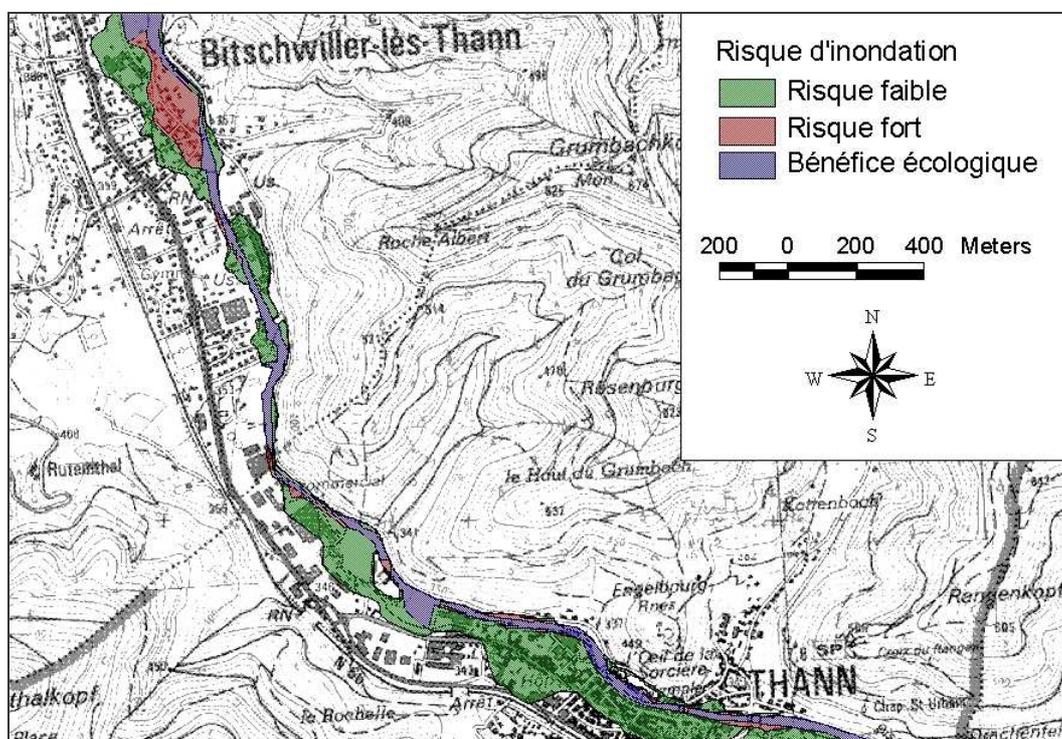


Figure 155 : carte du risque d'inondation après amélioration de la résilience

Les zones à risque fort doivent faire l'objet d'une protection contre la crue décennale. Cet objectif de protection est techniquement facile à atteindre et le coût de la protection est contenu. Les zones présentant un bénéfice écologique ne doivent pas être urbanisées car elles sont fonctionnelles.

On peut dresser un nouveau bilan quantitatif des biens menacés et calculer un nouveau coût moyen annuel.

Résultat semi-quantitatif

Le nombre d'habitations présentant un risque d'inondation fort est désormais très limité. De même, la superficie de zones industrielles et commerciales encore touchées est quasiment nulle (tableau 28). La protection de ces biens contre une crue décennale pourrait être mise en place rapidement.

Période de retour [ans]	Nombre d'habitations touchées H < 20 cm	Nombre d'habitations touchées H > 20 cm	Superficie de zones industrielles ou commerciales [m ²]	Superficie centre ville de Thann [m ²]
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
5	3	11	0	0
10	24	51	6540	1375

Tableau 28 : recensement du nombre d'habitations et des superficies endommagées

Le coût moyen annuel des dommages ne peut pas être calculé, car on n'a pas de références sur le coût unitaire (par maison ou au m²) d'endommagement d'une maison équipée de protections individuelles. Il est certain que la résilience ne permet pas de réduire à zéro le coût des inondations, car il y aura toujours des dommages à l'extérieur des habitations, aux équipements publics...

Les stratégies de résilience permettent d'envisager le développement économique durable des communes. Le coût de construction d'habitations adaptées aux inondations est plus élevé, mais il est compensé par le moindre coût du terrain. Le contour de l'inondation décennale actuelle délimite les terrains sur lesquels aucune construction ne doit être autorisée. Il est important d'adopter une gestion durable de ces espaces alluviaux et de rétablir leur bon fonctionnement écologique.

3.3.3.3 Atouts et limites des stratégies de résilience

Le principal atout des stratégies de résilience est la responsabilisation des riverains face au risque d'inondation. Cette nouvelle gestion du risque d'inondation permet également de concilier le développement économique et la protection de milieux naturels remarquables.

Entretien de la culture du risque

La non protection des zones urbanisées permet d'entretenir la vigilance des riverains, en maintenant une insécurité tangible, mais supportable. Cette situation un peu inconfortable peut s'avérer salutaire lorsqu'ils se trouveront confrontés à des événements exceptionnels. Les

débordements réguliers de la rivière donnent l'occasion aux habitants et aux services de secours de tester leur matériel et leur gestion de la crise.

Une stratégie de résilience peut s'adapter au changement climatique, car les protections individuelles peuvent être complétées au fur et à mesure des besoins. C'est une gestion durable du risque d'inondation (VIS et al., 2003).

Rétention des crues

L'absence d'endiguements continus dans le bassin versant permet de conserver de vastes champs d'expansion des crues. Les zones urbanisées fonctionnent comme des casiers de rétention qui se remplissent à partir de la crue décennale. Cette solution d'aménagement est celle qui perturbe le moins le fonctionnement de la rivière en crue. Au pire, elle est transparente d'un point de vue hydraulique. On devra toutefois veiller à ce que la vitesse du courant dans les zones urbanisées ne mette pas en péril les constructions et les infrastructures.

Aux Pays-Bas, cette stratégie est adoptée en prévision de la surverse ou de la rupture des digues du Rhin. Le paysage est un carroyage de digues de 5 km de côté, au milieu duquel sont construites les habitations. Lorsqu'une digue est submergée, les casiers les plus proches se remplissent ce qui laisse un peu de temps aux habitants des autres casiers pour préparer l'inondation inéluctable de leurs terrains. Ce système peut paraître inquiétant, mais c'est une réponse pragmatique à l'aggravation constante des crues du Rhin.

Des milieux alluviaux menacés

Avec une telle stratégie de résilience, certains élus peuvent envisager l'urbanisation totale du lit majeur, au détriment des espaces alluviaux. Les prairies et les forêts alluviales doivent être préservés car ils sont indispensables à la protection de la ressource en eau. L'enveloppe actuelle de la crue décennale (ou d'une crue plus forte) peut servir de limite pour sauvegarder un espace de mobilité pour la rivière. Dans le cas des rivières incisées, comme la Thur, cette extension n'est pas suffisante. Il faut recenser et protéger les milieux naturels remarquables par leur biodiversité ou leur fonctionnalité. Les zones agricoles qui sont fréquemment inondées pourraient faire l'objet d'une gestion plus écologique, en vue d'étendre les milieux alluviaux. Cette réflexion est à mener en partenariat avec les élus et les agriculteurs. Des compensations financières doivent être prévues (PIVOT et al., 2002).

Acceptabilité sociale et responsabilité

La limite la plus forte à la mise en place d'une stratégie de résilience est l'acceptabilité sociale d'un tel changement de gestion du risque d'inondation. Il est difficile de renoncer à la protection des digues, dont la plupart des riverains ne soupçonnent pas les dangers. Actuellement, l'Etat a pris la responsabilité des risques naturels et les riverains exigent une protection qu'ils considèrent légitime. La responsabilisation des habitants et le transfert de la gestion du risque de l'Etat au citoyen a donc un long chemin à parcourir.

Le respect des règles de construction doit être contrôlé de manière rigoureuse, sinon, le relâchement de la réglementation de l'urbanisation pourrait avoir de graves conséquences,

les riverains s'exposant à un danger de mort. Il est sans doute plus facile d'interdire l'urbanisation du lit majeur que de contrôler la conformité des constructions.

Les stratégies de résilience sont coûteuses à mettre en place, mais les mesures de protection collectives le sont aussi. Les contribuables ne sont pas conscients du poids des catastrophes naturelles pour le budget du pays.

Les élus qui auront le courage de porter ce type de projet jusqu'au bout peuvent être montrés du doigt comme responsables, sinon pénalement au moins moralement, en cas de catastrophe. Il est probable que l'on doive attendre la mise en défaut répétée des ouvrages de protection pour que l'on opte pour cette stratégie plus durable.

La recherche d'une gestion intégrée du risque d'inondation nous a conduit à envisager successivement la renaturation, puis les endiguements et enfin les stratégies de résilience. Cette option d'aménagement semble être la mieux adaptée pour répondre aux contraintes de la gestion intégrée. En effet, elle est applicable à grande échelle sans compromettre la situation à l'aval du bassin versant. Elle est durable et elle permet de concilier le développement des activités humaines avec la sauvegarde des hydrosystèmes et de la ressource en eau.

Les différents modes de gestion que nous avons comparés ici ont chacun des atouts et des limites. Il est intéressant de les comparer par des approches prospectives lorsqu'on recherche une gestion intégrée du risque d'inondation. La méthodologie que nous avons menée ici peut être reproduite dans le contexte des rivières de moyenne montagne. Elle permet de justifier des stratégies de protection différentes des approches traditionnelles.

Conclusion et perspectives

Les thématiques abordées dans la thèse sont vastes, car nous avons fait le choix de développer une méthodologie complète, allant de la modélisation de la pluie à l'analyse du risque. Ainsi, les apports de la thèse ne sont pas à rechercher dans les disciplines scientifiques prises individuellement, mais dans leurs échanges au sein de la méthodologie. Nous proposons de présenter les apports opérationnels et les apports scientifiques séparément. Nous finirons en esquissant les perspectives de recherche à la suite de ce travail.

Apports opérationnels

Nous avons attaché beaucoup d'importance au caractère opérationnel du travail et nous espérons que la méthodologie pourra être mise en œuvre dans d'autres vallées de moyenne montagne.

Concernant la vallée de la Thur, la modélisation des crues à l'échelle du bassin versant a permis d'établir un diagnostic intégré du risque. Nous avons mis en évidence la situation délicate de certaines communes et la raréfaction des zones alluviales fonctionnelles. L'analyse détaillée du risque fait prendre conscience de l'enjeu économique et politique des inondations pour l'ensemble de la vallée. Plusieurs prospectives ont permis d'entrevoir les atouts et les limites de différentes stratégies de lutte contre les inondations. Ces simulations constituent un outil d'aide à la décision pour les acteurs de la vallée. Les résultats du diagnostic et des prospectives peuvent également être utilisés pour informer la population et la sensibiliser aux dangers, mais aussi à la richesse que représente leur rivière.

D'un point de vue technique, la méthodologie que nous proposons peut être appliquée dès aujourd'hui à d'autres vallées de moyenne montagne. La formation de techniciens à la manipulation des différents logiciels et à l'analyse des résultats permettrait de généraliser ce type d'approche. Nous avons veillé à maîtriser le coût des études, en recherchant une méthode d'acquisition des données topographiques performante et en optimisant le temps de travail.

Nous avons précisé les potentialités et les contraintes de différentes stratégies d'aménagement de rivière dans le contexte des rivières de moyenne montagne :

- La renaturation des cours d'eau n'est pas efficace pour réduire le risque d'inondation en moyenne montagne.
- Les endiguements sont efficaces pour les crues fréquentes, mais ils aggravent localement le risque pour les crues rares. Pour les crues de périodes de retour inférieures à l'objectif de protection, les endiguements aggravent les crues à l'aval des secteurs aménagés.
- La prospective de changement climatique permet de montrer que les crues sont sensibles à l'évolution du climat. Les stratégies de résilience représentent le moyen de protection le plus souple pour faire face à l'évolution de l'aléa.

Les prospectives offrent une vision à long terme de l'évolution du risque d'inondation selon le mode de gestion retenu. Le choix de la stratégie de lutte contre les crues appartient aux décideurs.

Apports scientifiques

Les difficultés techniques soulevées par la gestion intégrée font écho à des problématiques scientifiques intéressantes.

La gestion intégrée s'envisageant à l'échelle du bassin versant, elle fait appel à des approches d'échelles différentes. Chaque modèle a une distribution spatiale particulière, afin de tenir compte de phénomènes localisés dans l'approche spatialisée. Nous avons recherché la précision et la résolution minimales permettant la prise en compte de la variabilité spatio-temporelle des phénomènes. En phase de validation, nous avons montré qu'il faut veiller à la cohérence des résultats obtenus, sur un même site, par des modélisations différentes. La méthodologie de modélisation inclut un contrôle de la cohérence des différentes étapes de la modélisation. En particulier, la variation des débits en fonction de la superficie doit bien résulter de la répartition des apports et de la propagation. On admet cependant une tolérance quant à la simplification de la représentation des apports des affluents.

La cartographie en fréquence des inondations ne pouvant techniquement être réalisée par simulation exhaustive de milliers d'événements, nous avons proposé une méthode de sélection d'événements de référence. Ils ont pour propriété de présenter un débit de pointe de fréquence constante d'amont en aval du cours d'eau. Les événements de référence sont utilisés pour la cartographie et le diagnostic du risque à l'échelle du bassin versant. Leur utilisation pour les simulations prospectives a été discutée : elle est admissible pour les rivières de moyenne montagne, mais pas pour les rivières de plaine. La modification du laminage des crues peut transformer chaque événement de manière différente. On ne peut donc plus de raisonner sur un événement de fréquence donnée, et encore moins sur un événement monofréquence.

L'application de scénarios de changement climatique à l'hydrologie de la vallée de la Thur a permis de mettre en évidence la sensibilité des crues à l'évolution du climat. Les résultats obtenus sur la Thur constituent une expérience originale d'application régionale des scénarios de changement climatique, allant jusqu'à des estimations de dommages, que nous nous gardons de présenter comme seul critère de décision. La méthodologie comporte par ailleurs des incertitudes dues aux simplifications, notamment du processus temporel des pluies et des états initiaux.

Bien que le travail ait essentiellement porté sur la modélisation des crues, nous avons tenu compte des hydrosystèmes et de la dynamique fluviale. Le diagnostic intégré du risque met en évidence la perte de fonctionnalité des prairies alluviales en l'absence d'inondations fréquentes. L'impact des pratiques agricoles modernes est rappelé également. La renaturation et la résilience sont deux modes de gestion qui favoriseraient les hydrosystèmes s'ils étaient mis en place.

La connaissance de la dynamique fluviale est nécessaire pour expliquer la cartographie du risque. On observe une homogénéité de la fréquence de débordement malgré l'artificialisation de la rivière. Il semblerait que la protection progressive de la vallée ait abouti à une morphologie assez homogène, de manière empirique. Dans les scénarios de

prospective, il faut tenir compte de la dynamique fluviale, car peu de cours d'eau sont en équilibre stable. La gestion des crues est indissociable de la gestion physique des cours d'eau.

Perspectives

La méthodologie a été développée pour les rivières de moyenne montagne, ce qui a donné lieu à des choix spécifiques au cours de son élaboration. Pour la transposer aux rivières de plaine, des difficultés supplémentaires doivent être surmontées :

- La modélisation devrait tenir compte du volume des crues, car le laminage des crues en plaine est sensible à cette variable. La sélection des événements de référence devrait être revue pour intégrer cette nouvelle variable représentative.
- Les écoulements en lit majeur de plaine sont manifestement bidimensionnels. On devrait donc utiliser un modèle hydraulique 1D maillé ou un modèle 2D.

La renaturation et la réouverture des champs d'expansion de crues devraient produire un laminage des crues plus efficace en plaine que dans les vallées de moyenne montagne.

Pour adapter la méthodologie à des bassins versants de taille supérieure (plusieurs centaines à plusieurs milliers de kilomètres carrés), la modélisation des crues devrait évoluer. Pour tenir compte de la variabilité spatiale des champs pluvieux, il faudrait développer la spatialisation des pluies. La régionalisation du modèle pluie débit permettrait de modéliser les crues sur des bassins versants non jaugés ou disposant d'une seule station de jaugeage.

Les scénarios de prospective que nous avons testés étaient volontairement très simples pour analyser l'évolution d'un seul paramètre « toutes choses égales par ailleurs ». On pourrait tester des scénarios plus complexes et plus réalistes, intégrant à la fois le changement climatique, les aménagements, l'évolution de l'occupation du sol... Les résultats obtenus seraient plus difficiles à analyser, mais on pourrait observer des phénomènes de compensation ou d'aggravation qui sont éludés avec des approches simples.

Nous encourageons nos successeurs à poursuivre le développement de modèles simplifiés. Les rivières virtuelles que nous avons utilisées pourraient être améliorées pour représenter de véritables vallées virtuelles avec une urbanisation évolutive, des aménagements complexes, comme des bassins de rétention... L'intégration de modèles de routage simples dans une méthode stochastique (SHYPRE ou CECP) permettrait d'améliorer la sélection des événements de référence, notamment étudier des aménagements de ralentissement dynamique.

J'espère que ce travail contribuera à améliorer la gestion du risque par un développement équilibré de l'Homme, dans le respect de la Nature.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

ACKERMANN, F. (1999). "Airborne laser scanning - present status and future expectations." ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **54**(2-3): 64-67.

ADAM, O. (1998). La crue de la Bruche de Février 1990 et sa prise en compte dans l'aménagement du territoire., Mémoire de maîtrise de l'ULP: 80.

AKAIKE, H. (1973). Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In: B. N. Petrov and F. Csaki, Editors, 2nd International Symposium on Information Theory, Akademiai Kiado, Budapest. 267-281.

AMBROISE, B. (1999). La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant. Processus, facteurs, modèles., Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

AMOROS, C. et G.E. PETTS (1993). Hydrosystèmes fluviaux - Masson, collection d'écologie - 24, 300 p.

ARNAUD, P. (1997). Modèle de prédétermination de crues basé sur la simulation stochastique des pluies horaires. CEMAGREF d'Aix-en-Provence, Thèse de Doctorat - Université de Montpellier.

ARNAUD, P. et J. LAVABRE (2001a). "La modélisation stochastique des pluies horaires et leur transformation en débits pour la prédétermination des crues." Revue des Sciences de l'Eau(13/4): 441-462.

ARNAUD, P. et J. LAVABRE (2001b). "Coupled rainfall model and discharge model for flood frequency estimation." Water Resources Research **38**(6).

BALTSAVIAS, E. (1999). "A comparison between photogrammetry and laser scanning." ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **54**(2-3): 83-94.

BATES et DE ROO (2000). "A simple raster-based model for flood inundation simulation." Journal of Hydrology: 54-77.

BCEOM (2000). Inondations de Novembre 1999 dans le Sud de la France. Estimation des dommages des crues et cartographies des zones inondées., MATE: 24.

BENTURA, P. et C. MICHEL (1997). "Flood routing in a wide channel with a quadratic lag-and-route method." Hydrological Sciences: 169-189.

BLAZKOVA, S. et K. BEVEN (2004). "Flood frequency estimation by continuous simulation of subcatchment rainfalls and discharges with the aim of improving dam safety assessment in a large basin in the Czech Republic." Journal of Hydrology **292**(1-4): 153-172.

BRAVARD, J.-P. et F. PETIT (1997). Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial, Arman Colin.

- BRAVARD, J.-P., N. LANDON, J.-L. PEIRY et H. PIEGAY (1999).** “Principles of engineering geomorphology for managing channel erosion and bedload transport, examples from French rivers.” Geomorphology(31): 291-311.
- BRAVARD, J.-P. (2000).** Les régions françaises face aux extrêmes hydrologiques. Gestion des excès et de la pénurie., SEDES.
- BRETON, C. et C. MARCHE (2001).** “Une aide à la décision pour le choix des interventions en zone inondable.” Revue des Sciences de l'Eau(14(3)): 363-379.
- CARBIENER, R. (1983).** “Le grand Ried central d'Alsace : écologie et évolution d'une zone humide d'origine fluviale rhénane.” Bulletin Ecologique(14): 249-277.
- CERNESSON, F. (1993).** Modèle simple de prédétermination des crues de fréquence courantes à rares sur de petits bassins versants méditerranéens. CEMAGREF d'Aix-en-Provence, Thèse de Doctorat - Université de Montpellier II: 240.
- CERNESSON, F., J. LAVABRE et J.-M. MASSON (1996).** “Stochastic model for generating hourly hyetographs.” Atmospheric Research **42**(1-4): 149-161.
- CETMEF (2001).** Catalogue de techniques d'acquisition de données topométriques pour les études hydrauliques, Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales: 74.
- CETMEF (2002).** Hydraulique des cours d'eau, Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales: 55.
- CFGB (1994) :** (Comité Français des Grands Barrages). Les crues de projet des grands barrages : méthode du Gradex. 18ème Congrès CIGB/ICOLD. n°2. Novembre 1994 : 96p.
- CGPC, CGGREF et IGE (2002).** Inspection suite aux désordres et à la rupture des bassins de rétention de la "Savoureuse" et enseignements à en tirer notamment pour le fonctionnement des services de l'Etat impliqués dans la police des eaux sur des installations similaires : 50.
- CHAMBON, P. (1997).** “Utilisation de la BD TOPO pour les études hydrologiques. Le cas du bassin de l'Ouvèze (Vaucluse).” Bulletin d'Information de l'IGN(66).
- DAUGE, Y. (1999).** Rapport sur les inondations, Assemblée Nationale: 47 pp.
- DE JOUVENEL H. (2000).** “A brief methodological guide to scenario building.” Technological Forecasting and Social Change **65**(1): 37-48.
- DE VAULX M. (2002).** “La prévention des risques liés aux inondations.” Cahier du Conseil Général du GREF(n°61): 61-64.
- DETRAIGNE, Y. (2003).** Rapport 154 - prévention des risques technologiques et naturels et réparation des dommages, Sénat.
- DEILLER, A.F., P. VAN DIJK, J.M. WALTER et M. TREMOLIERES (2002).** “Light and flooding impact on species distribution and abundance of woody recruits in three hardwood forests of the Upper Rhine floodplain (north-eastern France). A paraître. Proceedings International symposium Restoration of floodplains, Strasbourg.
- DOYLE, M. W., K. F. BOYD et P. B. SKIDMORE (1999).** River restoration channel design: back to the basics of dominant discharge. Second International Conference on Natural Channel Systems, Niagara Falls, Canada.

- DROGUE, G., T. LEVIANDIER, A. EL IDRISSE (2002).** Regionalization and transposability of a conceptual rainfall-runoff model in various physiographic conditions (Alzette river basin, Luxembourg). Colloque de Lugano.
- DROGUE, G., L. PFISTER, T. LEVIANDIER, A. EL IDRISSE, J.-F. IFFLY, P. MATGEN, J. HUMBERT et L. HOFFMANN (2004).** “Simulating the spatio-temporal variability of streamflow response to climate change scenarios in a mesoscale basin.” Journal of Hydrology(293): 255-269.
- DUBAND, D., P. GUILLOT (1968).** “La méthode du Gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluie.” SHF Xème journées de l'hydraulique, Paris, Question 1, Rapport 7 : 7p.
- DUBGAARD, A., M. F. KALLESOE, J. LADENDURG et M. L. PETERSEN (2004).** Cost-benefit analysis of the Skjern River restoration in Denmark. Cost-benefit analysis and water resources management. P. R. Brouwer R. Cheltenham, Edward Elgar Publishing.
- EDELIN, F. (2001).** Le pouvoir autoépurateur des rivières. Une introduction critique.
- EDIJATNO (1991).** Mise au point d'un modèle pluie-débit au pas de temps journalier. Institut de Mécanique des Fluides. Thèse de Doctorat - Université Louis Pasteur – Strasbourg.
- EPFL (1997).** Gestion intégrée des cours d'eau. Apport des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et des Modèles de Simulation. Lausanne, EPFL: 41.
- EU (2000).** Directive cadre européenne sur l'eau (2000/60/CE), Journal Officiel des Communautés européennes: 72.
- FALCONER, R. A. et L. BINLIANG (2003).** “Hydro-environmental modelling of riverine basins using dynamic rate and partitioning coefficients.” International Journal of River Basin Management 1(1): 81-89.
- FARISSIER, P. (1993).** Etude d'un modèle de cartographie adapté à la simulation des écoulements en rivière. CEMAGREF. Lyon, Thèse de Doctorat - Université - Lyon I.
- FRHYMAP (2002).** Final report of the IRMA-SPONGE project FRHYMAP (Flood Risk scenarios and Hydrological MAPPING : from field data to spatio-temporal modeling): 112.
- GANOULIS, J. (2003).** “Risk-based floodplain management : a case study from Greece.” International Journal of River Basin Management 1(1): 41-47.
- GENDREAU, N., F. GRELOT, R. GARCON et D. DUBAND (2003).** “Risque d'inondation : une notion probabiliste complexe pour le citoyen.” Ingénieries (34) : 17-24.
- GIEC (2002).** Bilan 2001 des changements climatiques : conséquences, adaptation et vulnérabilité, Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat: 97.
- GILARD, O. (1998a).** Les bases techniques de la méthode Inondabilité., Cemagref Editions.
- GILARD, O. et N. GENDREAU (1998b).** “Inondabilité : une méthode de prévention raisonnable du risque d'inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants.” Revue des Sciences de l'Eau: 16.
- GIVONE, P. (1998).** “Risques naturels et transcriptions cartographiques.” Ingénieries: 87-96.
- GRAF, W. H. et M. S. ALTINAKAR (2000).** Hydraulique fluviale. Ecoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple, Presse Polytechniques et Universitaires Romandes.

- HESS, T. M., J. MORRIS, D. G. GOWING, P. B. LEEDS-HARISSON, N. BANNISTER, R. M. N. VIVASH et M. WADE (2003).** Integrated washland management for flood defence and biodiversity. ECOFLOOD, Warsaw.
- HONGFU, Y. et L. CHANGAN (2001).** “Human impact on floods and flood disasters on the Yangtse River.” Geomorphology(41): 105-106.
- HORRITT, M. S. et P. D. BATES (2002).** “Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation.” Journal of Hydrology.
- HORRITT, M. S., D. C. MASON, D. M. COBBY, I. J. DAVENPORT et P. D. BATES (2003).** “Waterline mapping in flooded vegetation from airborne SAR imagery.” Remote Sensing of Environment(5827): 1-11.
- HUMBERT, J. (1986).** “Estimation du rôle de la fonte nivale dans l'écoulement de crues des rivières des Hautes-Vosges.” Revue Géographique de l'Est: 27-56.
- HUMBERT, J. et J. CORBONNOIS (2000).** Ressources et gestion de l'eau dans les bassins français de la Meuse, de la Moselle et du Rhin. Les régions françaises face aux extrêmes hydrologiques. Gestion des excès et de la pénurie. SEDES: 119-149.
- IRMA-SPONGE (2001).** Room for the Rhine in The Netherlands, summary of research results, Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Delft Hydraulics: 59.
- JAEHN, J.-M. (1997).** Atlas des zones inondées du Bas-Rhin, DDAF du Bas-Rhin, Préfecture du Bas-Rhin Mission InterServices de l'Eau, DIREN Alsace.
- KRAUS, K. et N. PFEIFER (1998).** “Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data.” ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **53**(4): 193-203.
- KREIS, N. (2001).** Utilisation de l'information géographique pour cartographier le risque d'inondation. Application à la vallée de la Thur (68). CEVH. Strasbourg, Mémoire de DEA - ENGEES-ULP: 101.
- KREIS, N. (2003).** Re-entering river waters onto floodplains requires hydrological and hydraulics modelling. ECOFLOOD Conference, Warsaw.
- KUNDZEWICZ, Z. W. (2002).** “Non-structural flood protection and sustainability.” Water International **27**(1): 3-13.
- LAGANIER, R. et H.-J. SCARWELL (2001).** Risque inondation, aménagement du territoire et développement durable : l'exemple du bassin de la Canche (Pas-de-Calais). Développement durable et territoires, L'Harmattan: 87-101.
- L'ALSACE (1990).** Thur et Doller - La crue. L'Alsace: 25.
- LAMMERSEN, R., H. ENGEL, W. V. D. LANGEMHEEN et H. BUITEVELD (2002).** “Impact of river training and retention measures on flood peaks along the Rhine.” Journal of Hydrology(267): 115-124.
- LANDON, N., H. PIEGAY et J.-P. BRAVARD (1998).** “The Drôme river incision (France) : from assessment to management.” Landscape and Urban Planning(43): 119-131.
- LASUT, A. (2003).** Insurance as a means of reducing economic losses due to floods. ECOFLOOD, Warsaw.

- LAVABRE, J., V. ANDREASSIAN et O. LAROUSSINIE (2002).** “Les eaux et les forêts. La forêt : un outil de gestion des eaux ?” La Houille Blanche(3): 72-77.
- LEVIANDIER, T., G. M. MORALES et A. ZERMANI (1994).** Etude comparative de la résolution spatiale de modèles hydrologiques sur le bassin de la Charente., GIP Hydrosystèmes, symposium sur les relations continent - zones côtières.: 17.
- LEVIANDIER, T., J. LAVABRE et P. ARNAUD (2000).** “Rainfall Contrast Enhancing Clustering Process and flood analysis.” Journal of Hydrology.
- MALTBY, E. et M. BLACKWELL (2003).** Managing riverine environments in the context of new water policy in Europe. ECOFLOOD, Warsaw.
- MALAVOI, J.R., J.P. BRAVARD, H. PIEGAY, E. HEROUIN, P. RAMEZ (1998).** Bassin Rhône Méditerranée Corse, Guide technique n°2, détermination de l’espace de liberté des cours d’eau, 39 p.
- MATE (2002).** Plans de Prévention des Risques, votre atout pour la prévention des risques naturels, Ministère de l’Aménagement du Territoire et de l’Environnement.
- MAUCHAMP, A. (2002).** “Restoration of floodplain wetlands : opening polders along a coastal river in Mediterranean France, Vistre marshes.” Ecological Engineering(18): 619-632.
- MEDD (2004).** “Le Ralentissement Dynamique pour la prévention des inondations. Guide des aménagements associant l’épandage des crues dans le lit majeur et leur écrêtement dans de petits ouvrages.” Ministère de l’Ecologie et du Développement Durable : 131 p.
- MENZEL, L. et G. BURGER (2002).** “Climate change scenarios and runoff response in the Mulde catchment (Southern Elbe, Germany).” Journal of Hydrology(267): 53-64.
- MENZEL, L. et Z. W. KUNDZEWICZ (2003).** Flood risk and vulnerability in the changing world. ECOFLOOD, Warsaw.
- MERMET, L. et X. POUX (2002).** “Pour une recherche prospective en environnement. Repères théoriques et méthodologiques.” Natures, sciences, sociétés **10**(3): 7-15.
- MICHEL, C. (1989).** Hydrologie appliquées aux petits bassins versants ruraux. Cemagref, Antony. 528p
- MIDDELKOOP, H. et J. C. J. KWADIJK (2000).** “Towards integrated assessment of the implications of global change for water management - the Rhine experience.” Physical Chemical Earth **26**(7-8): 553-560.
- MIODUSZEWSKI, W. (2003).** Flood protection and nature. ECOFLOOD, Warsaw.
- MIROSLAW-SWIATEK, D., T. OKRUSZCO et J. CHORMANSKI (2003).** Natural floodplain storage capacity - modelling approach. ECOFLOOD, Warsaw.
- MULLER, S., F. GREVILLIOT and L. KREBS (1998).** “Comparative importance and interference of hydrological conditions and soil nutrient gradients in floristic biodiversity in flood meadows.” Biodiversity and Conservation(7): 1495-1520.
- MUZYK, I. (2002).** “A first-order analysis of the climate change effect on flood frequencies in a subalpine watershed by means of a hydrological rainfall-runoff model.” Journal of Hydrology(267): 65-73.
- NAEF, F., S. SCHERRER et M. WEILER (2002).** “A process based assessment of the potential to reduce flood runoff by land use change.” Journal of Hydrology(267): 74-79.

- NERON, A.** (2004). "Méthodes d'évaluation du risque d'inondation. Approche comparative appliquée à la vallée de la Thur (68)." CEVH. Strasbourg, Mémoire de DEA - ENGEES-ULP: 120
- NIEHOFF, D., U. FRITSCH et A. BRONSTERT** (2002). "Land-use impacts on storm-runoff generation : scenarios of land-use change and simulation of hydrological response in a meso-scale catchement in SW-Germany." Journal of Hydrology(267): 80-93.
- NUSSBAUM, R.** (2000). "Pour une géographie économique des risques naturels." Geocarrefour **75**(3): 255-260.
- PARMENTIER, D.** (1999). Elaboration d'un PPR contre les inondations de la ville de Mulhouse., Mémoire d'Ingénieur - ENGEES: 53.
- PAUL, P.** (1981). "Un cas remarquable d'effet de foehn en plaine d'Alsace." Mélanges Péguy: 383-391.
- PAYAN, J. L.** (2003). Prévission des crues sur les petits bassins versants : recherche d'une paramétrisation optimale. CEVH. Strasbourg, Mémoire de DEA - ENGEES - ULP.
- PERRIN, C.** (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. CEMAGREF d'Antony. Thèse de Doctorat - Grenoble, INPG.
- PIEGAY, H. et S. STROFFEK** (2000). La "gestion physique" des rivières dans le bassin Rhône-Méditerranée-Corse : des extrêmes... au milieu. Les régions françaises face aux extrêmes hydrologiques. Gestion des excès et de la pénurie. SEDES: 247-274.
- PIVOT, J.-M., E. JOSIEN et P. MARTIN** (2002). "Farms adaptation to changes in flood risk: a management approach." Journal of Hydrology(267): 12-25.
- PLATE, E. J.** (2002). "Flood risk and flood management." Journal of Hydrology(267): 2-11.
- POULARD, C., A. REZA, V. GAMERITH, J. SZCZESNY et H. WITKOWSKA** (2003). Dynamic slowdown : from integrated management to flood mitigation. ECOFLOOD, Warsaw.
- RACLOT, D.** (2003). Méthodologie d'exploitation quantitative des photographies aériennes d'inondation de plaine. Structures et Systèmes Spatiaux. Thèse de Doctorat - Montpellier, Cemagref - ENGREF.
- RAMADASAN, K.** (1999). Integrated River Basin Management (IRBM) : a conservation perspective. Rivers '99 : Towards Sustainable Development, Penang, Malaysia.
- REILLY, J. F., A. J. HORNE et A. D. MILLER** (2000). "Nitrate removal from a drinking water supply with large free-surface constructed wetlands prior to groundwater recharge." Ecological Engineering(14): 33-47.
- RF** (1992). Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau, Journal officiel de la République Française.
- RF** (1995). Loi n° 95-101 du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement, Journal officiel de la République Française.
- RF** (2003). Loi n° 2003-699 du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages, JO de la République Française.
- RICHARD, D.** (2002). "Forêts et crues." La Houille Blanche(3): 54-58.

- ROBIN, N.** (2000). Analyse du risque d'inondation à partir de données satellitales SPOT. Application à la crue de la Seille de mars 1999, Mémoire d'Ingénieur - ENGEES: 97.
- ROTTCHER, K.** et F. TONSMANN (2003). Possibilities of a nature-oriented flood protection - exemplary shown at the river Lahn. ECOFLOOD, Warsaw.
- SAMUELS, P. G.** (2001). Integrated River Management and Flood Risk, HR Wallingford.
- SAUQUET, E., P. JAVELL et S. L. CLERC** (2003). "Description des régimes hydrologiques des hautes-eaux : nouvelle formulation pour l'analyse en débit-durée-fréquence et applications en ingénierie." Ingénieries - EAT(34): 3-15.
- SCHMITT, L.** (2001). Typologie hydro-géomorphologique fonctionnelle de cours d'eau. Recherche méthodologique appliquée aux systèmes fluviaux d'Alsace. CEREG. Thèse de Doctorat - ULP: 217.
- SECRETAN, Y., M. LECLERC, S. DUCHESNE et M. HENICHE** (2001). "Une méthodologie de modélisation numérique de terrain pour la simulation hydrodynamique bidimensionnelle." Revue des Sciences de l'Eau **14**(2): 187-212.
- SHERMAN, L. K.** (1932). "Stream flow from rainfall by the unit graph method". Engineering news records. Vol. 108 : 501-502
- SIEFFERT, N.** (1999). Etude méthodologique de cartographie automatique des écoulements fluviaux. Application aux bassins de la Fecht et du Giessen. CEREG. Strasbourg, Thèse de Doctorat - Université Louis Pasteur - Strasbourg I: 319.
- SINGH, V. P.** (1995). Watershed modeling in V.P. Singh ed. Computers models of watershed hydrology. Water Resources Publications. Baton rouge, Louisiana, USA.
- SOGREAH** (2004). Etude préalable au SAGEECE du bassin de la Bruche, Conseil Général du Bas-Rhin.
- SOUCHON, Y.** (2002). "Vers de nouveaux outils pour l'aide à la gestion des hydrosystèmes : couplage des recherches physiques et biologiques sur les cours d'eau." Natures, sciences, sociétés **10**: 26-41.
- SPALIVIERO, M.** (2002). "Historic fluvial development of the Alpine-foreland Tagliamento River, Italy, and consequences for floodplain management." Geomorphology(1277): 1-17.
- SPAROVEK, G.** (2002). "A conceptual framework for the definition of the optimal width of riparian forests." Agriculture, Ecosystems & Environment(90): 167-175.
- SPAT, V.** (2003). Tolerance to flooding of hardwood forest tree species, Integriertes Rhein Programm - Bade Württemberg.
- STEPHENSON D.** (2002). "Integrated flood plain management strategy for the Vaal." Urban Water(4): 425-430.
- STOVER, S. C.** et D. R. MONTGOMERY (2000). "Channel change and flooding, Sokomish River, Washington." Journal of Hydrology: 271-286.
- SUI, J.** et G. KOEHLER (2001). "Rain-on-snow induced flood events in Southern Germany." Journal of Hydrology(252): 205-220.
- SWETNAM, R. D.** (1998). "Spatial relationships between site hydrology and the occurrence of grassland of conservation importance : a risk assessment with GIS." Journal of Environmental Management(54): 189-203.

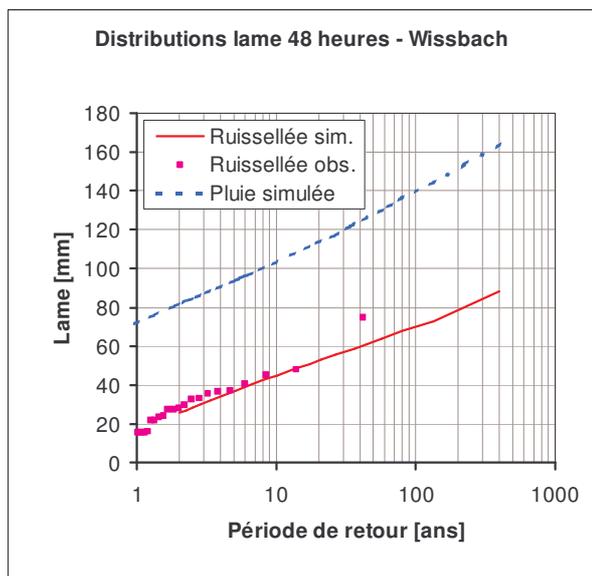
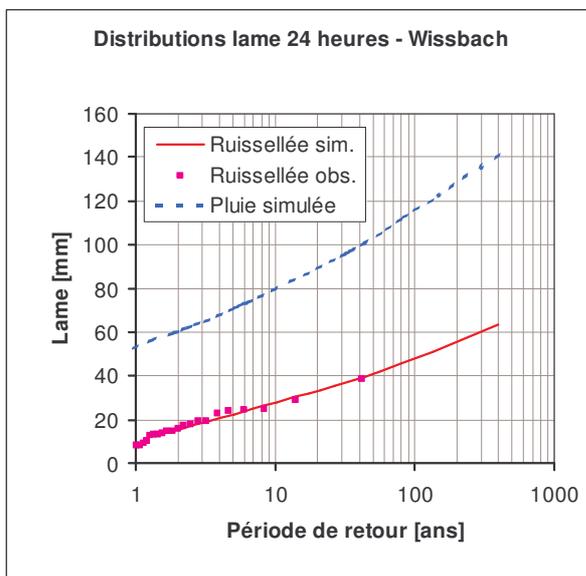
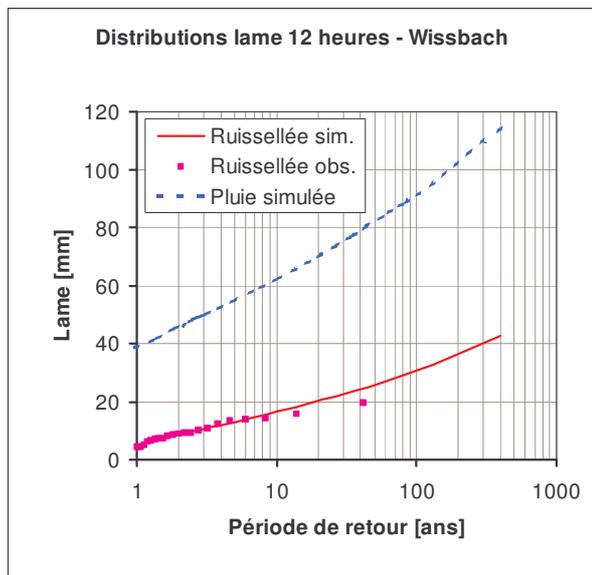
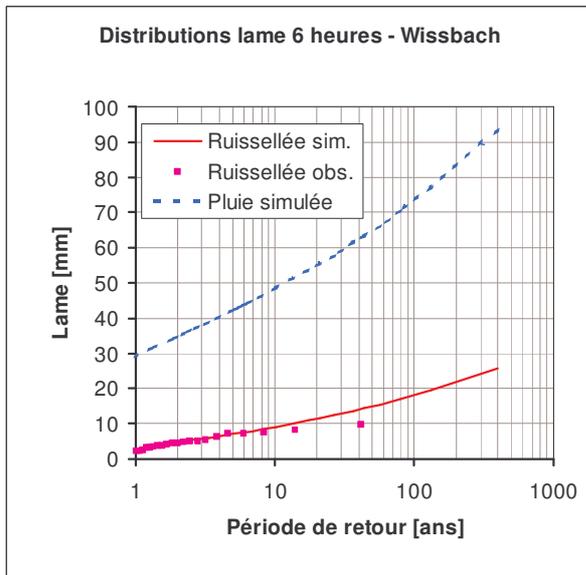
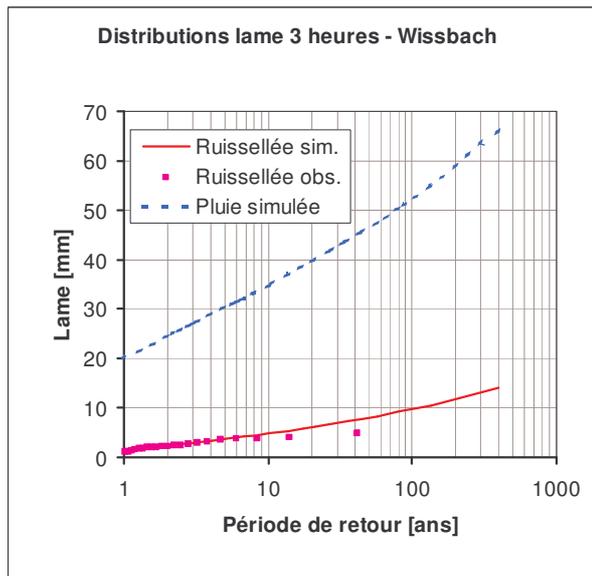
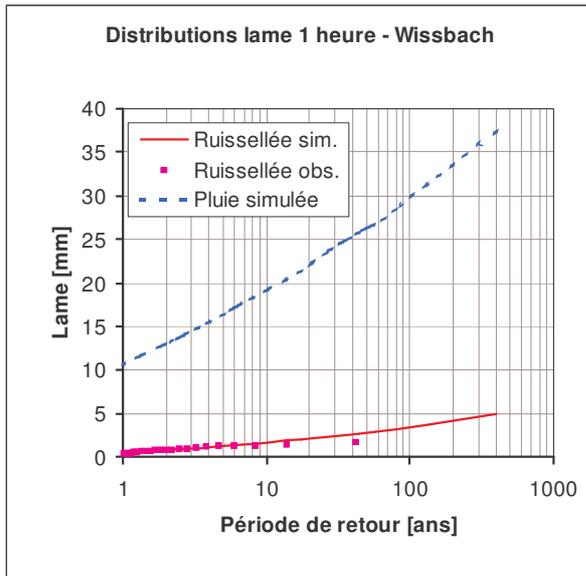
- TERREAUX, J.-P.** (2002). "Deux exemples de coopération entre économistes et ingénieurs du Cemagref." Natures, sciences, sociétés **10**: 75-79.
- THORBURN, W. M.** (1915). "Occam's razor," *Mind*, 24 : 287-288.
- TODINI, E.** (1999). "An Operational decision support system for flood risk mapping, forecasting and management." Urban Water: 131-143.
- TORTEROTOT, J.-P.** (1993). Le coût des dommages dus aux inondations : estimation et analyse des incertitudes. CERGRENE. Thèse de Doctorat - PARIS, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées: 283.
- TREMOLIERES, M., D. CARBIENER, R. CARBIENER, I. EGLIN, F. ROBACH, J. M. SANCHEZ-PEREZ, A. SCHNITZLER et D. WEISS** (1991). "Zones inondables, végétation et qualité de l'eau en milieu alluvial rhénan : l'île de Rhinau, un site de recherches intégrées." Bulletin Ecologique **22**(3-4): 317-336.
- TREMOLIERES, M., A. SCHNITZLER, D. CARBIENER** (2002). "Quel système de référence pour la restauration des systèmes alluviaux rhénans." Revue d'Ecologie La Terre et la Vie Suppl 9 : 141-145.
- TURNER, R. K., J. T. VAN DEN BERGH, SODERQVIST, A. BARENDREGT, J. V. D. STRAATEN, E. MALTBY et E. C. V. IERLAND** (2000). "Ecological-economic analysis of wetlands : scientific integration for management and policy." Ecological Economics(35).
- USACE** (2000). HEC-GeoRAS User's Manual, US Army Corps of Engineers - Hydrological Engineering Center.
- USACE** (2001a). HEC-RAS User's Manual, US Army Corps of Engineers - Hydrological Engineering Center.
- USACE** (2001b). HEC-RAS Hydraulic Reference Manual, US Army Corps of Engineers - Hydrological Engineering Center.
- VAN OORSCHOT M., N. VAN GAALEN, E. MALTBY, N. MOCKLER, A. SPINK et J. VERHOEVEN** (2000). "Experimental manipulation of water levels in two French riverine grassland soils." Acta Oecologica **21**(1): 49-62.
- VIS, M., F. KLIJN, K. M. D. BRUIJN et M. V. BUUREN** (2003). "Resilience strategies for flood risk management en the Netherlands." International Journal of River Basin Management **1**(1): 33-40.
- VIVIEN, F.-D. et B. ZUINDEAU** (2001). Le développement durable et son espace : antécédents intellectuels et questions pour l'avenir. Développement durable et territoires. L'Harmattan: 11-40.
- WEHR, A. et U. LOHR** (1999). "Airborne laser scanning - an introduction and overviews." ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **54**(2-3): 68-82.
- WERNER, M. G. F.** (2000). "Impact of grid size in GIS based extent mapping using a 1D flow model." Physical Chemical Earth **26**(7-8): 517-522.
- WOLTERS, H. A., M. PLATTEEUW et M. M. SCHOOR** (2001). Guidelines for rehabilitation and management of floodplains, NCR.

ANNEXES

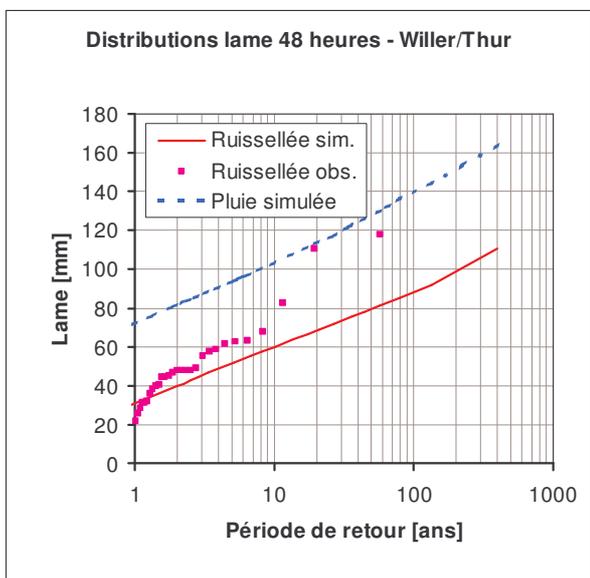
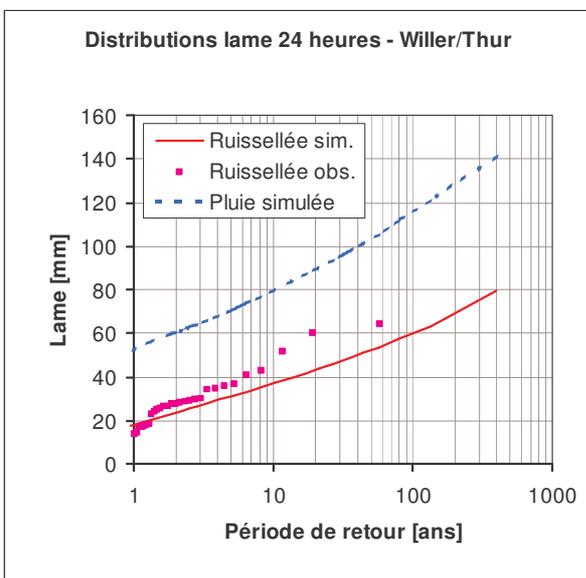
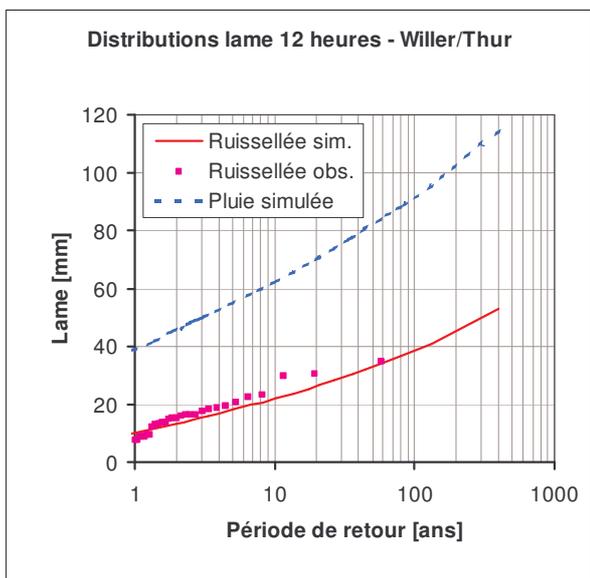
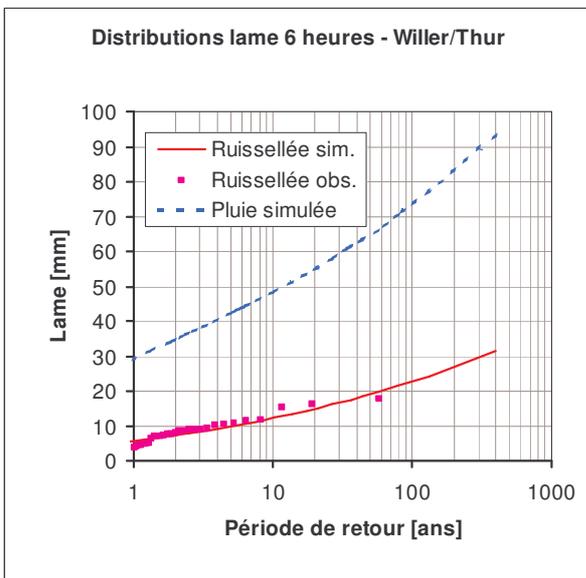
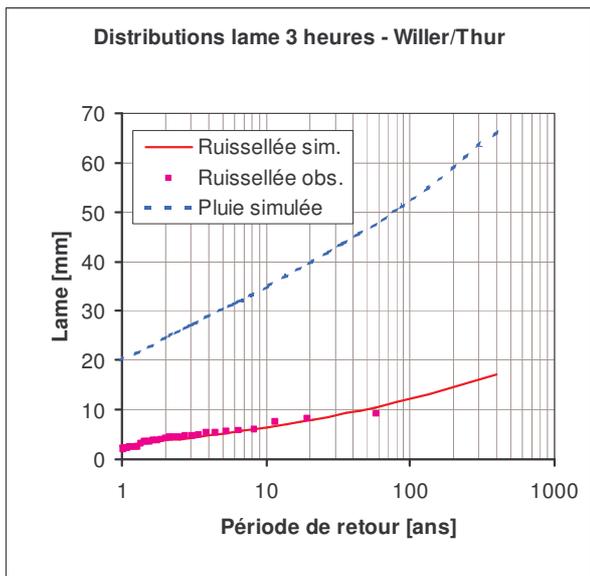
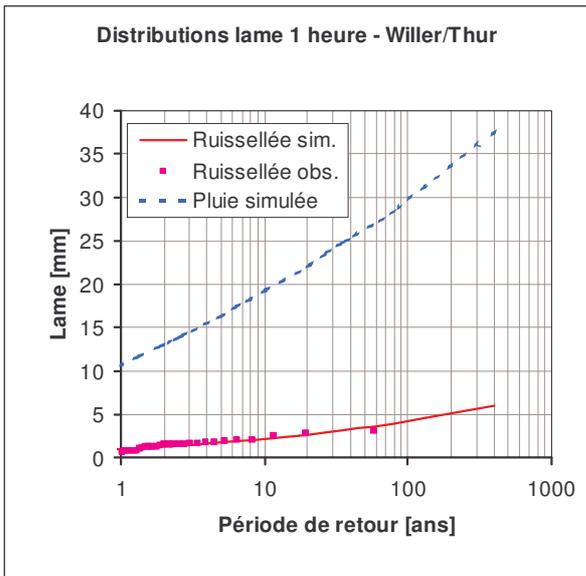
ANNEXE 1 : DISTRIBUTIONS DES LAMES SIMULEES POUR DIFFERENTES DUREES	271
ANNEXE 2 : PROFIL EN LONG - LIGNE D'EAU CENTENNALE	277
ANNEXE 3 : CARTES DE LA CRUE CENTENNALE	291
ANNEXE 4 : CARTES DES INONDATIONS DE DIFFERENTES PERIODES DE RETOUR	299
ANNEXE 5 : CARTES D'ANALYSE QUALITATIVE DU RISQUE	307
ANNEXE 6 : CARTES D'ANALYSE QUANTITATIVE DU RISQUE	315
ANNEXE 7 : CALCUL DU COUT MOYEN ANNUEL	323
ANNEXE 8 : CARTES D'ANALYSE QUALITATIVE APRES CHANGEMENT CLIMATIQUE	333
ANNEXE 9 : CARTES D'ANALYSE QUALITATIVE APRES AMELIORATION DE LA RESILIENCE	341

Toutes les cartes sont présentées sur un fond © IGN – SCAN 25® Mars 1998

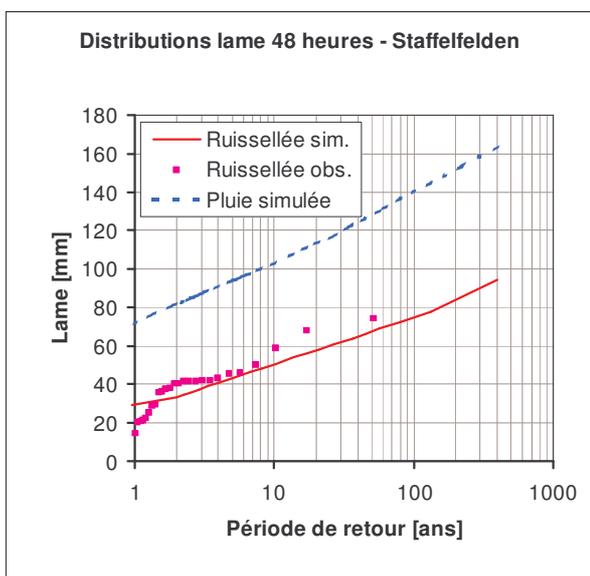
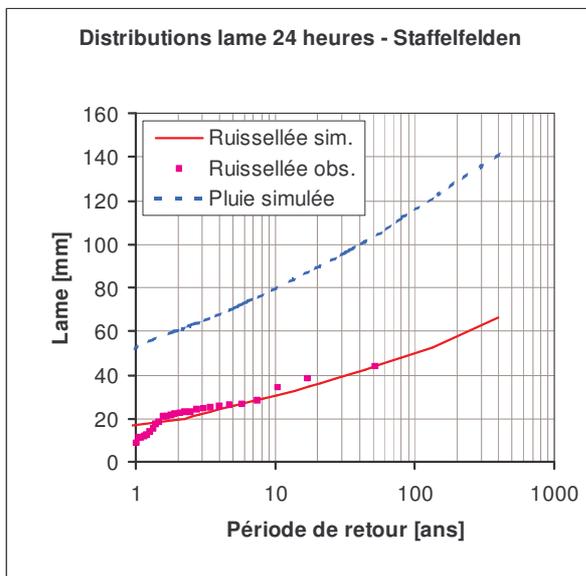
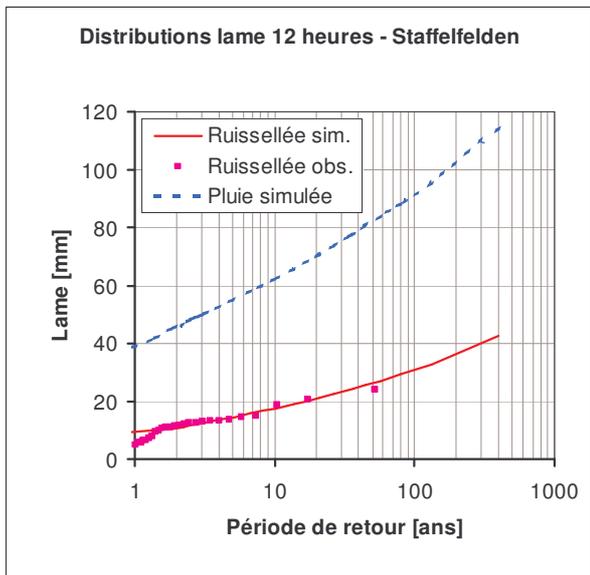
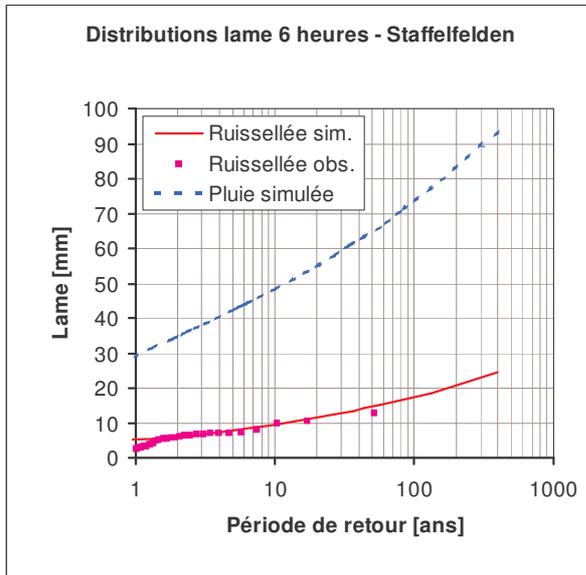
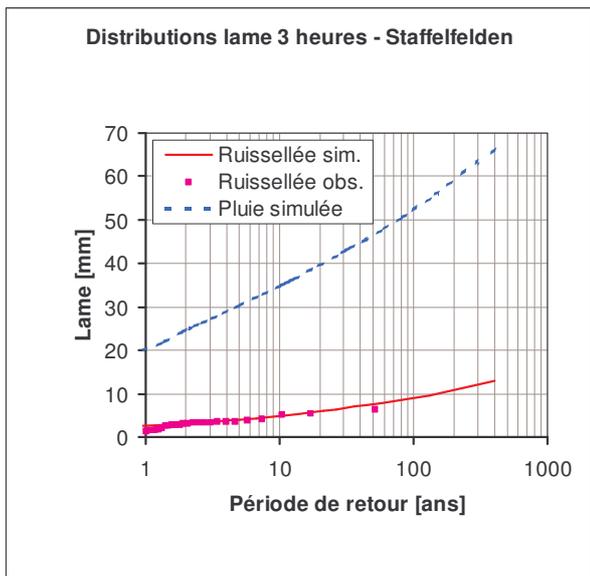
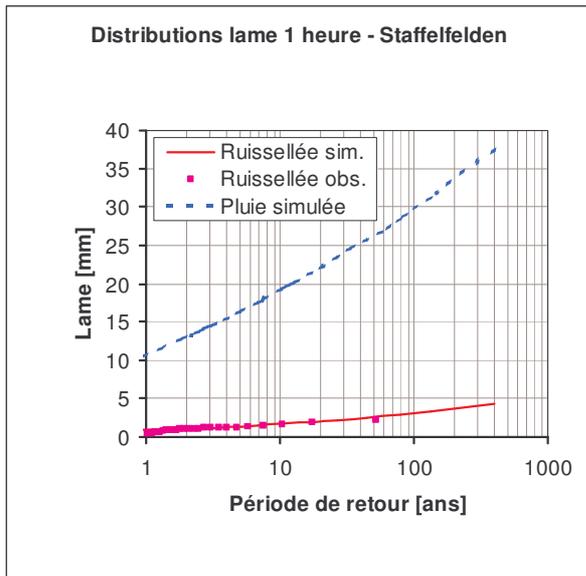
Annexe 1 :
Distributions des lames simulées pour
différentes durées

Distributions des lames simulées et observées – *Le Wissbach*

Distributions des lames simulées et observées - La Thur à Willer/Thur



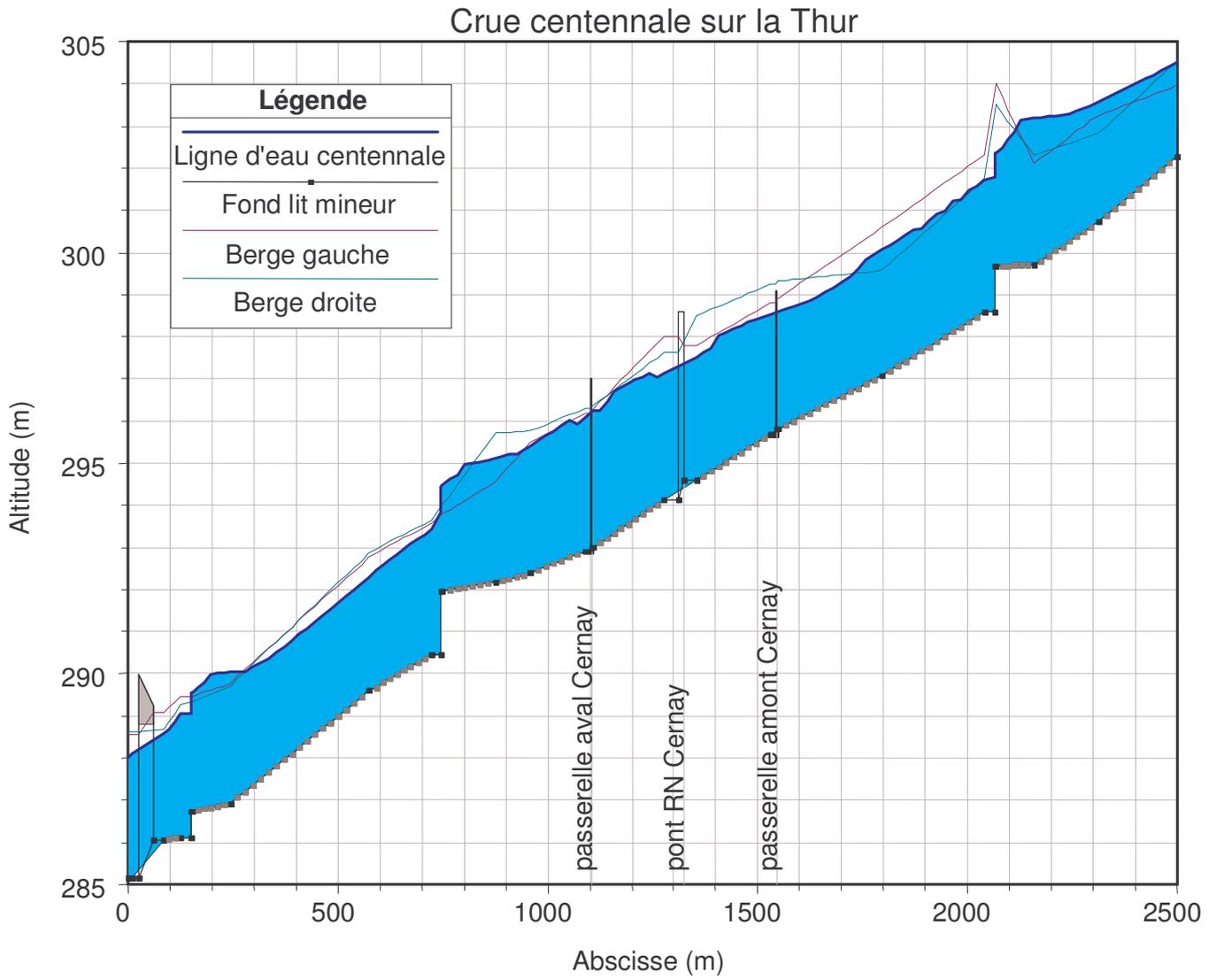
Distributions des lames simulées et observées - *La Thur à Staffelfelden*



Annexe 2 :
Ligne d'eau centennale

Profil en long - Ligne d'eau centennale

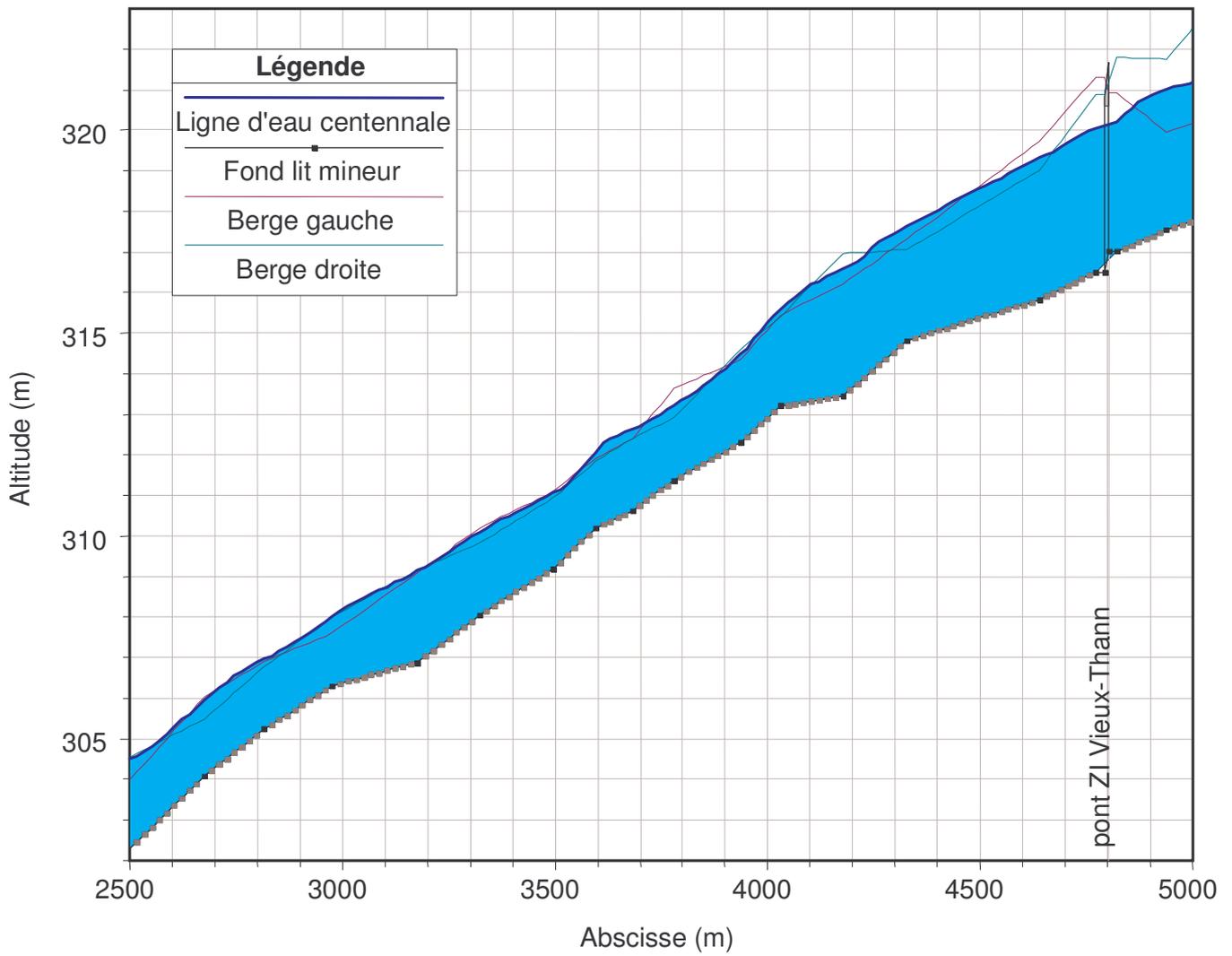
Commune : CERNAY



Profil en long - Ligne d'eau centennale

Communes : CERNAY VIEUX-THANN (Zone Nature)

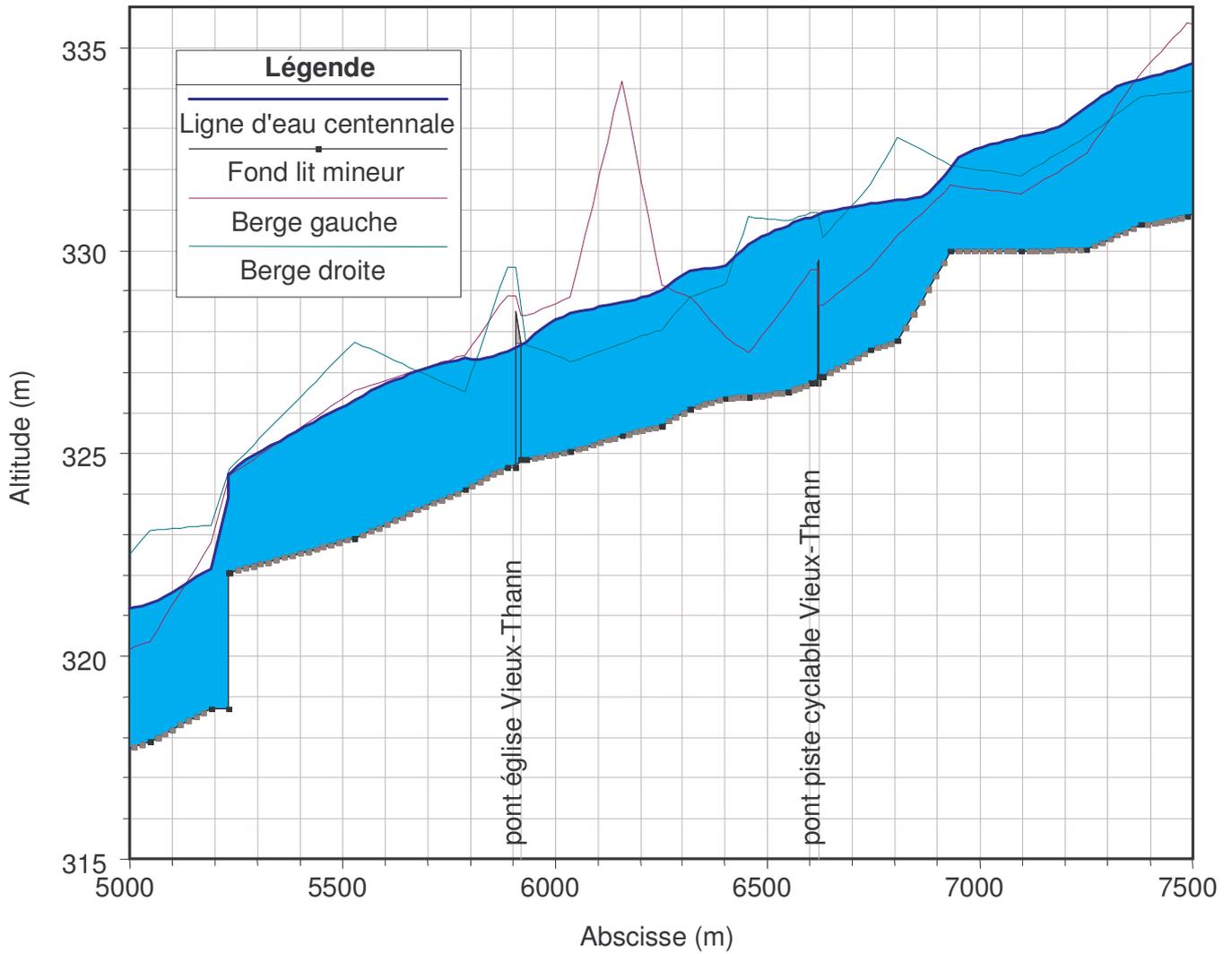
Crue centennale sur la Thur



Profil en long - Ligne d'eau centennale

Communes : VIEUX-THANN THANN

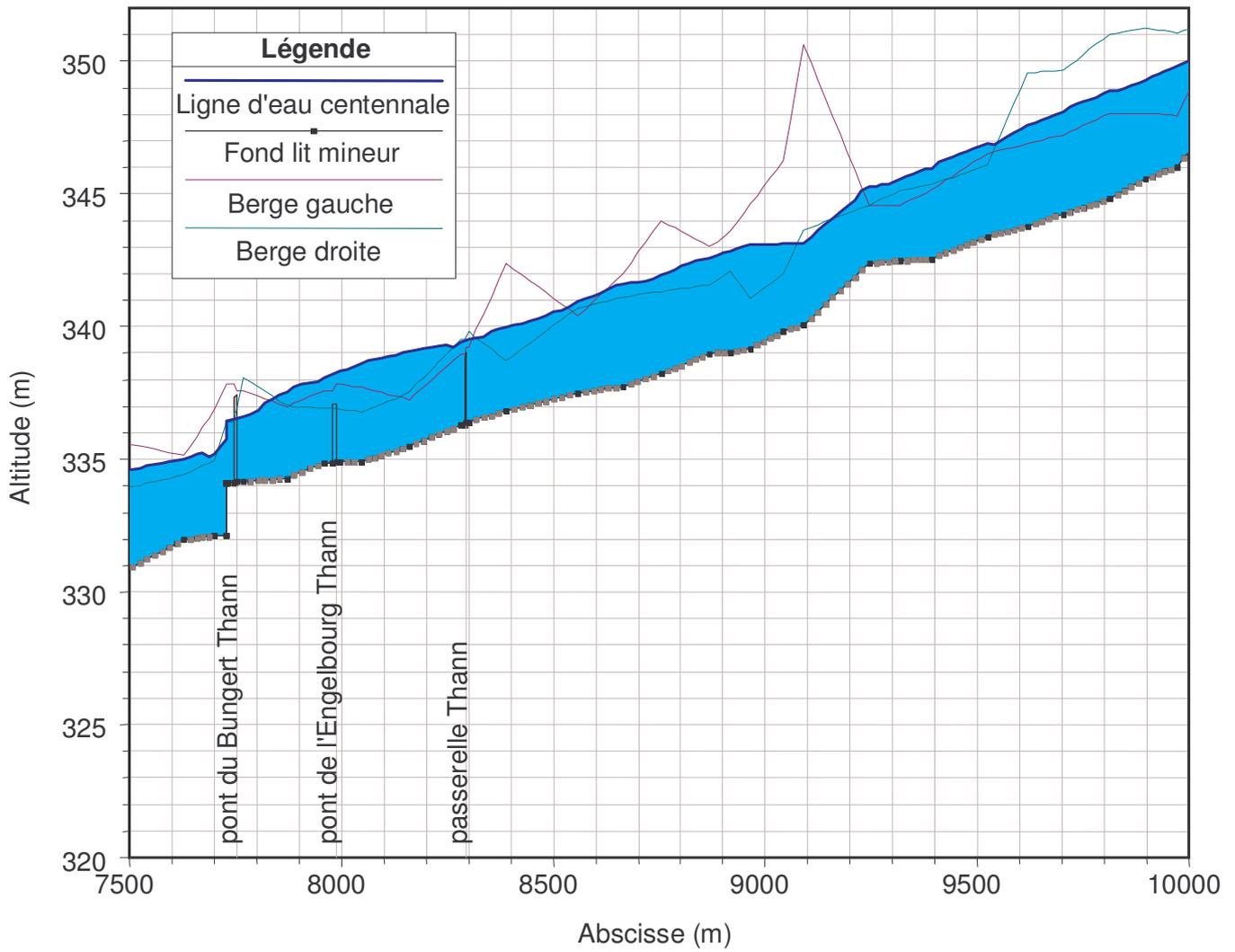
Crue centennale sur la Thur



Profil en long - Ligne d'eau centennale

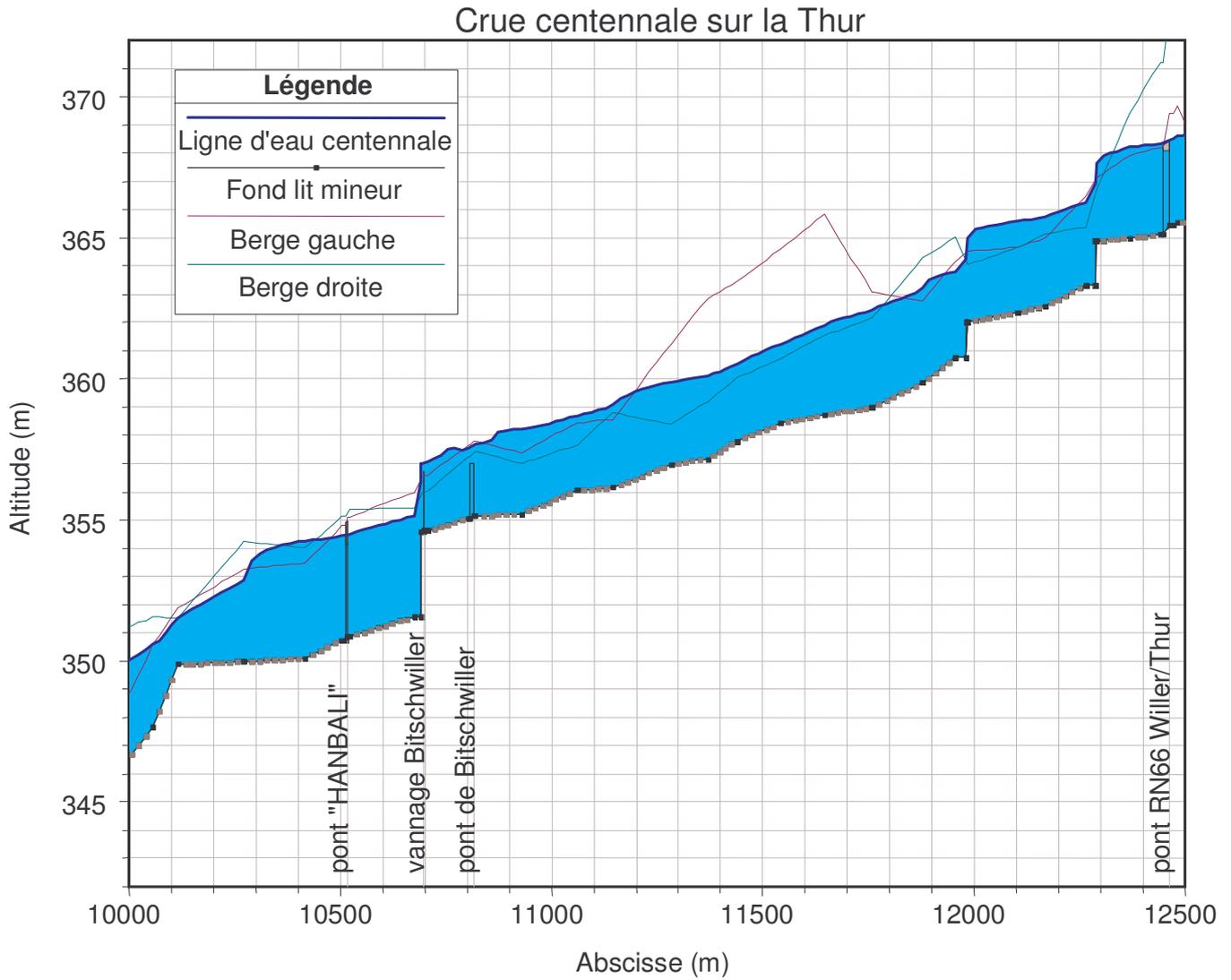
Commune : THANN

Crue centennale sur la Thur



Profil en long - Ligne d'eau centennale

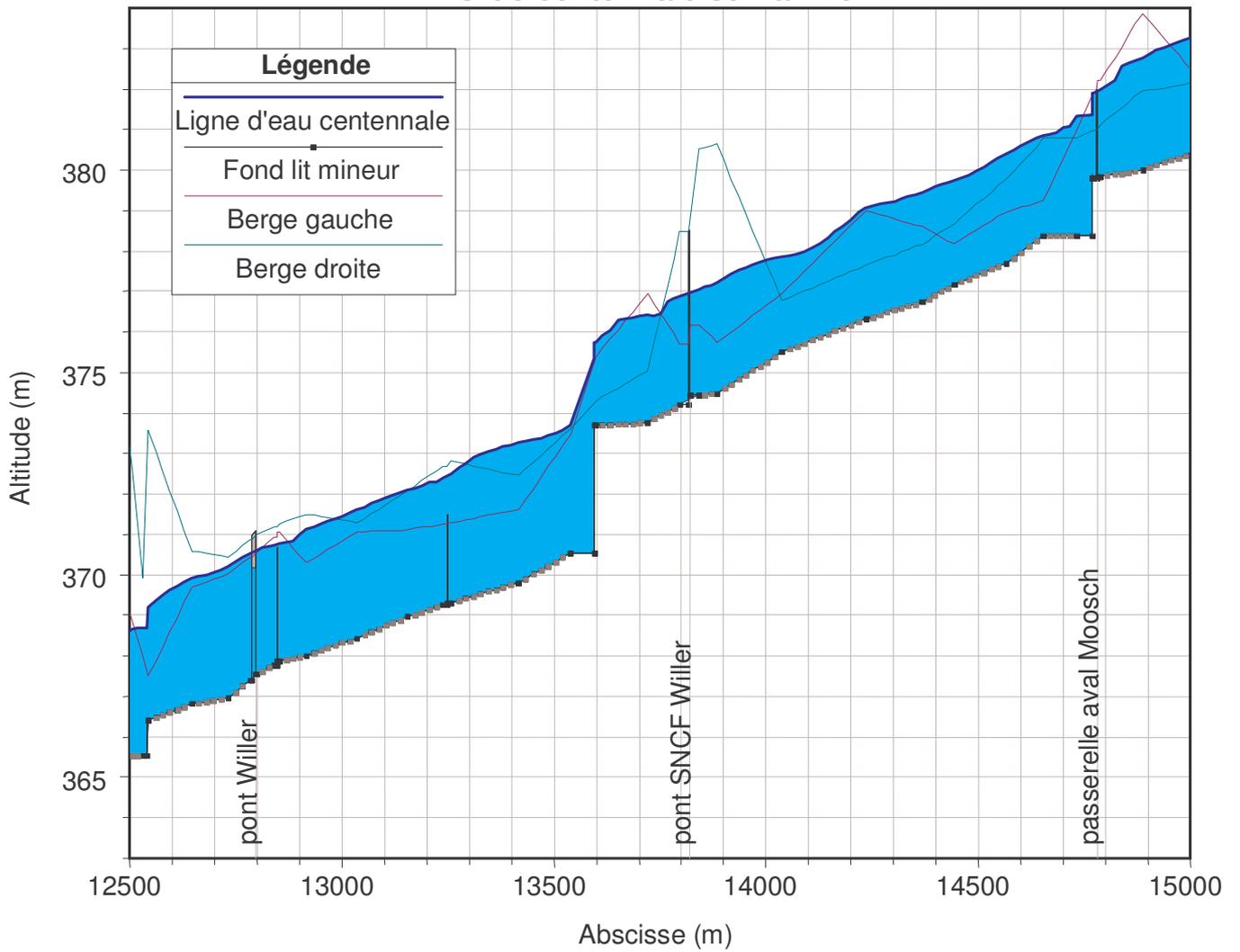
Communes : BITSCHWILLER-LES-THANN WILLER/THUR



Profil en long - Ligne d'eau centennale

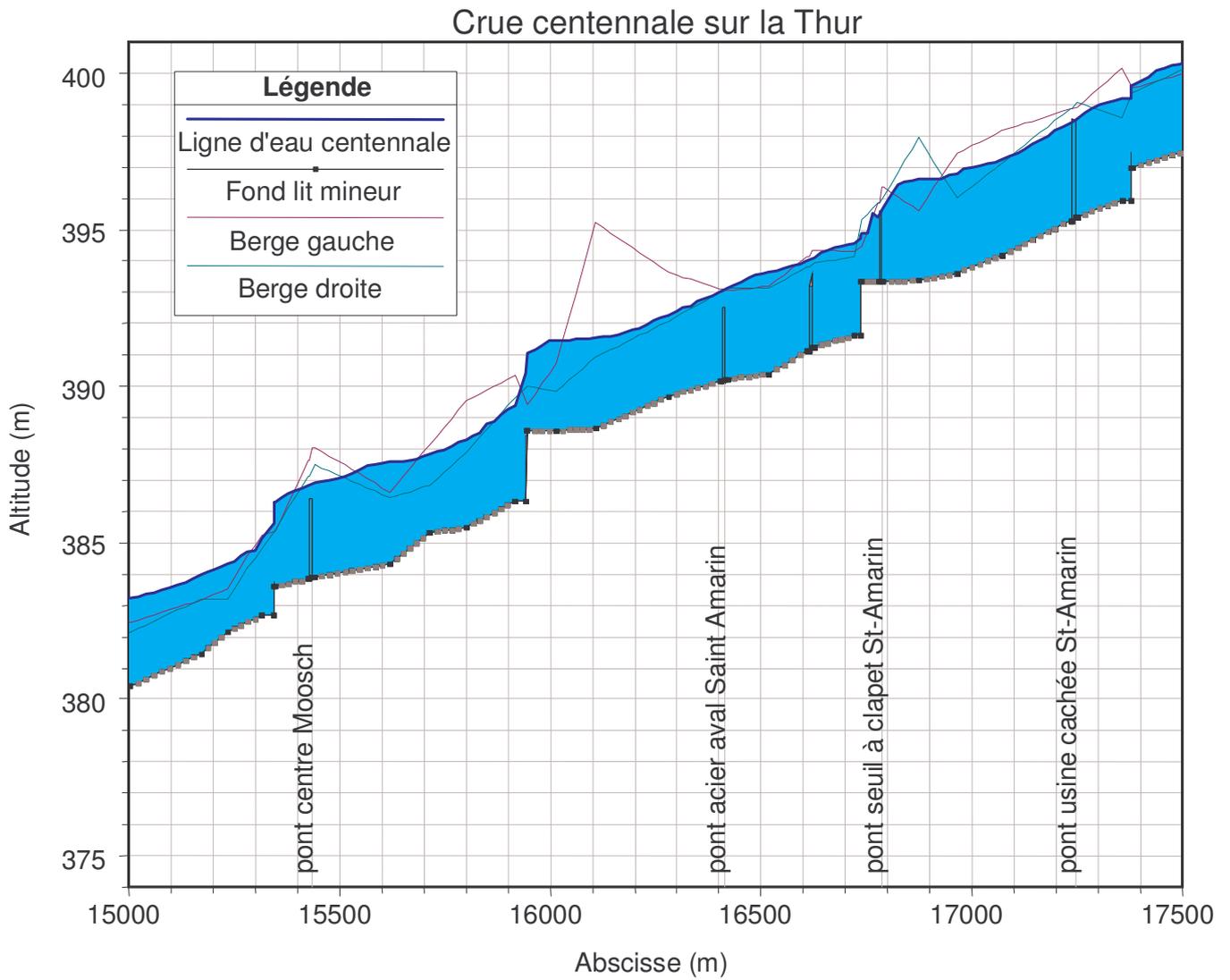
Communes : WILLER/THUR MOOSCH

Crue centennale sur la Thur



Profil en long - Ligne d'eau centennale

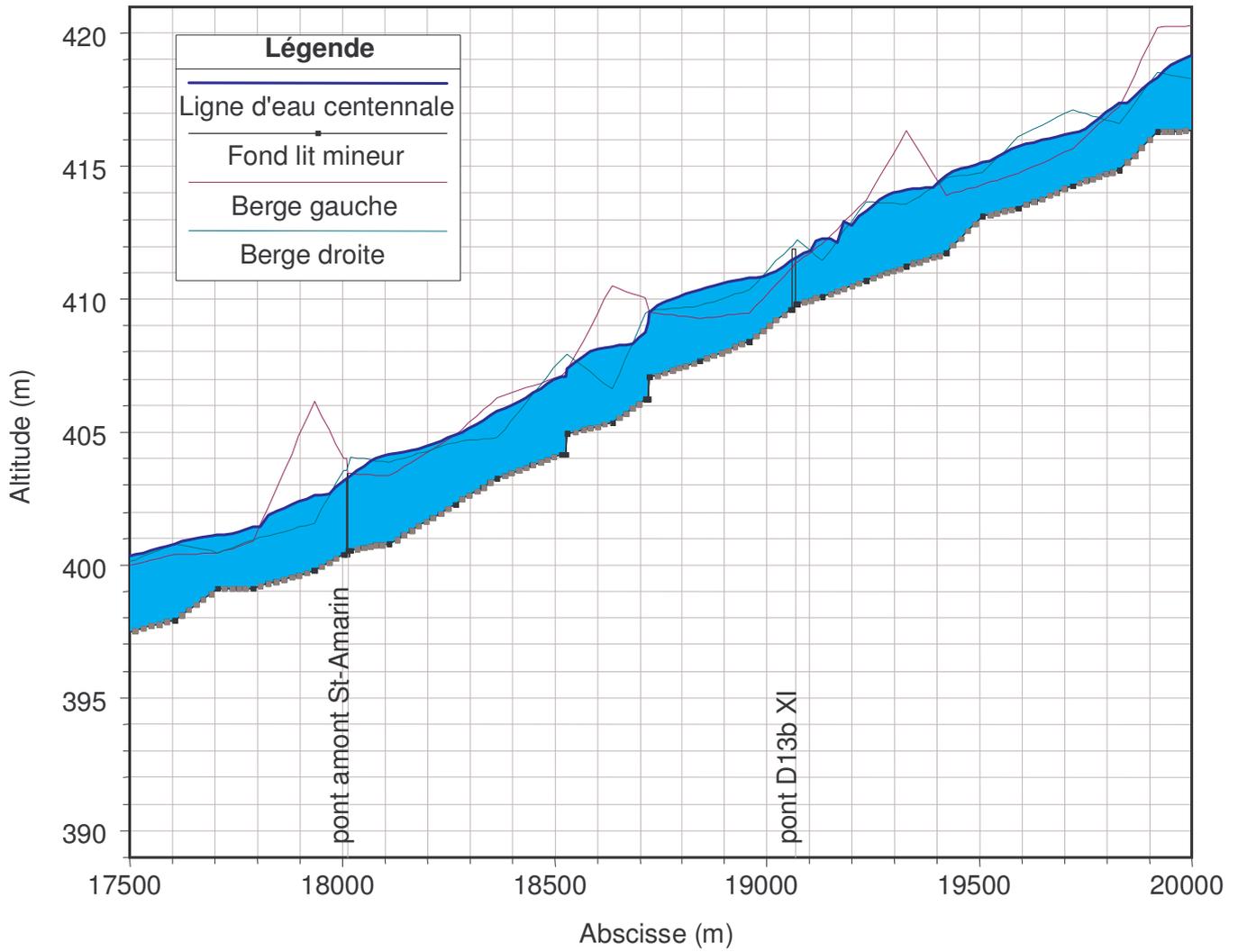
Communes : MOOSCH MALMERSPACH SAINT-AMARIN



Profil en long - Ligne d'eau centennale

Communes : SAINT-AMARIN RANSPACH

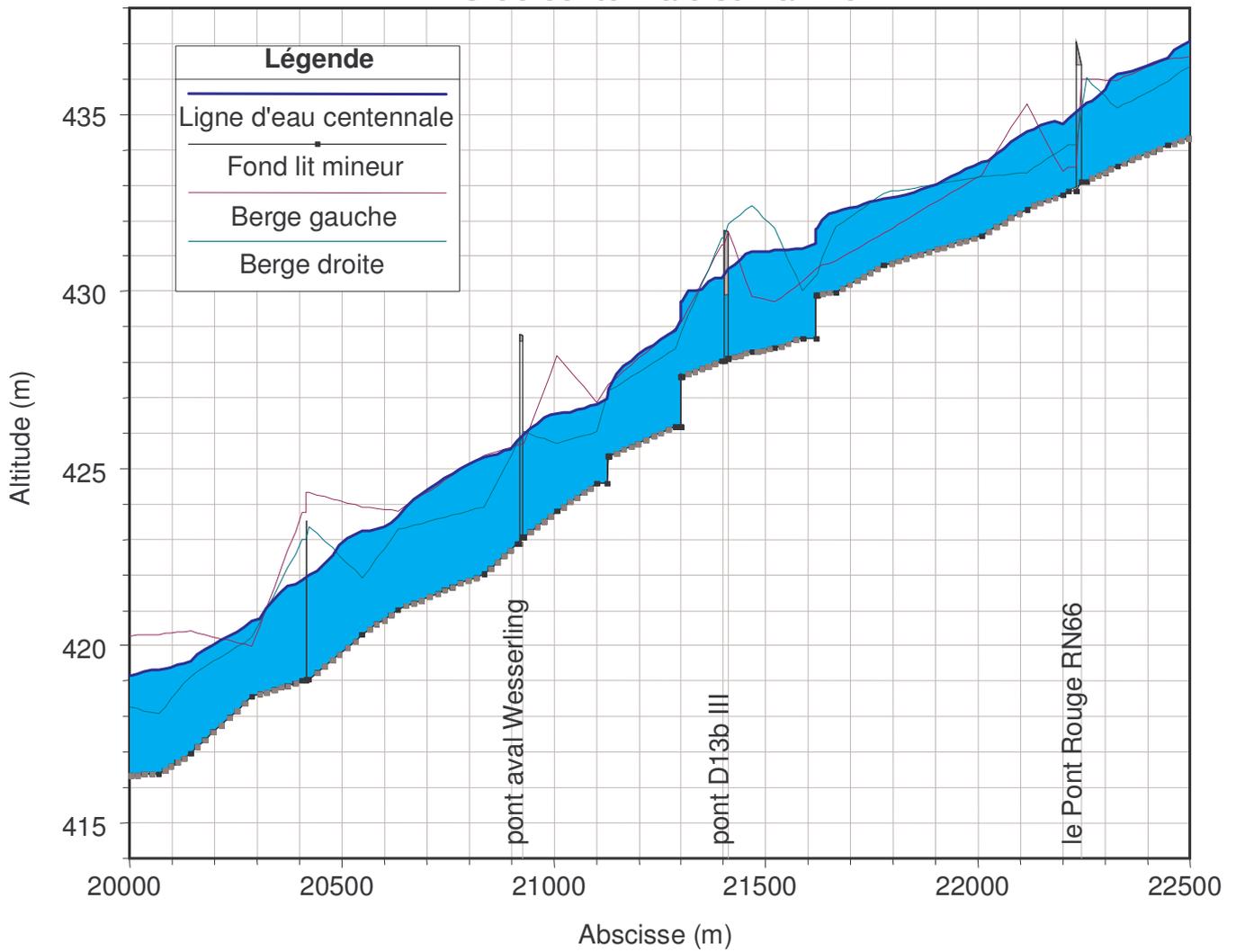
Crue centennale sur la Thur



Profil en long - Ligne d'eau centennale

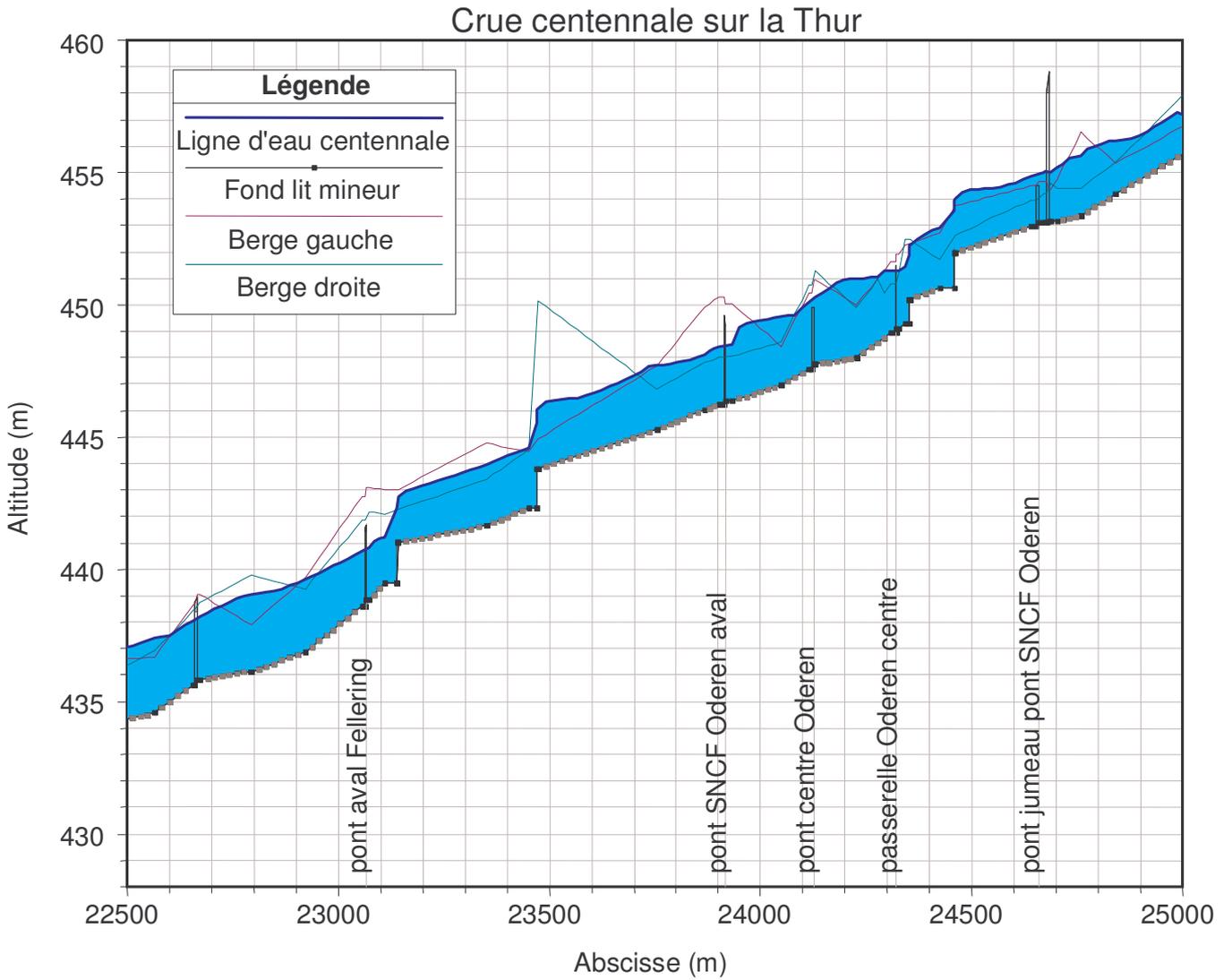
Communes : HUSSEREN-WESSERLING FELLERING

Crue centennale sur la Thur



Profil en long - Ligne d'eau centennale

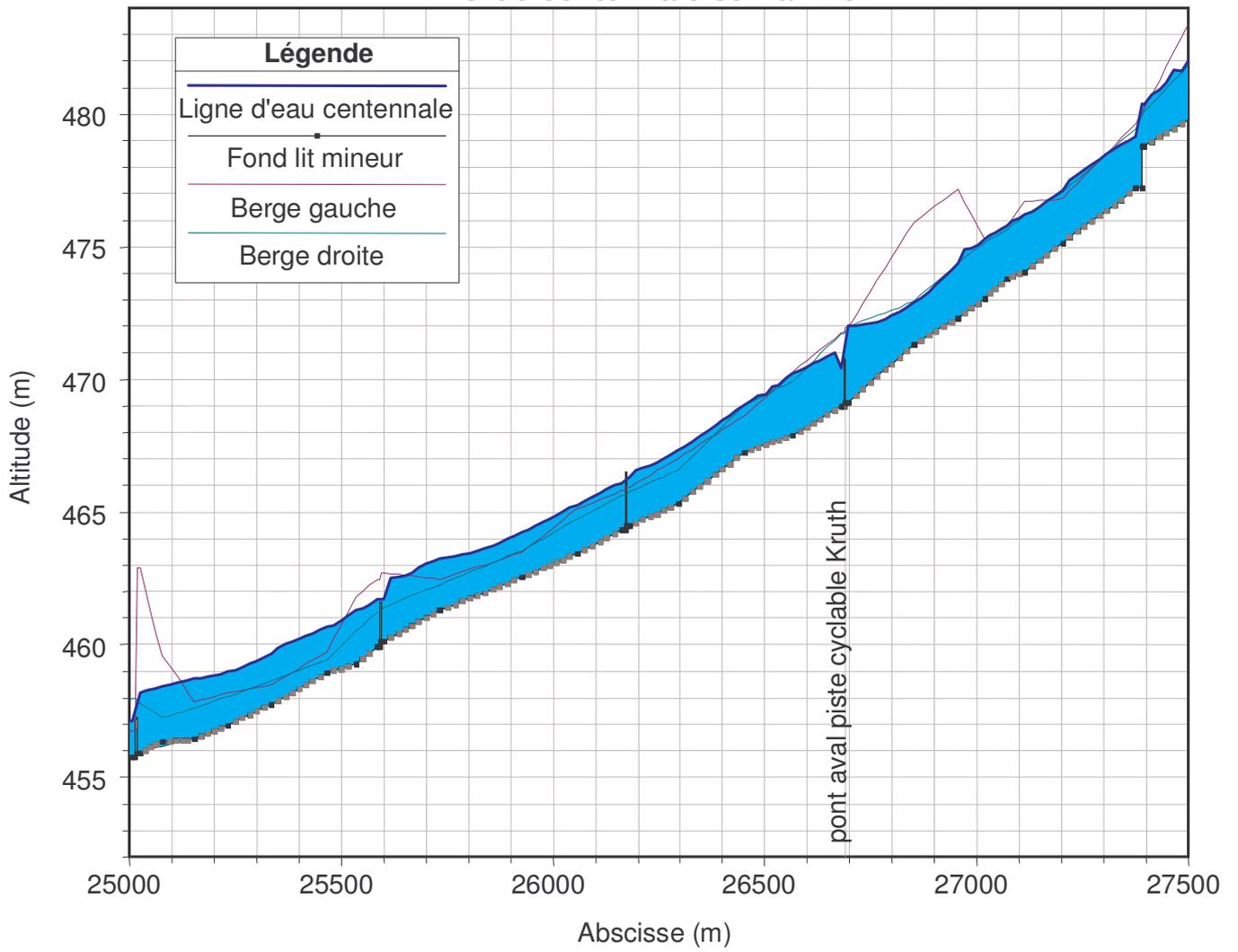
Communes : FELLERING ODEREN



Profil en long - Ligne d'eau centennale

Communes : ODEREN KRUTH

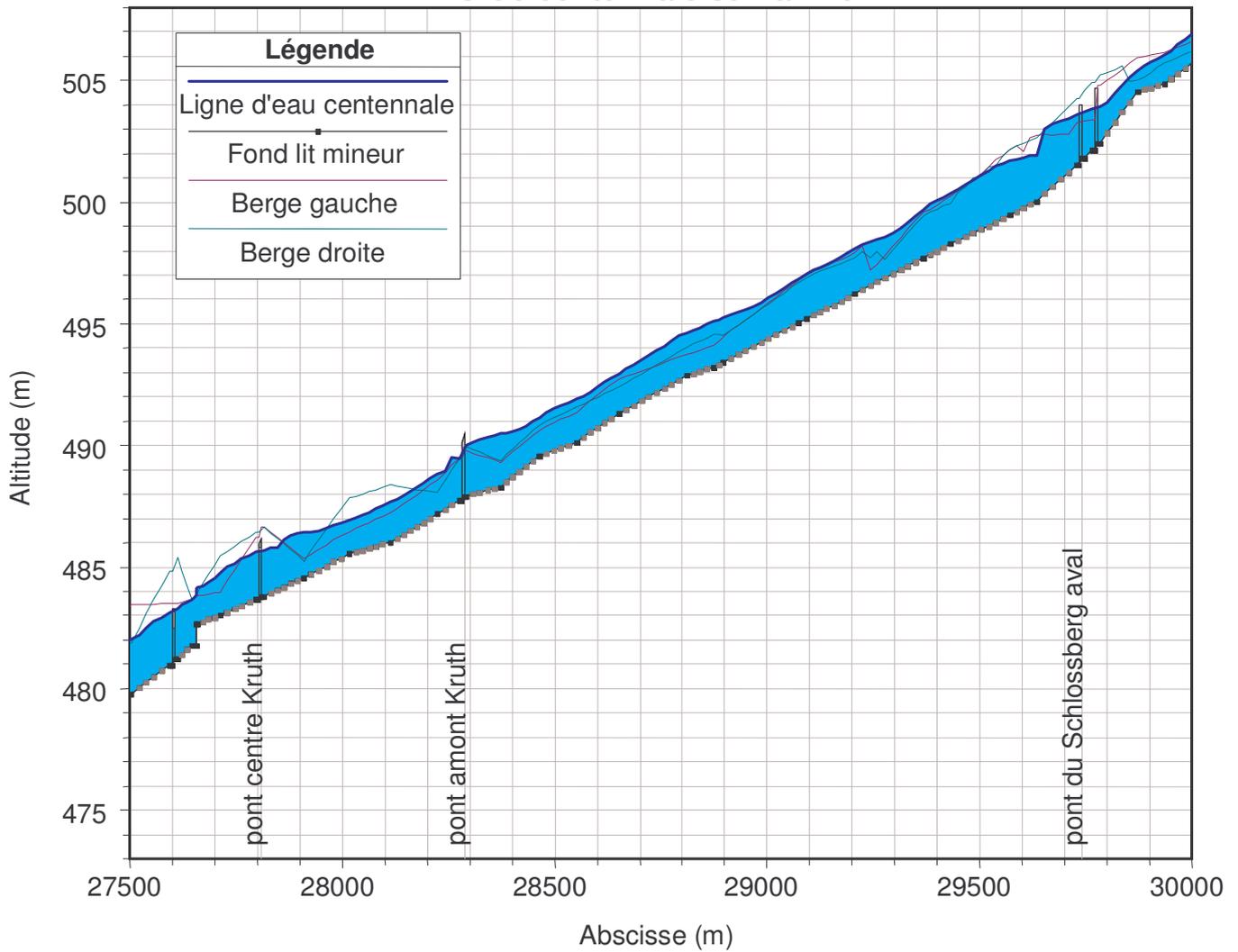
Crue centennale sur la Thur



Profil en long - Ligne d'eau centennale

Commune : KRUTH

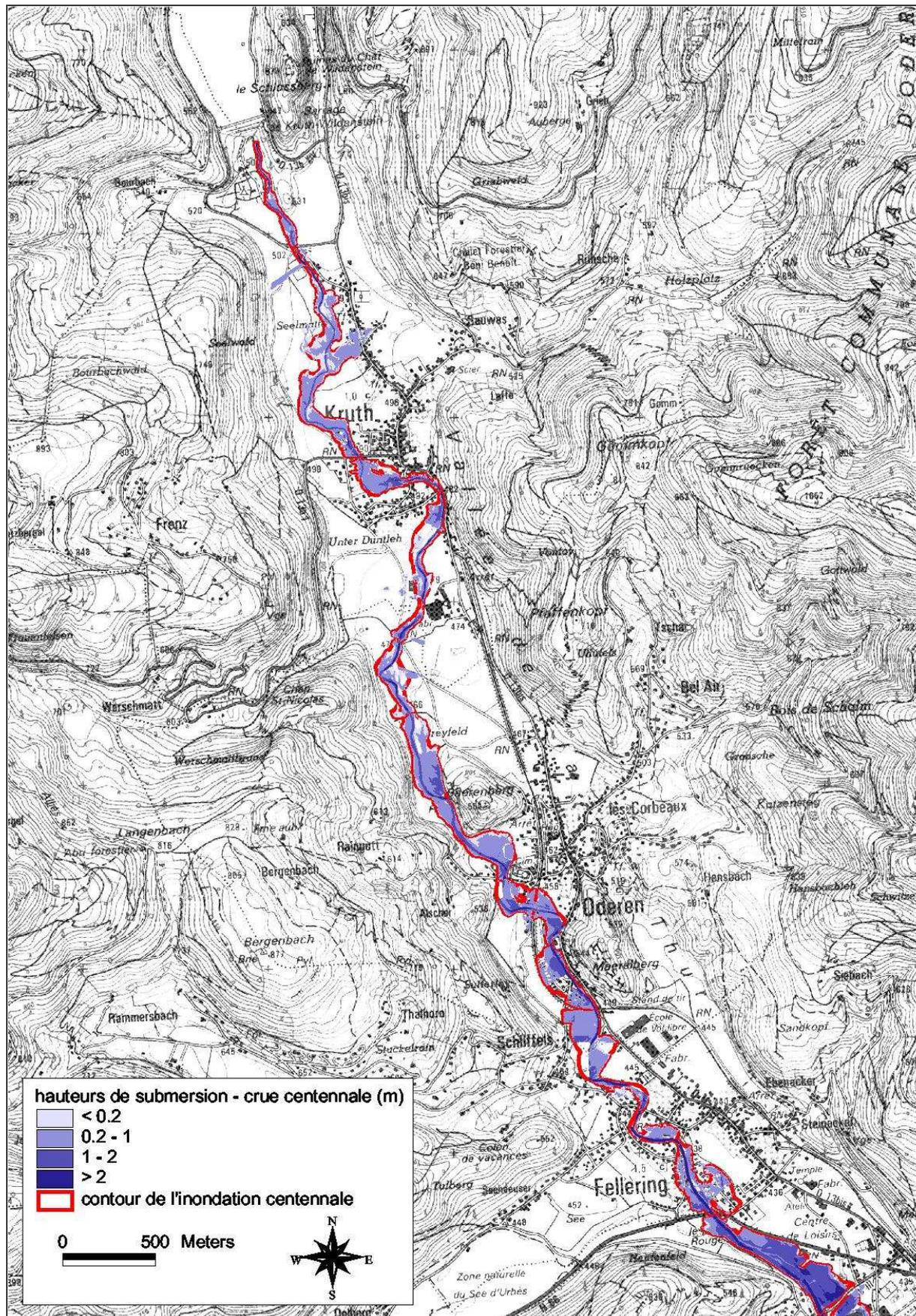
Crue centennale sur la Thur



Annexe 3 :
Contour de l'inondation centennale

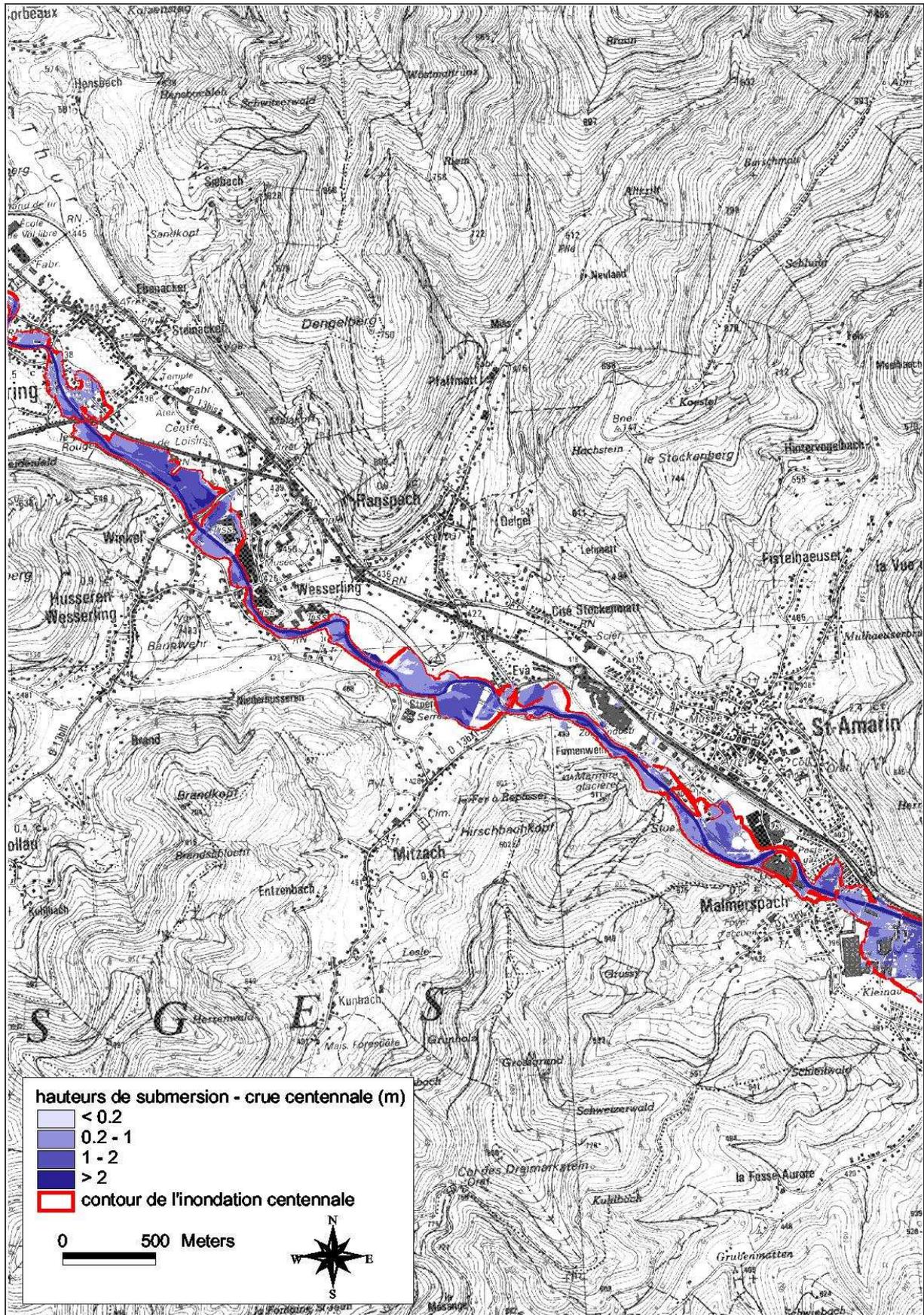
Contour de l'inondation centennale

Communes : KRUTH ODEREN FELLERING



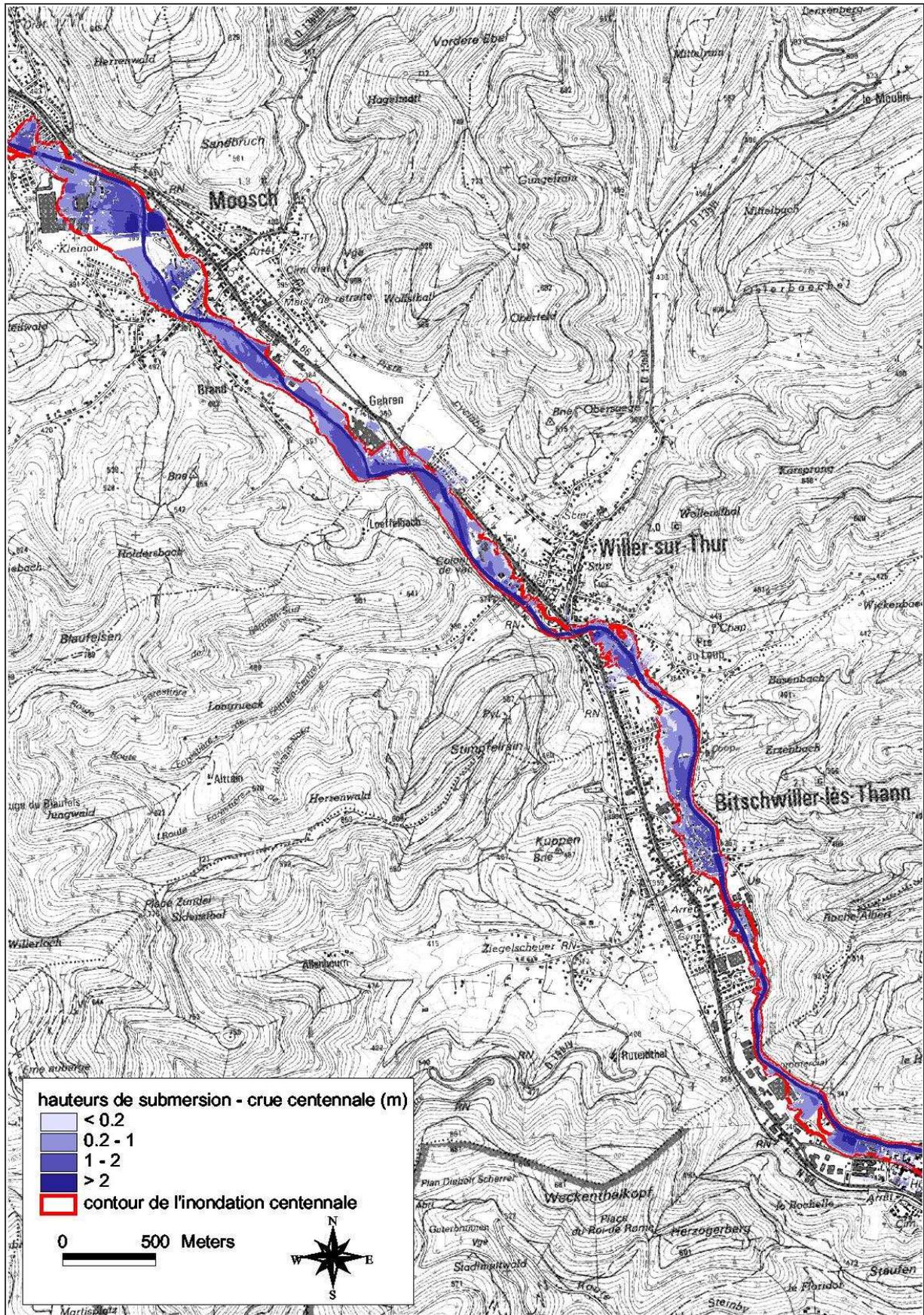
Contour de l'inondation centennale

FELLERING HUSSEREN-WESSERLING RANSPACH SAINT-AMARIN MALMERSPACH



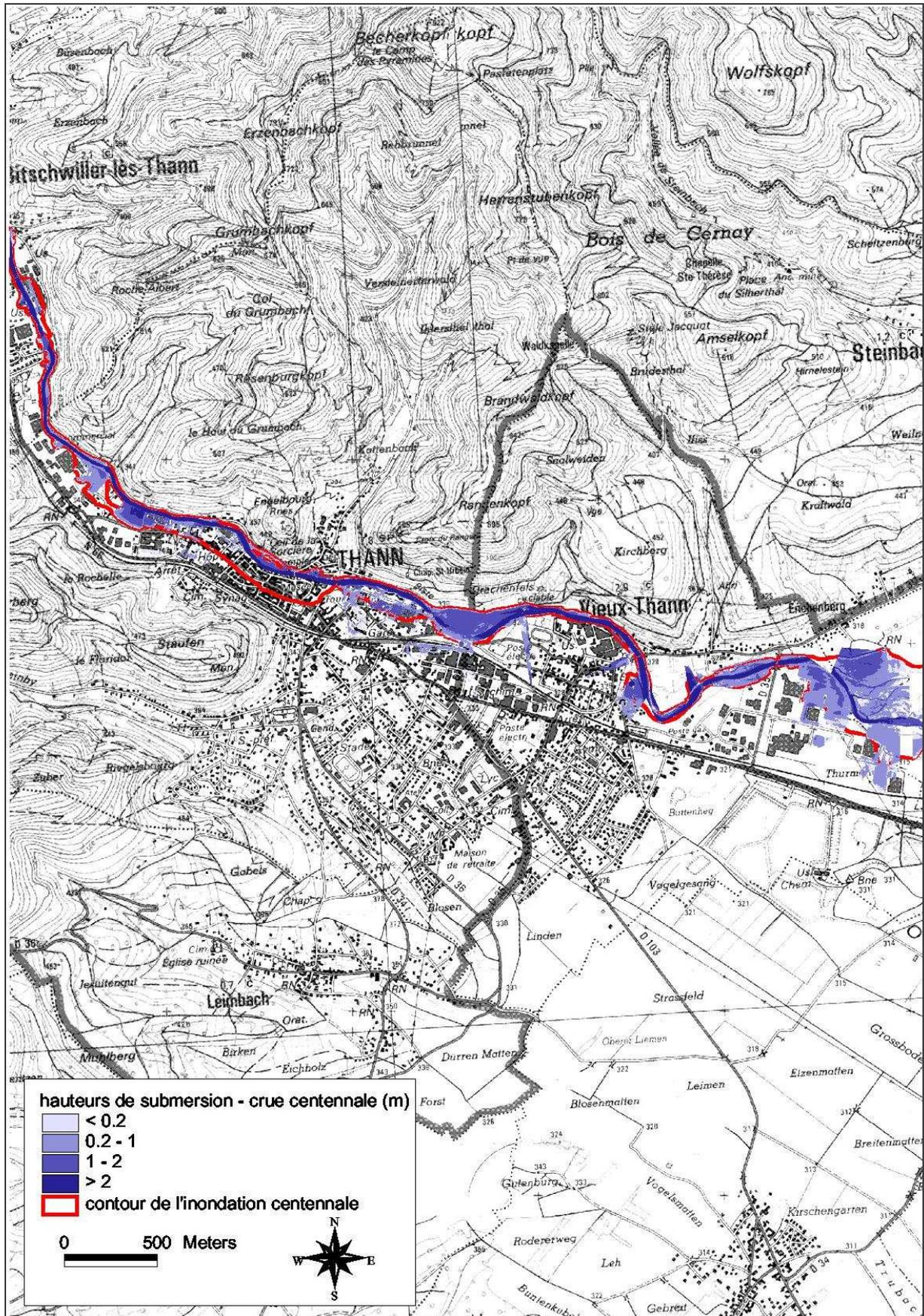
Contour de l'inondation centennale

Communes : MOOSCH WILLER-SUR-THUR BITSCHWILLER-LES-THANN



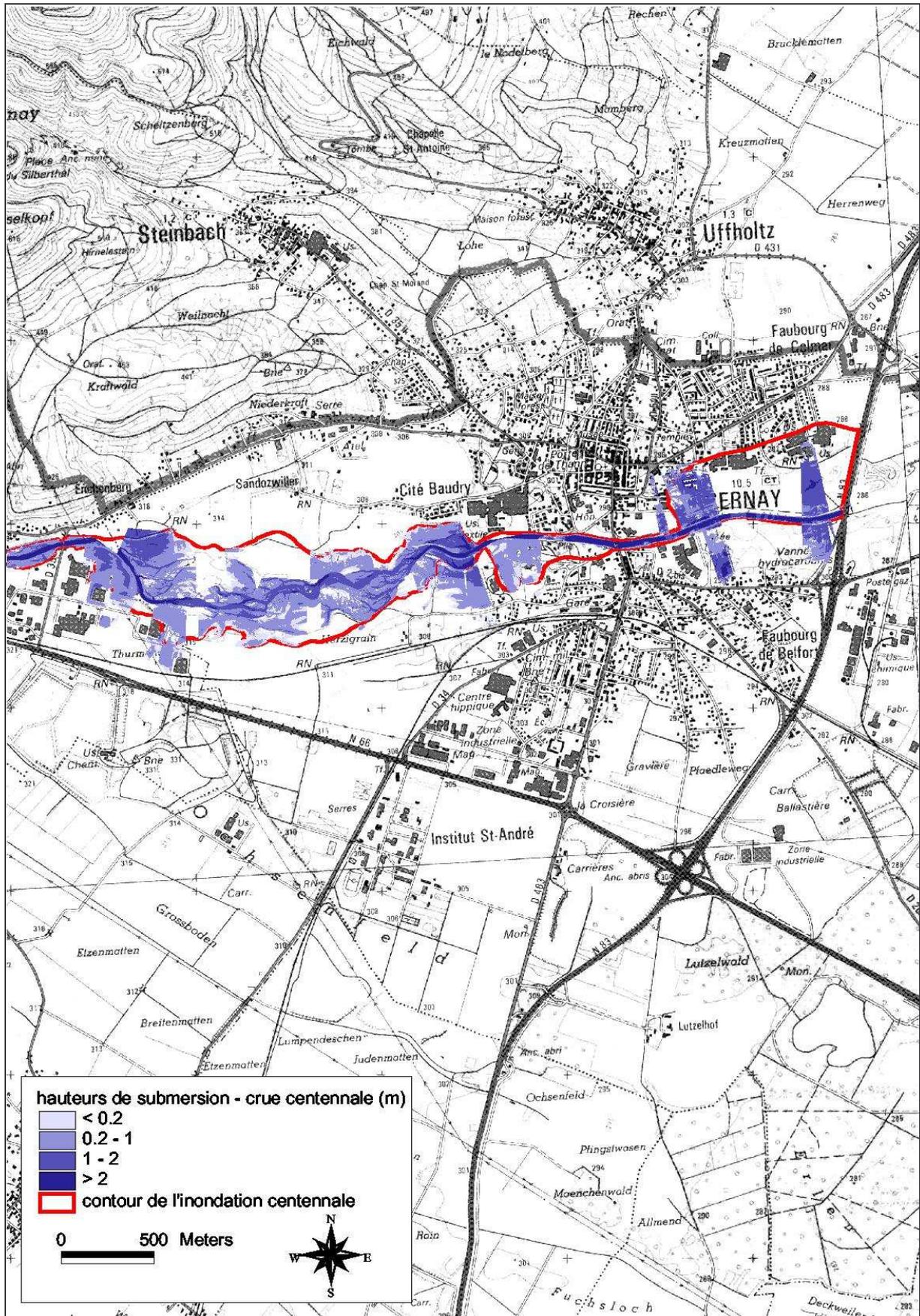
Contour de l'inondation centennale

Communes : THANN VIEUX-THANN



Contour de l'inondation centennale

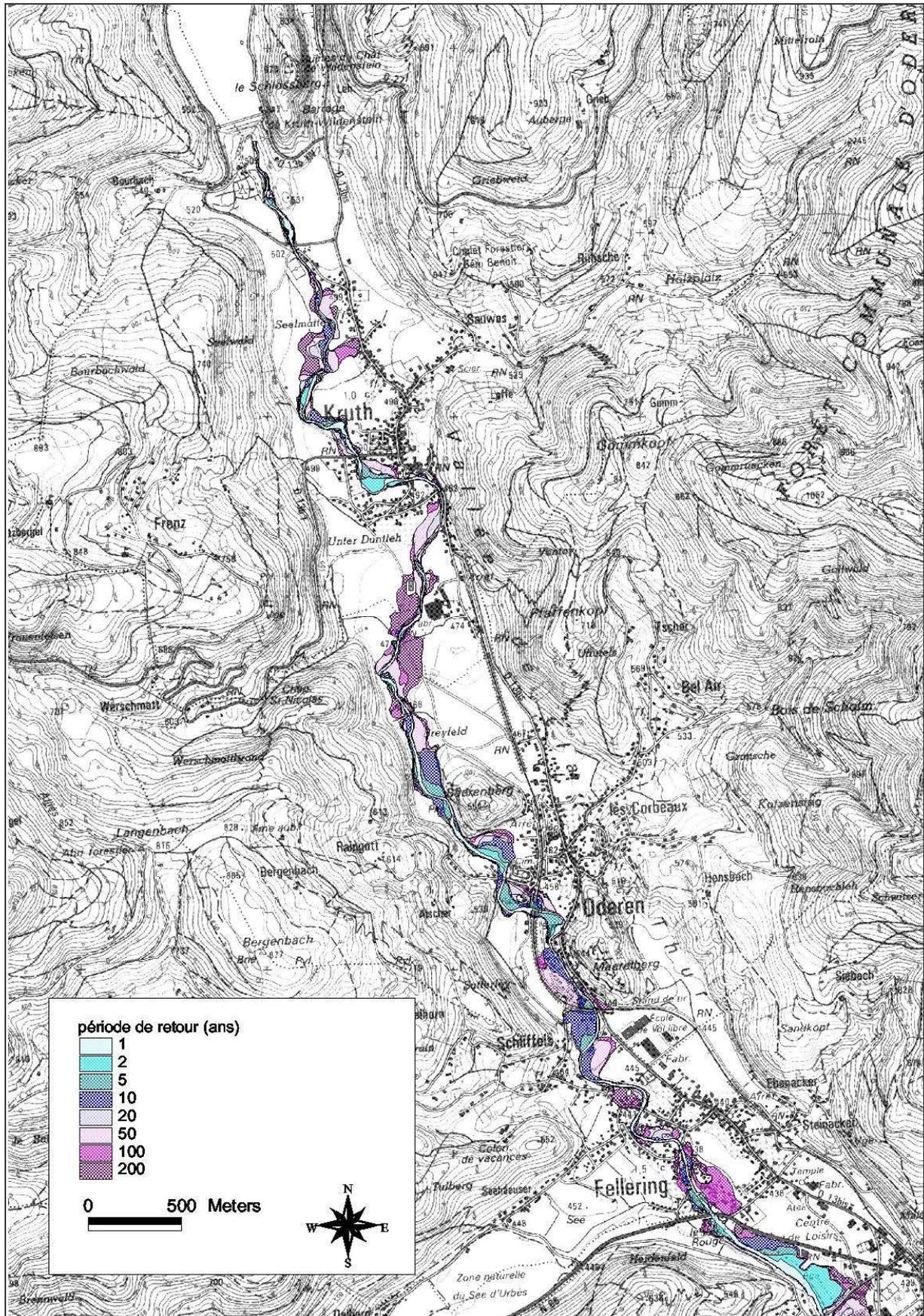
Commune : CERNAY



Annexe 4 :
**Contour des inondations de différentes
périodes de retour**

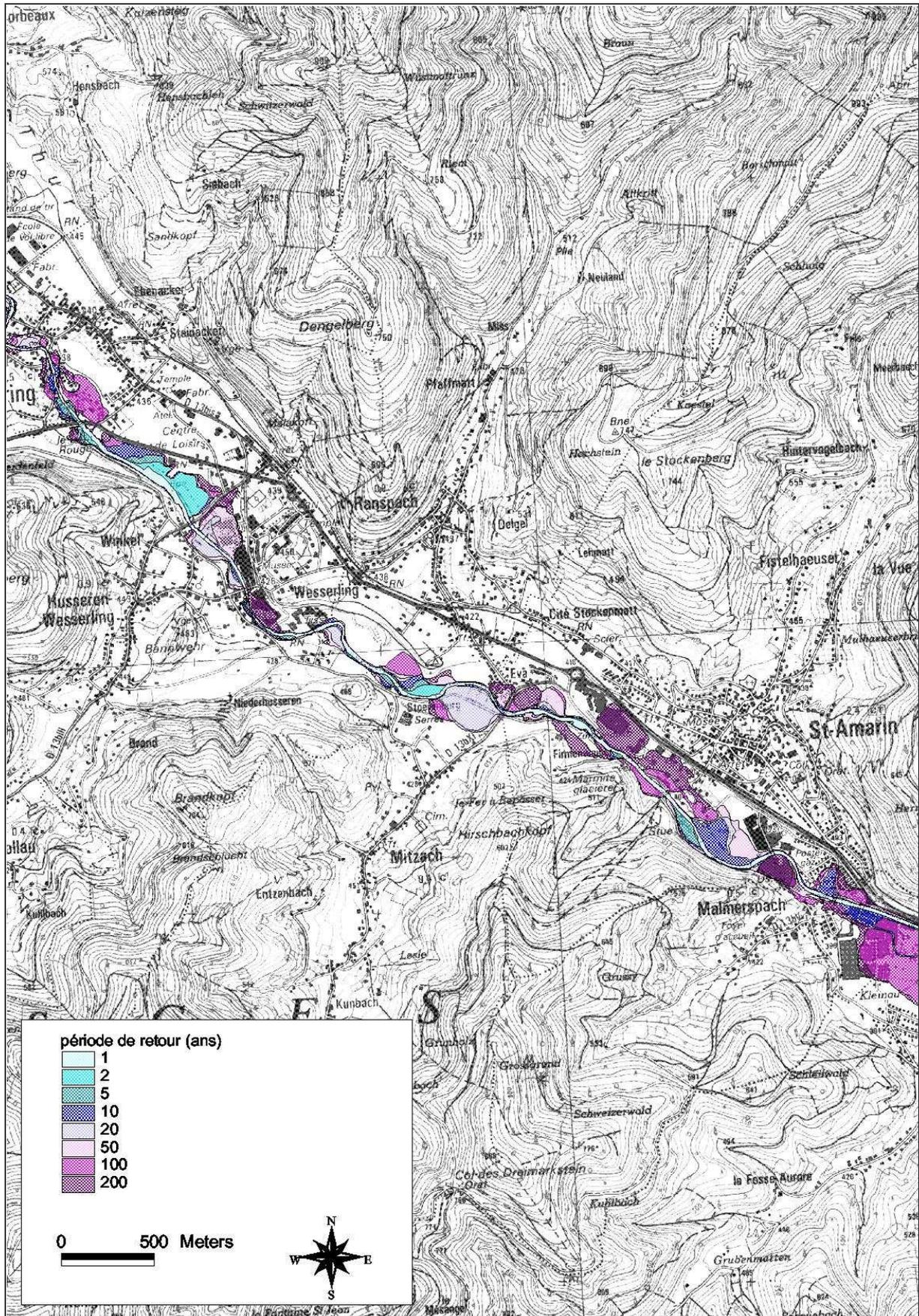
Contour des inondations de différentes périodes de retour

Communes : KRUTH ODEREN FELLERING



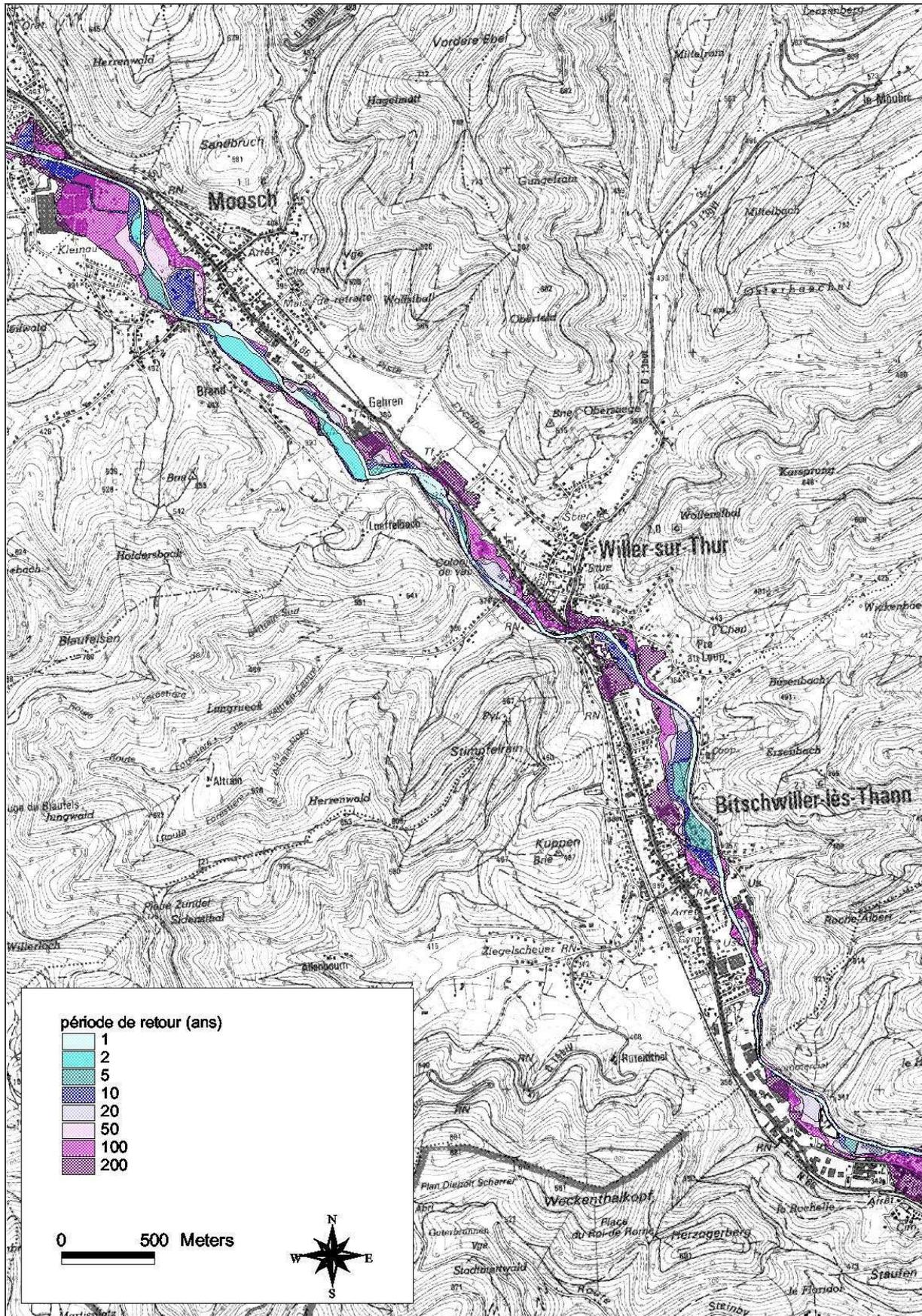
Contour des inondations de différentes périodes de retour

FELLERING HUSSEREN-WESSERLING RANSPACH SAINT-AMARIN MALMERSPACH



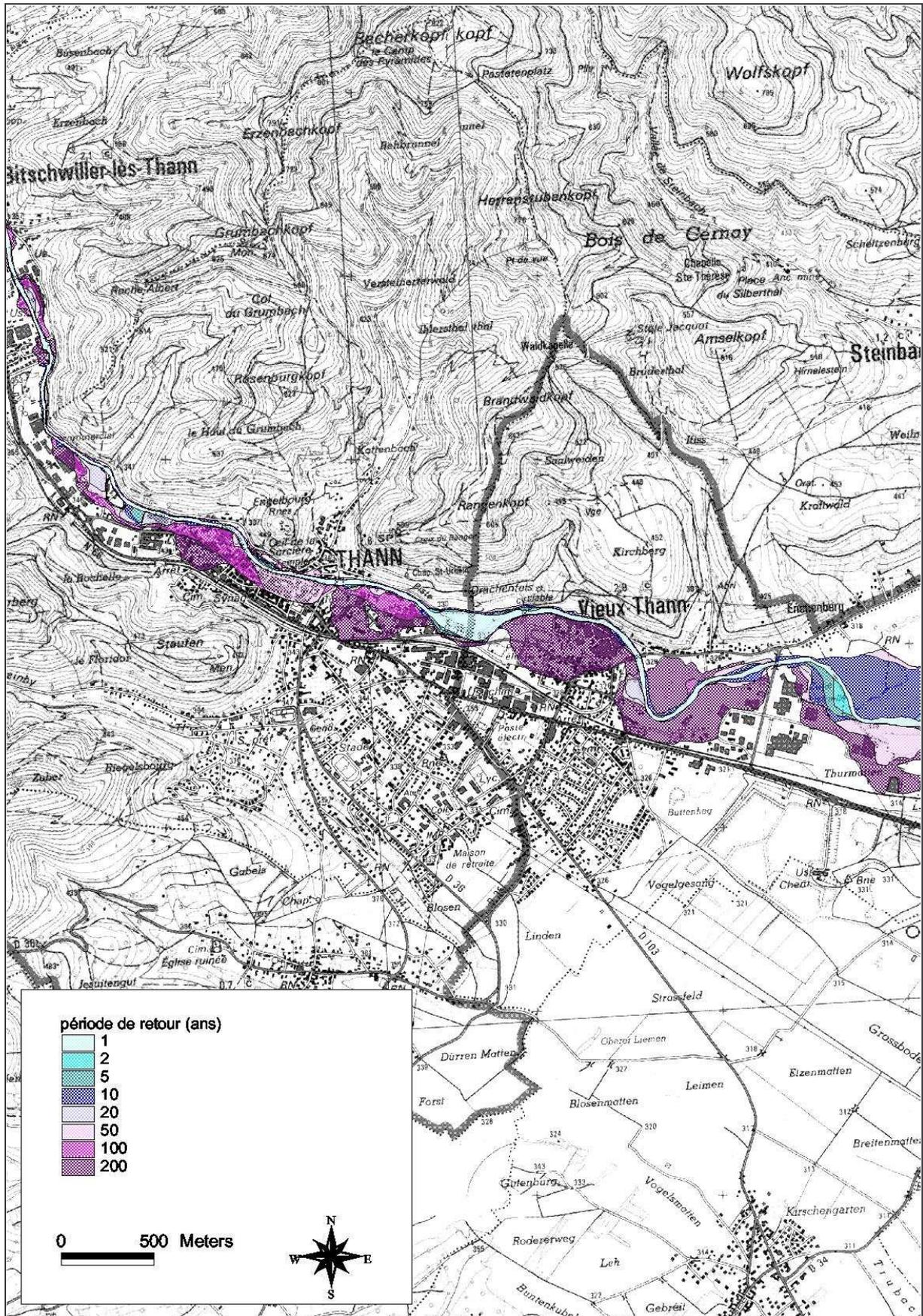
Contour des inondations de différentes périodes de retour

Communes : MOOSCH WILLER-SUR-THUR BITSCHWILLER-LES-THANN



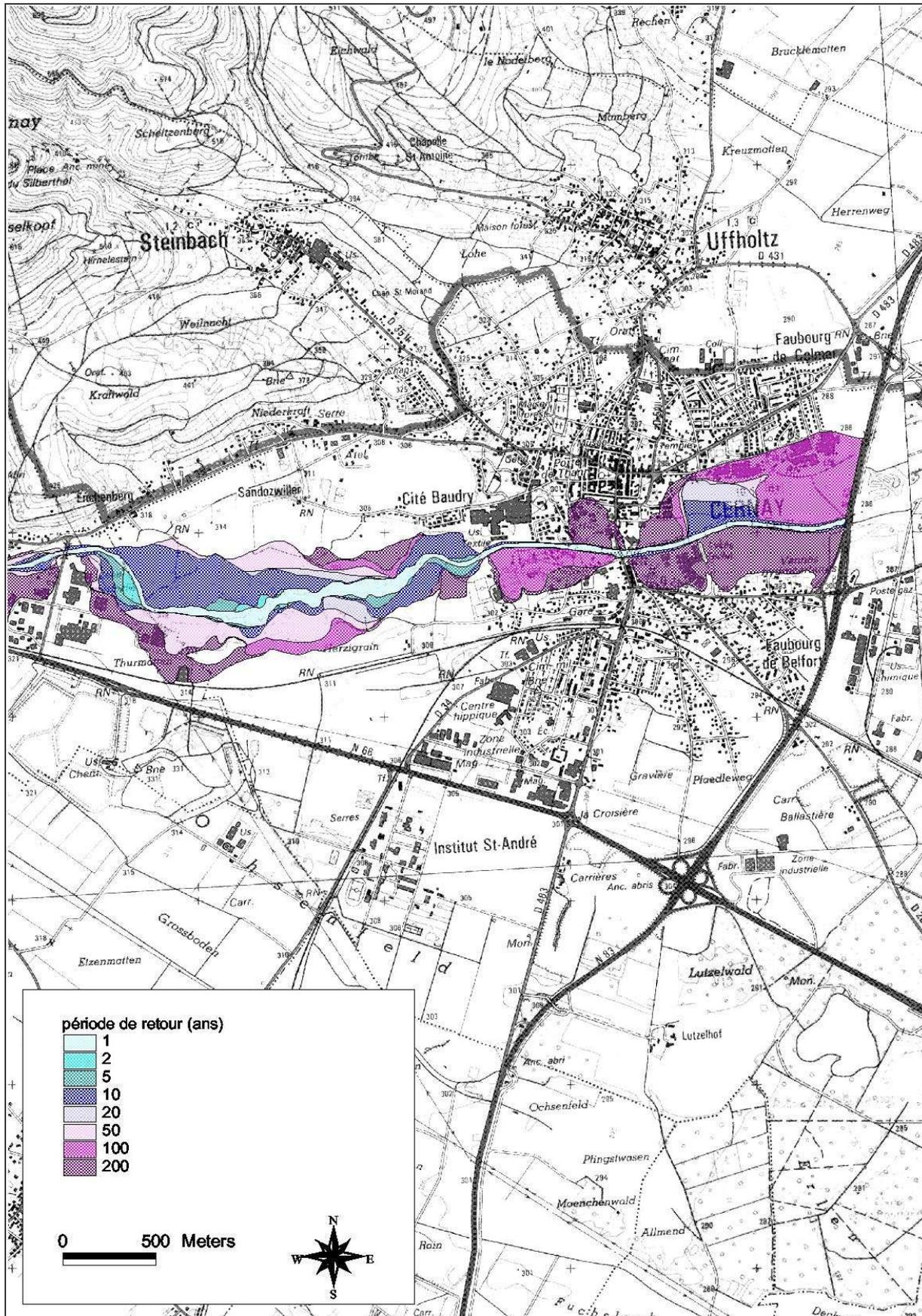
Contour des inondations de différentes périodes de retour

Communes : THANN VIEUX-THANN



Contour des inondations de différentes périodes de retour

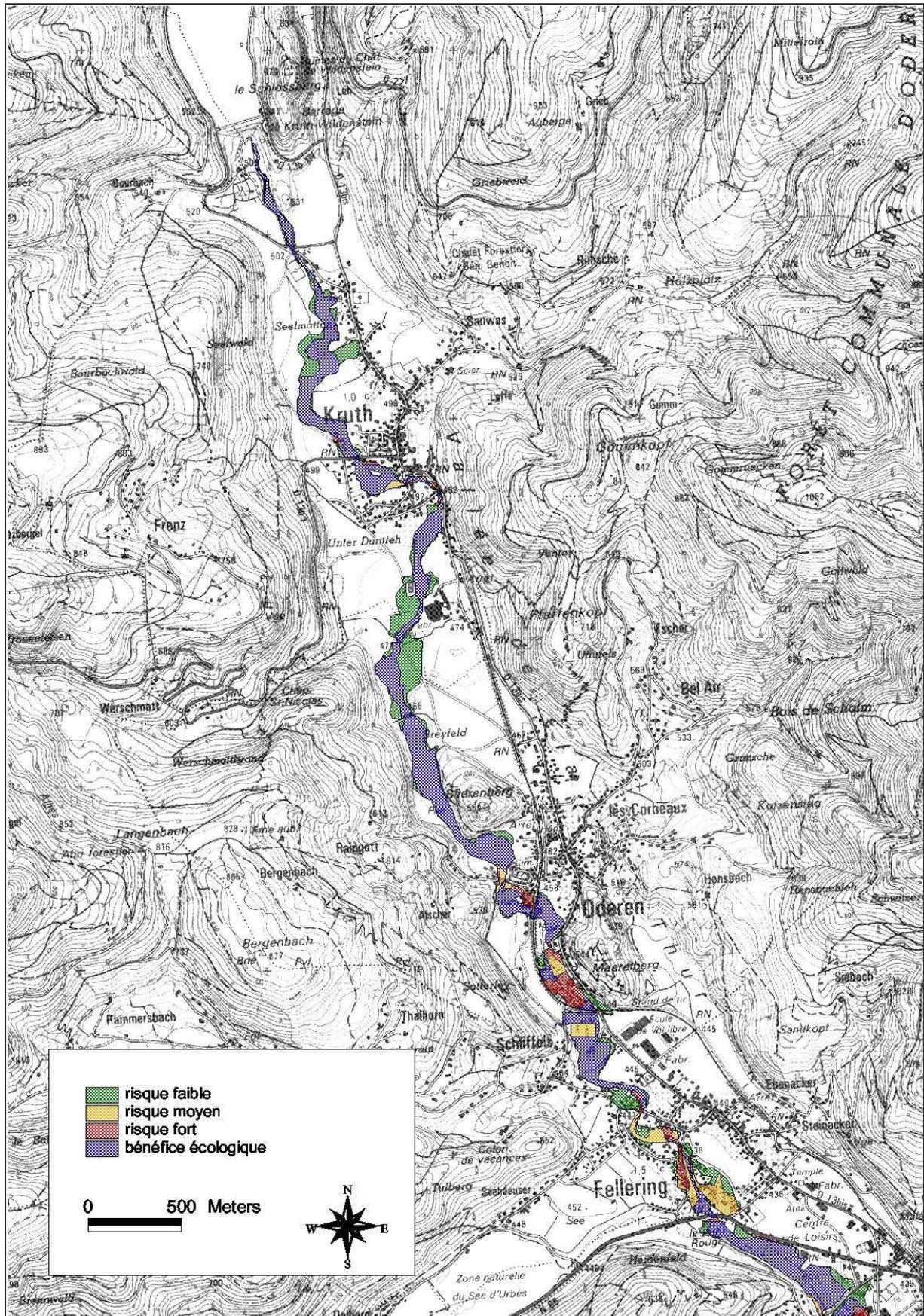
Commune : CERNAY



Annexe 5 :
Analyse qualitative du risque

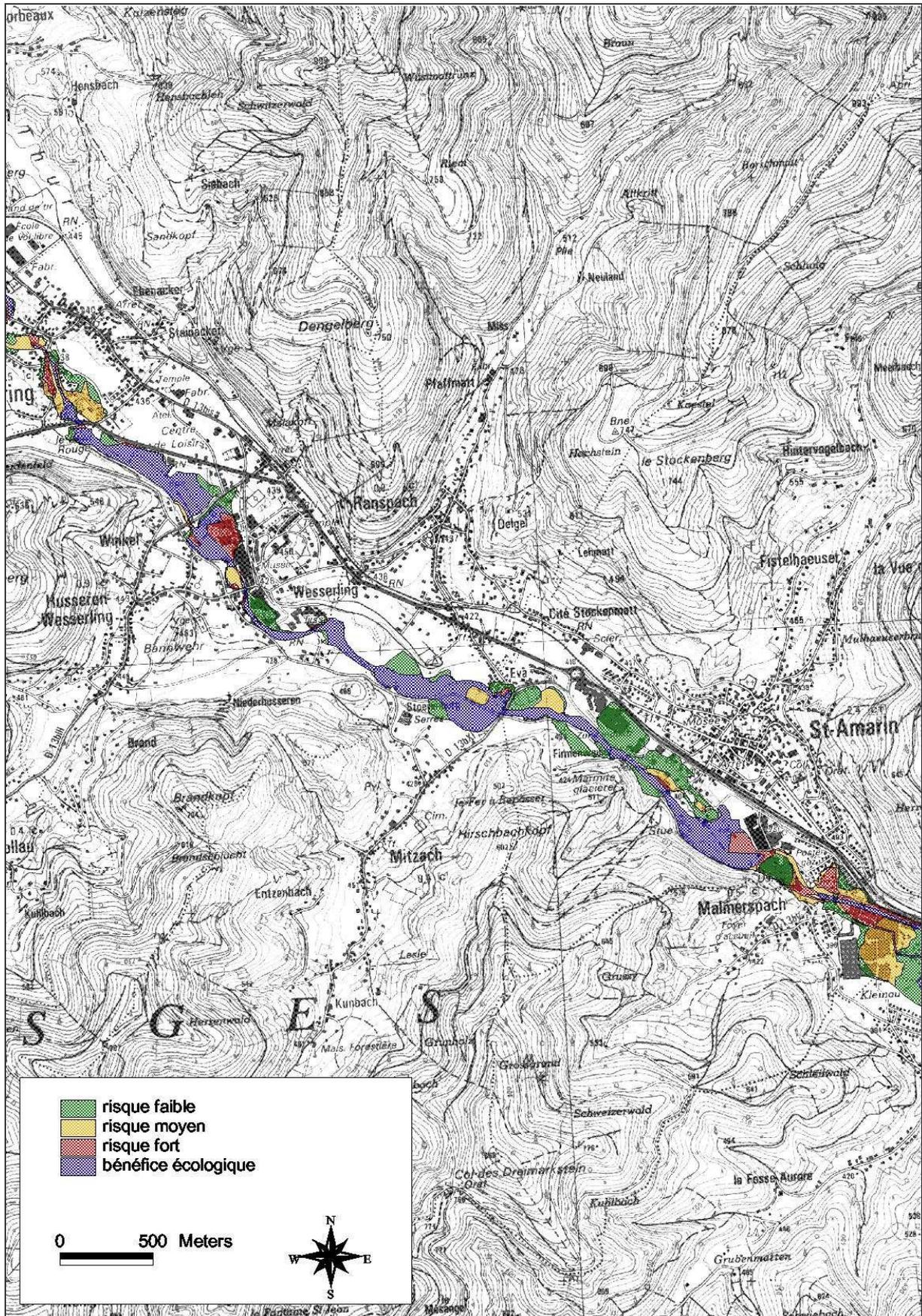
Analyse qualitative du risque

Communes : KRUTH ODEREN FELLERING



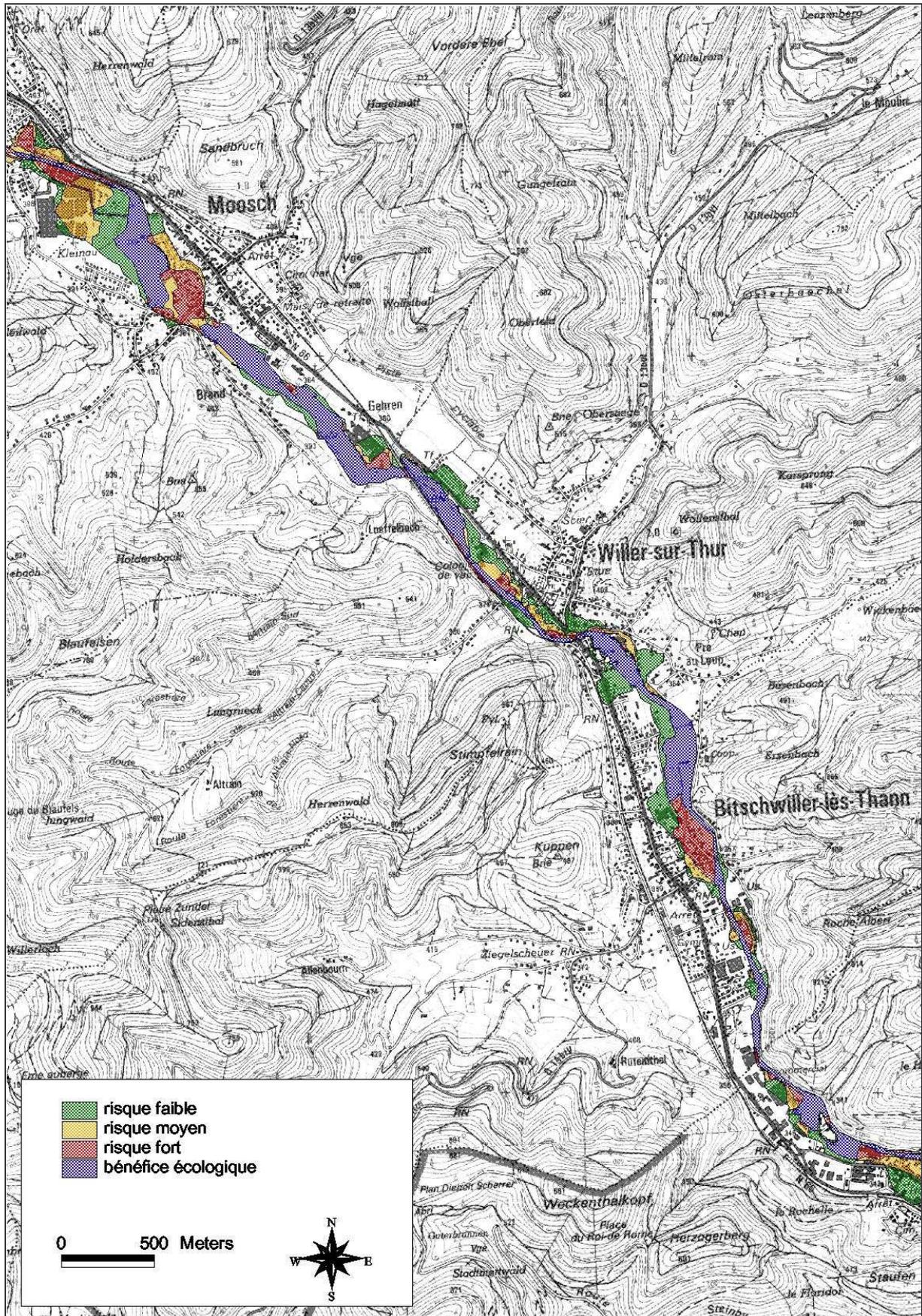
Analyse qualitative du risque

FELLERING HUSSEREN-WESSERLING RANSPACH SAINT-AMARIN MALMERSPACH



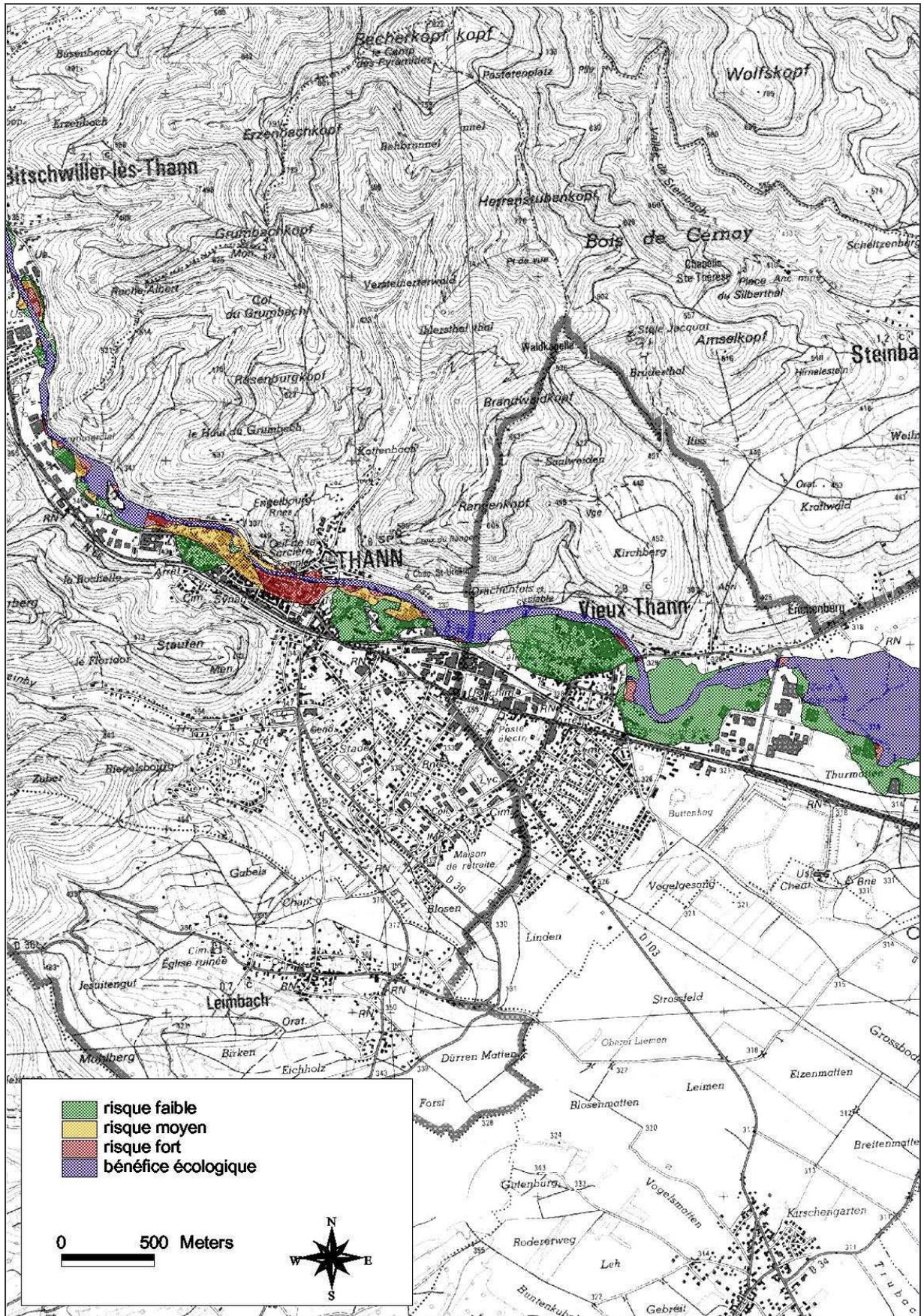
Analyse qualitative du risque

Communes : MOOSCH WILLER-SUR-THUR BITSCHWILLER-LES-THANN



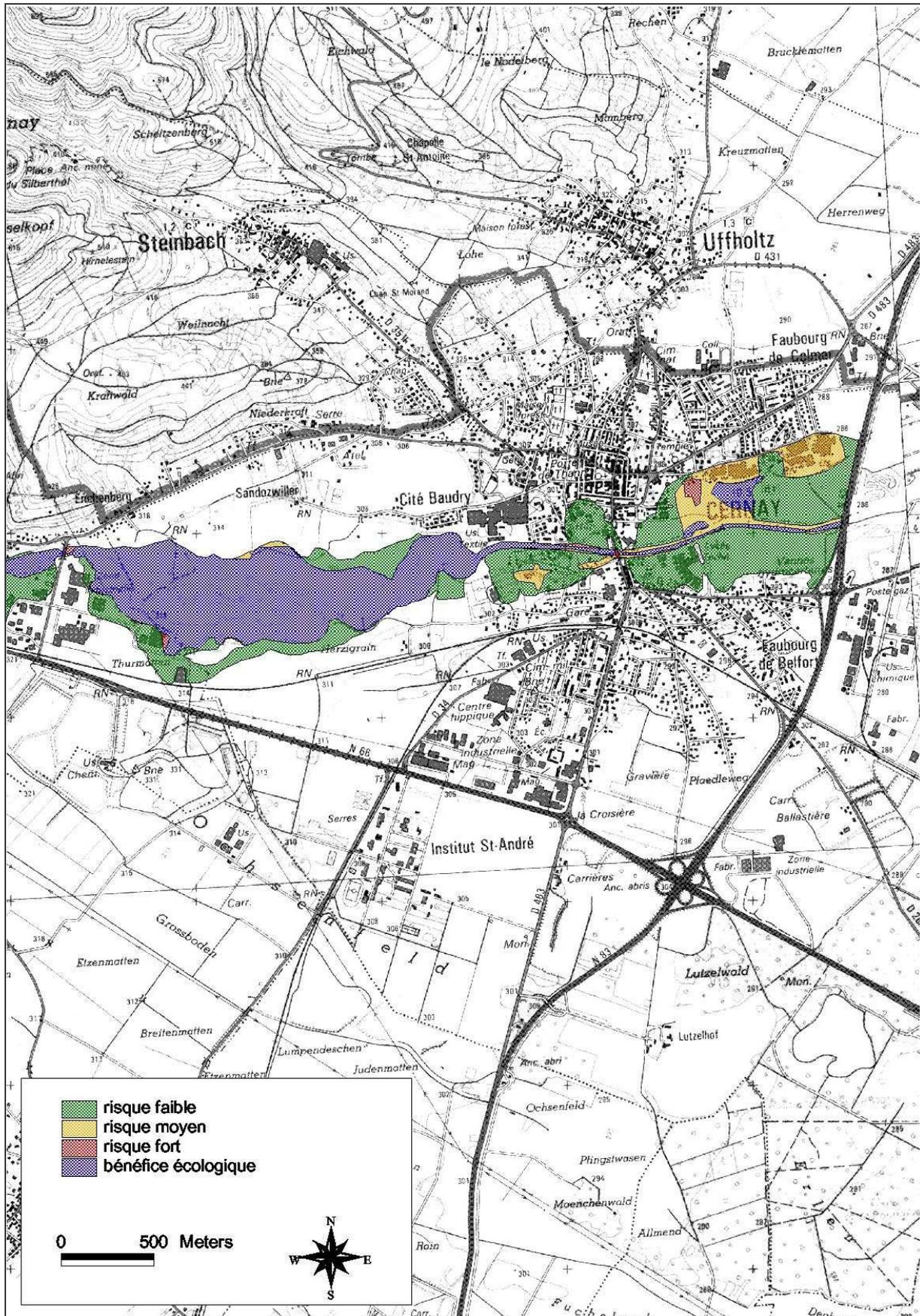
Analyse qualitative du risque

Communes : THANN VIEUX-THANN



Analyse qualitative du risque

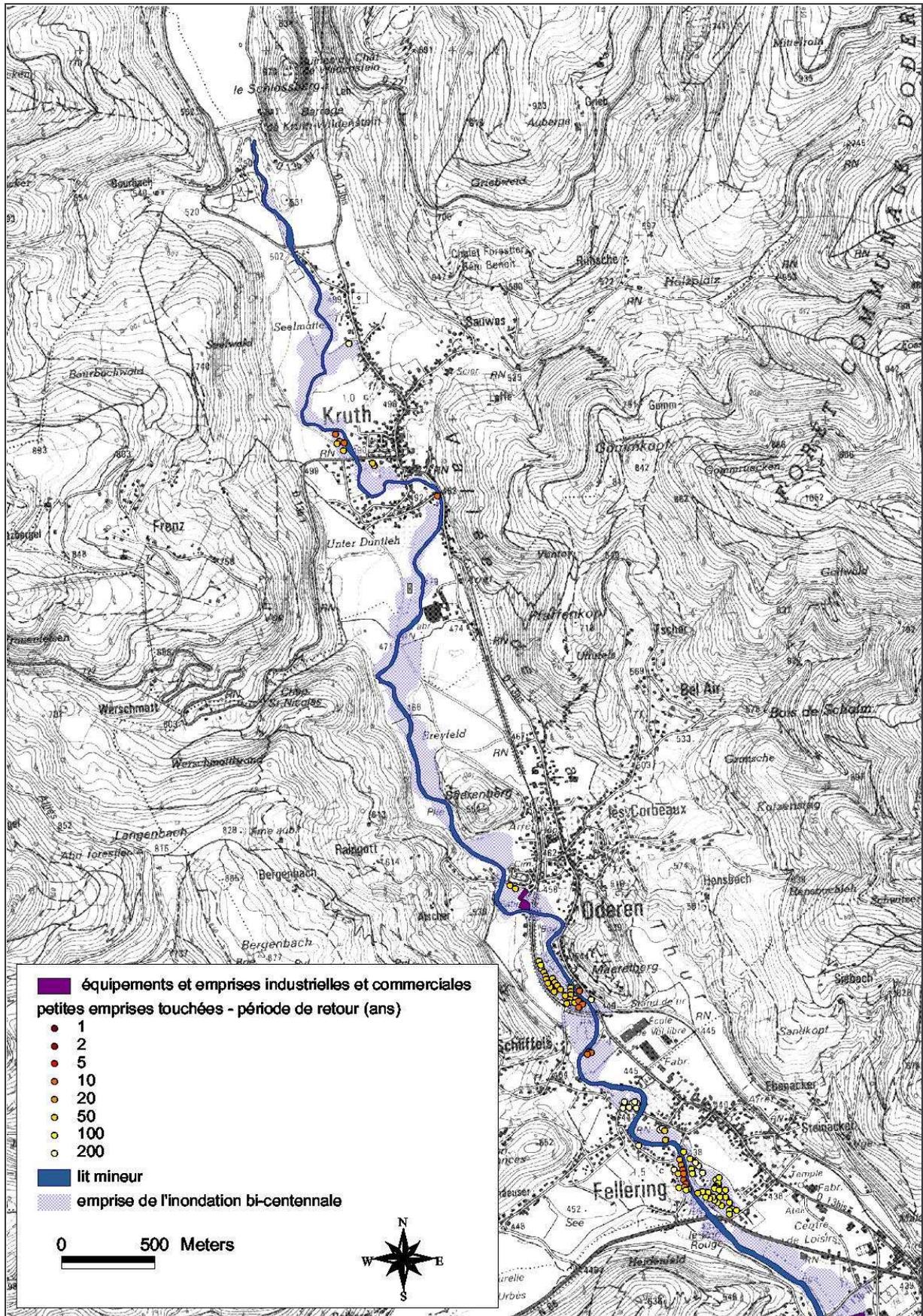
Commune : CERNAY



Annexe 6 :
Analyse quantitative du risque

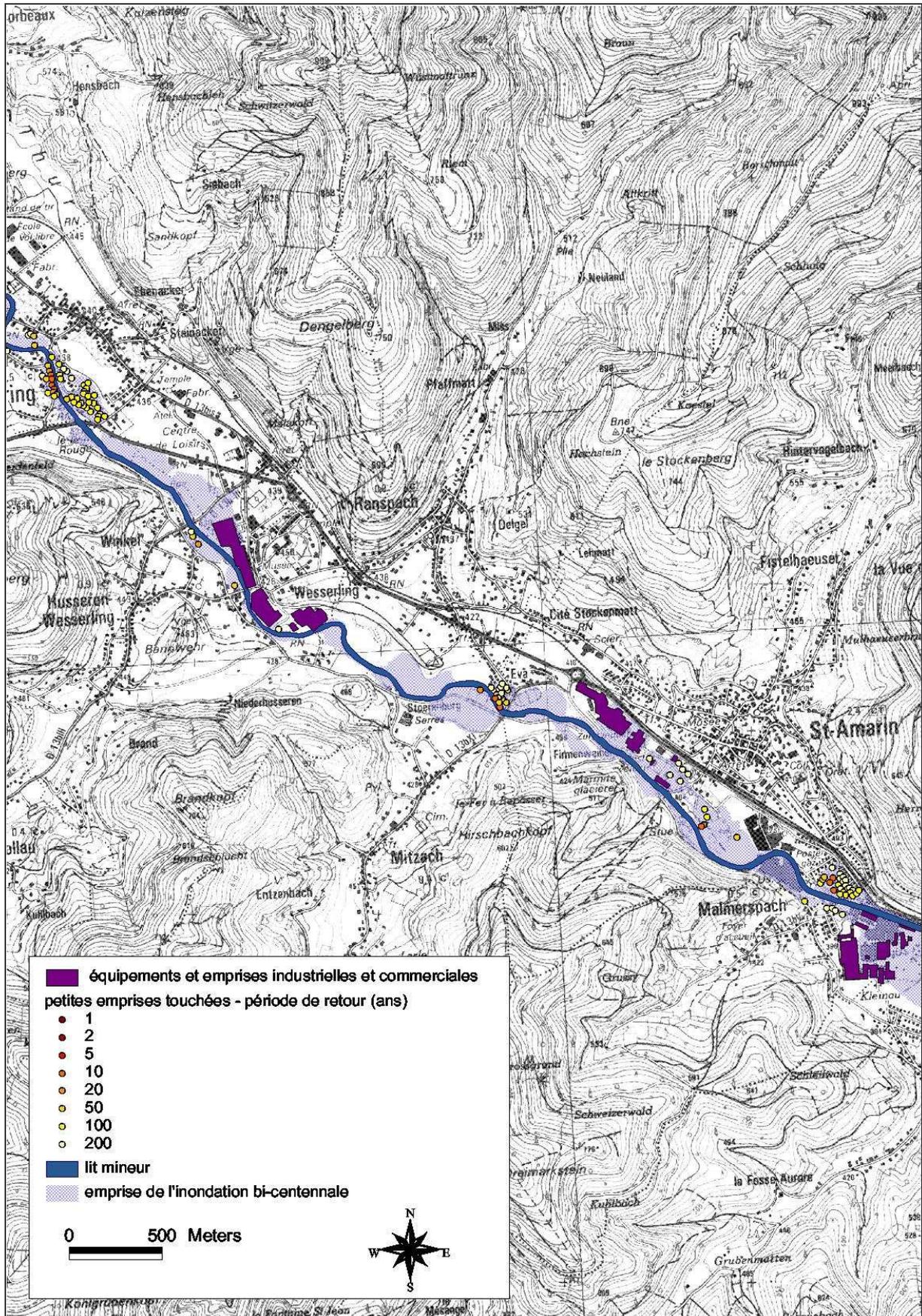
Analyse quantitative du risque

Communes : KRUTH ODEREN FELLERING



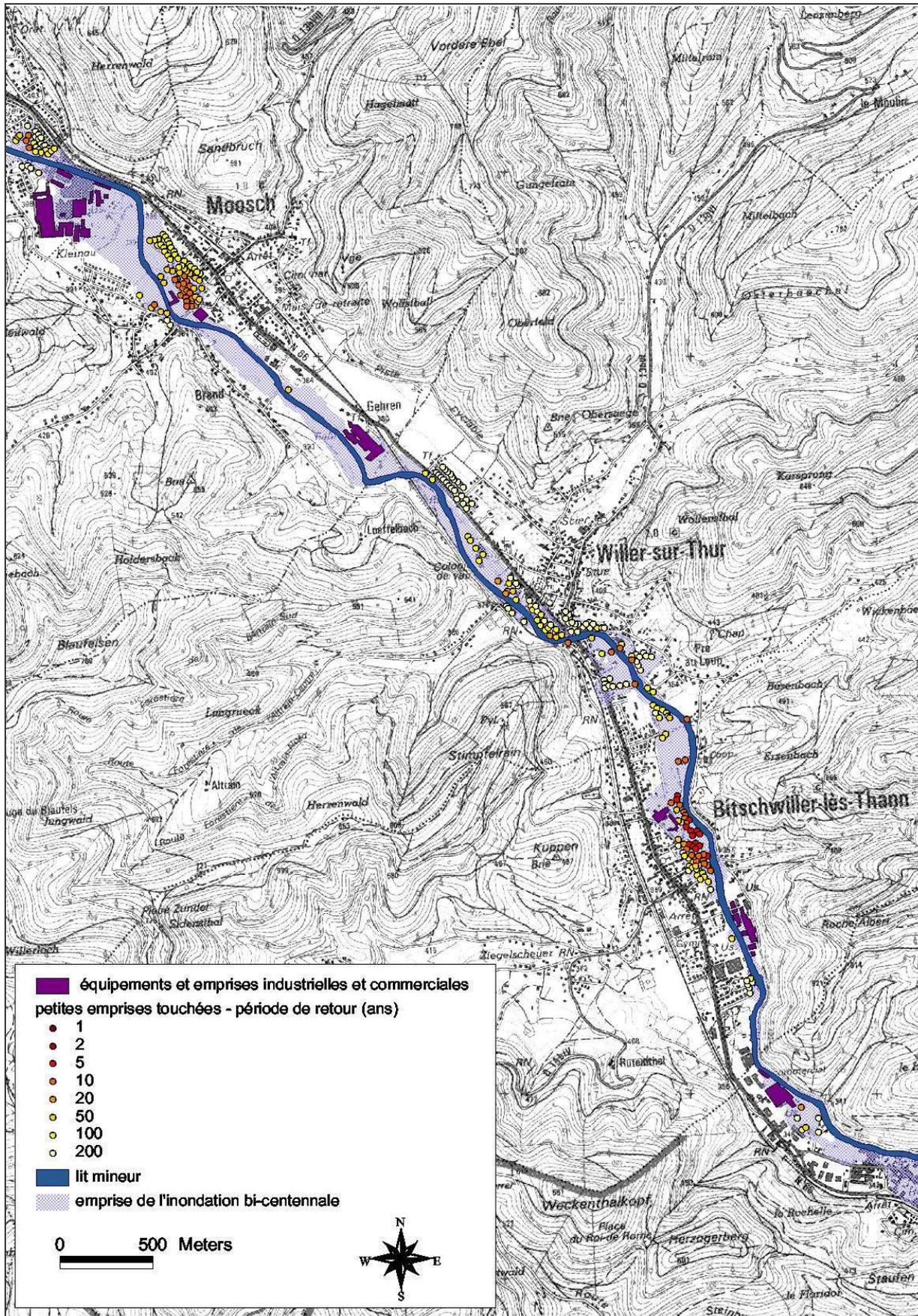
Analyse quantitative du risque

FELLERING HUSSEREN-WESSERLING RANSPACH SAINT-AMARIN MALMERSPACH



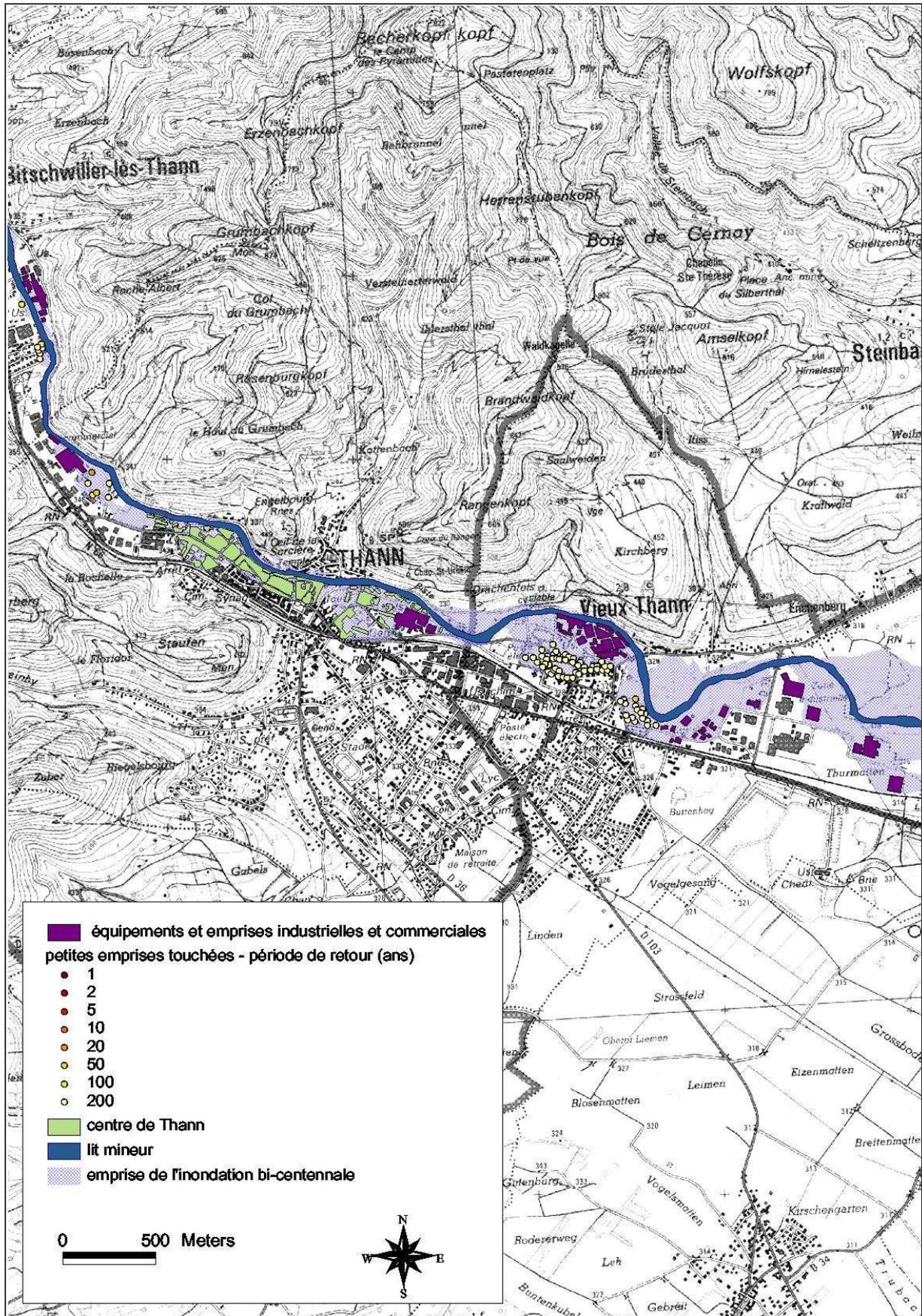
Analyse quantitative du risque

Communes : MOOSCH WILLER-SUR-THUR BITSCHWILLER-LES-THANN



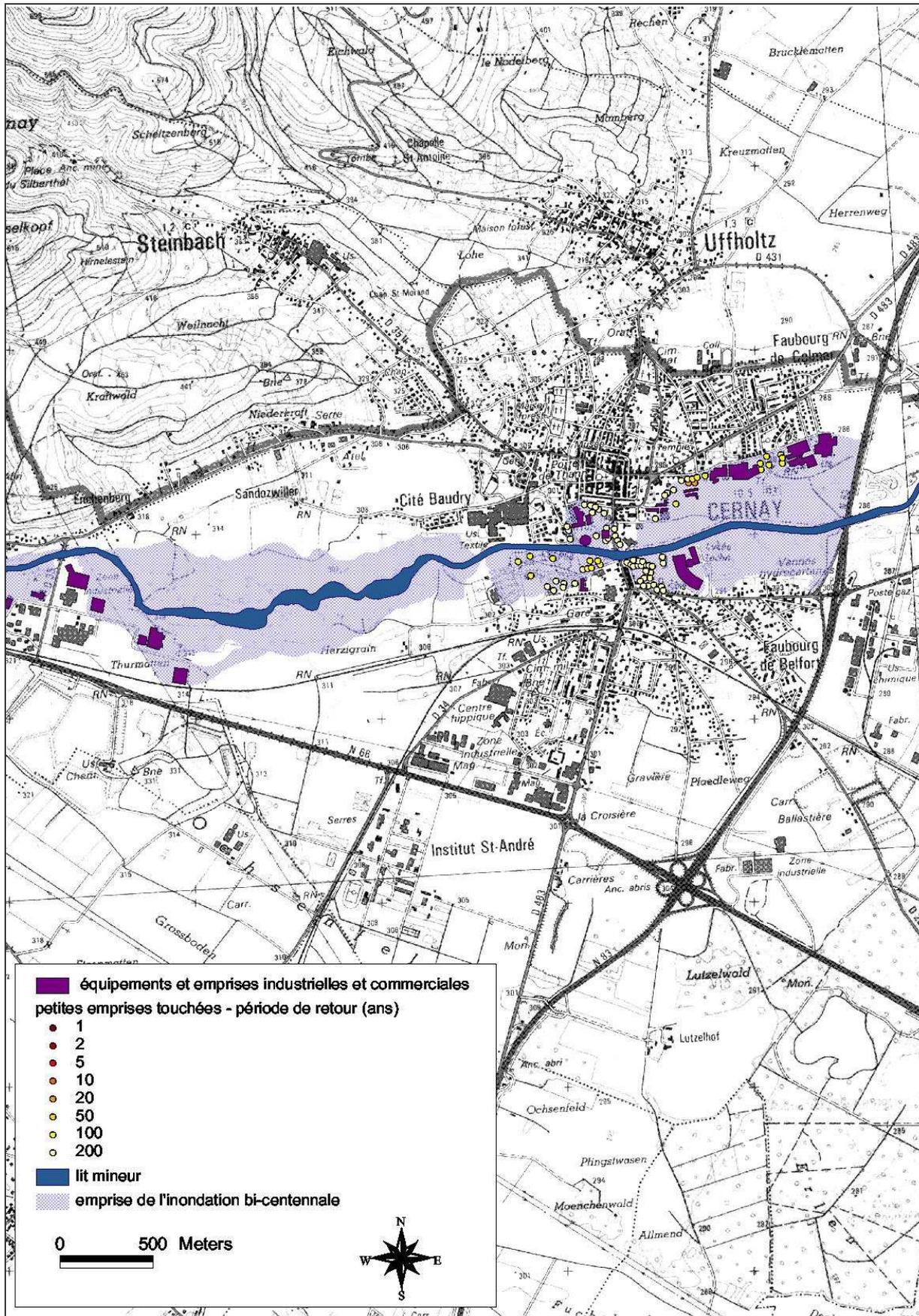
Analyse quantitative du risque

Communes : THANN VIEUX-THANN



Analyse quantitative du risque

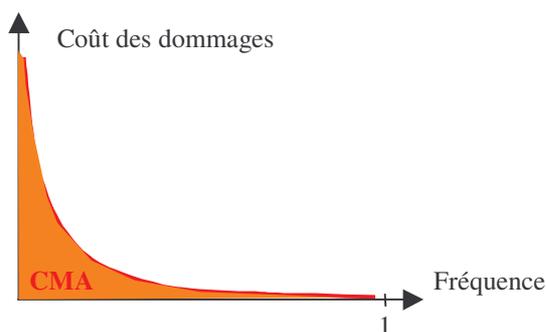
Commune : CERNAY



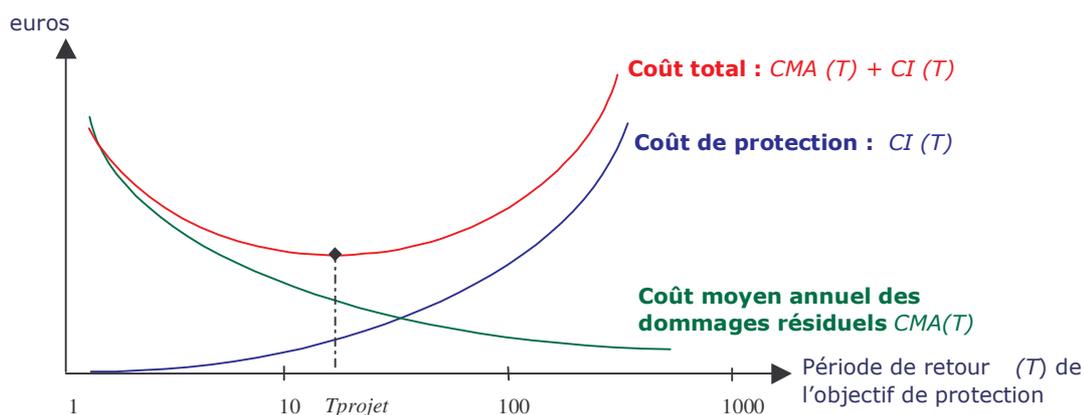
Annexe 7 :
Calcul du Coût Moyen Annuel

Méthode de calcul du Coût Moyen Annuel des dommages (source *Neron, 2004*)

Le calcul du CMA s'apparente à l'intégration de la fonction *coût des dommages / fréquence* (figure ci-dessous), et équivaut donc à l'espérance mathématique du montant annuel des dommages.



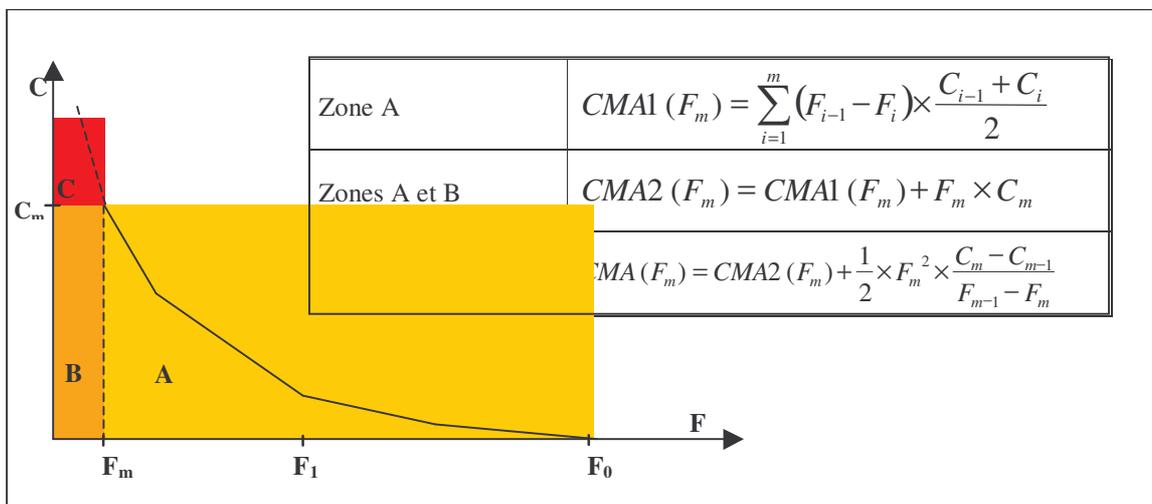
Un des intérêts de la caractérisation du risque par le Coût Moyen Annuel des dommages réside dans le fait que la notion de probabilité des crues y est intégrée intrinsèquement. Or, c'est cette notion de probabilité qui est la moins bien comprise par les citoyens. L'évaluation du Coût Moyen Annuel permet de se représenter le coût moyen supporté annuellement sur le territoire considéré, et de comparer ce coût aux investissements de protection. Une étude coût - bénéfice est alors réalisable et permet de déterminer un objectif de protection (choix d'une crue de projet) en fonction de critères de rentabilité. La méthode de détermination est illustrée ci-dessous.



L'estimation du Coût Moyen Annuel des dommages permet également de rendre compte de l'impact économique des aménagements existants à différentes échelles et ainsi d'évaluer financièrement le « service rendu » à chaque unité territoriale.

L'utilisation du CMA pose néanmoins des problèmes de fond. Son évaluation suppose en effet que l'on extrapole l'intensité et l'emprise des crues pour des fréquences rares. On peut alors se poser la question de la validité d'une telle extrapolation ainsi que de l'existence d'une intensité et d'une emprise maximale de crue.

Grâce aux estimations de coût réalisées pour chacune des périodes de retour, nous pouvons estimer le coût moyen annuel des dommages. Celui-ci est l'intégrale de la courbe *coût des dommages / fréquence*, dont nous avons une approximation pour l'habitat et les activités économiques. Le coût moyen annuel des dommages est alors estimé par la somme des aires A, B et C :



La fréquence F_m représente la fréquence la plus faible considérée, dans notre cas il s'agit de la période de retour de 200 ans. Au-delà de cette période de retour, on extrapole la courbe obtenue entre les périodes de retour de 100 et 200 ans. Cette extrapolation aboutit à une minimisation du calcul du CMA, qui dépend alors de la fréquence minimum prise en compte dans l'estimation des coûts.

Détail des estimations de dommages

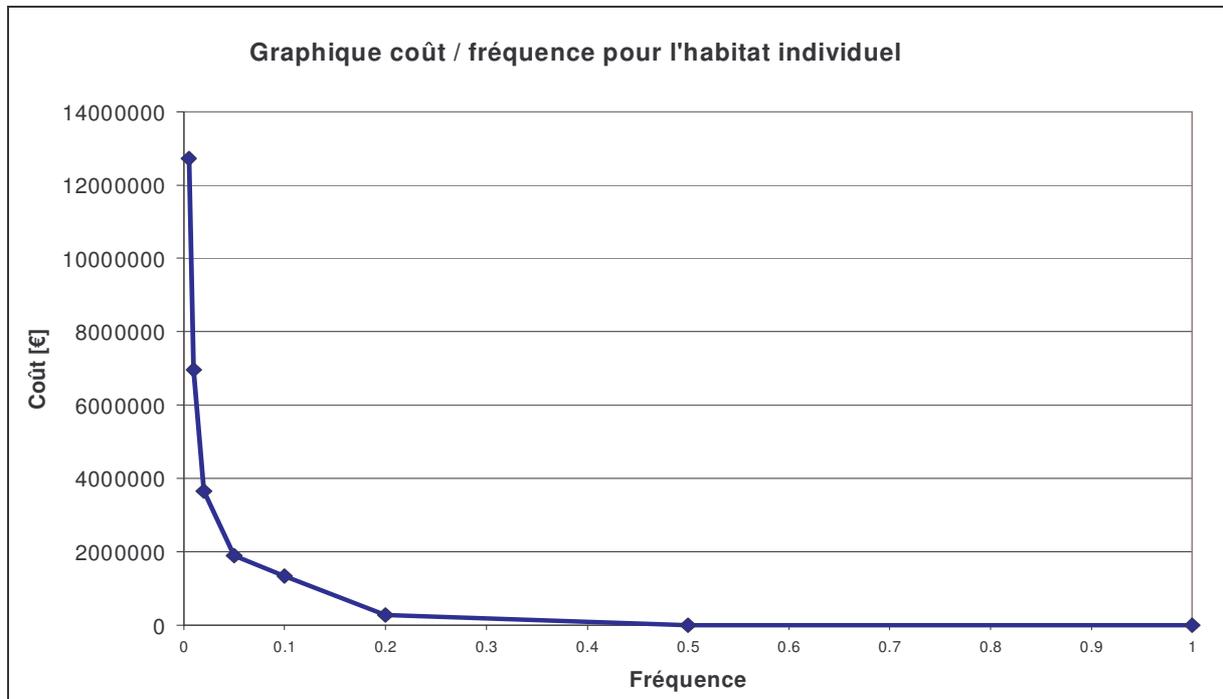
Coût des inondations pour les maisons individuelles :

Hypothèses d'endommagement de base :

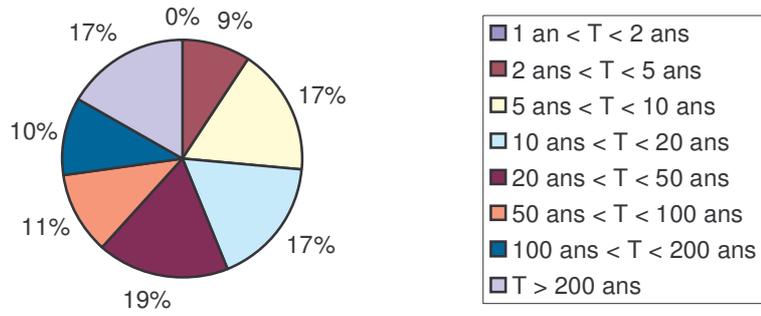
- 3 000 euros/bâtiment touché pour $h < 20$ cm
- 25 000 euros/bâtiment touché pour $h > 20$ cm

Période de retour [ans]	Nb. hab. touch. < 20 cm	Nb. hab. touch. > 20 cm	Coût C_i [€]	Fréquence F_i	$(F_i - F_{i+1}) * (C_i + C_{i+1}) / 2$
1	0	0	0	1	0
2	0	0	0	0.5	42 600
5	3	11	284 000	0.2	81 550
10	24	51	1 347 000	0.1	81 125
20	16	74	1 898 000	0.05	83 175
50	24	143	3 647 000	0.02	53 045
100	29	275	6 962 000	0.01	49 210
200	49	503	12 722 000	0.005	

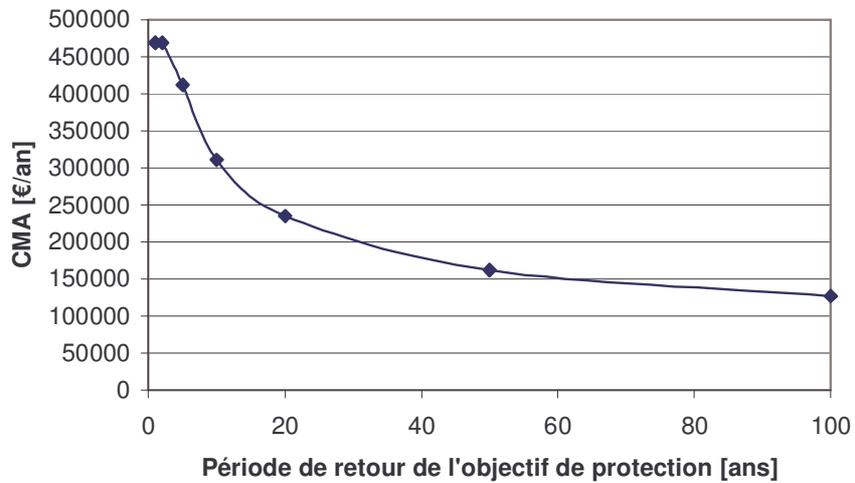
CMA \approx 470 000 euros/an



Contribution des crues au coût moyen annuel des inondations pour l'habitat individuel en fonction des périodes de retour



Coût Moyen Annuel en fonction de l'objectif de protection



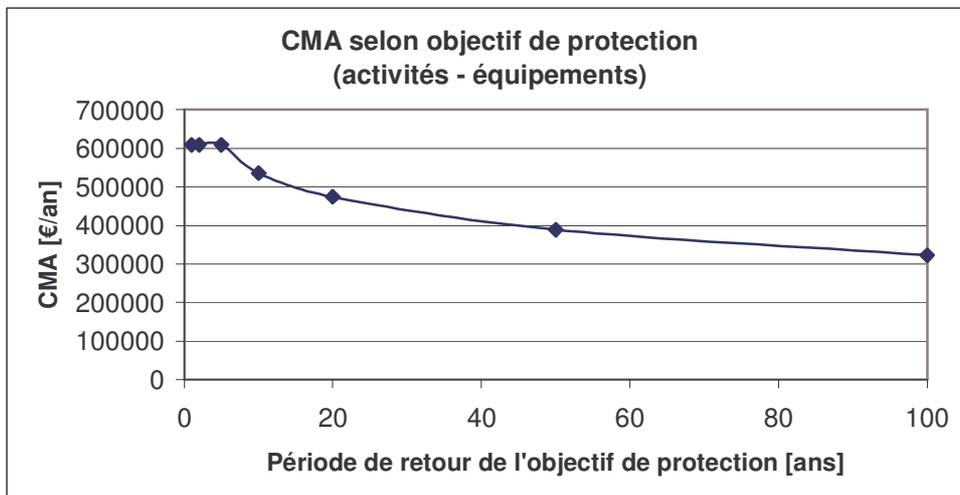
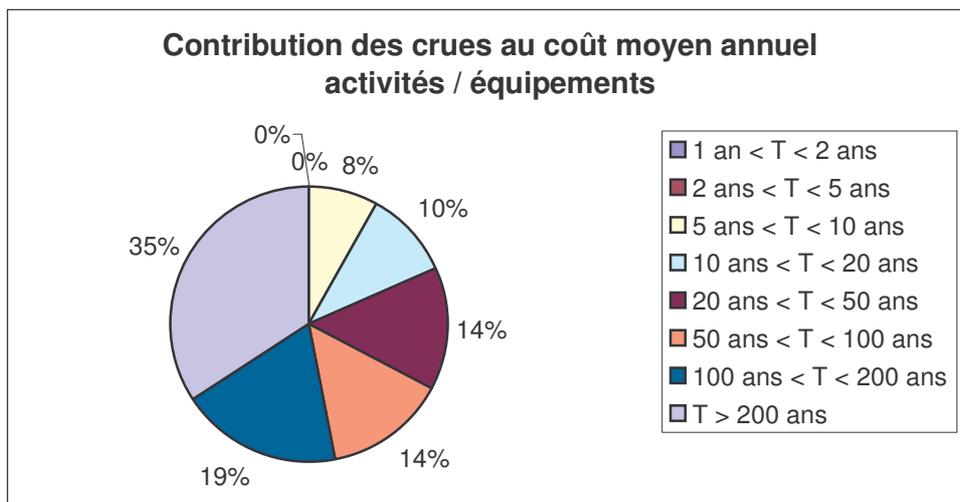
Coût des inondations pour les activités et les équipements :

Hypothèses d'endommagement de base :

- coût surfacique : 150 euros/m²
- facteur correctif de surface : 0.8

Période de retour [an]	Surface [m ²]	Coût Ci [€]	Fréquence Fi	$(Fi - Fi+1) * (Ci + Ci+1) / 2$
1	0	0	1	0
2	0	0	0.5	0
5	0	0	0.2	49 047
10	6 540	980 944	0.1	62 697
20	10 180	1 526 943	0.05	87 156
50	28 556	4 283 461	0.02	87 784
100	88 489	13 273 412	0.01	113 787
200	214 943	32 241 376	0.005	

CMA ≈ 610 000 euros/an



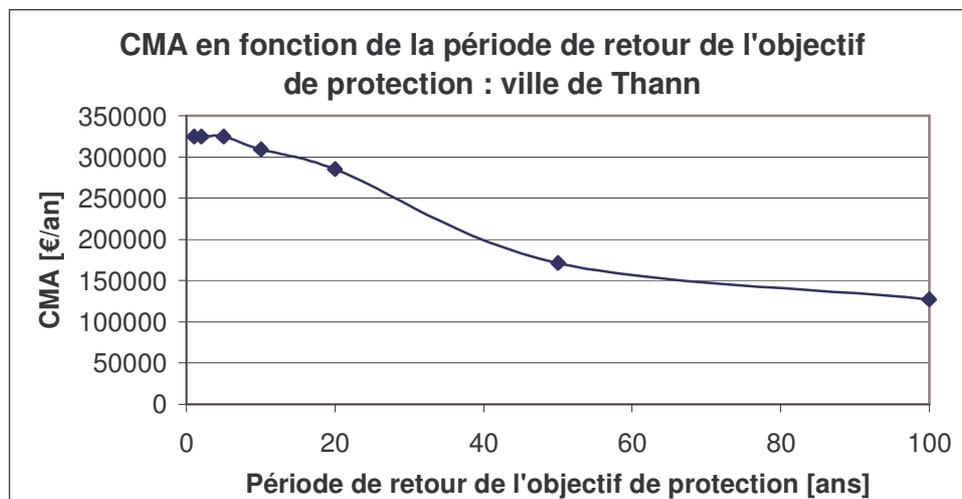
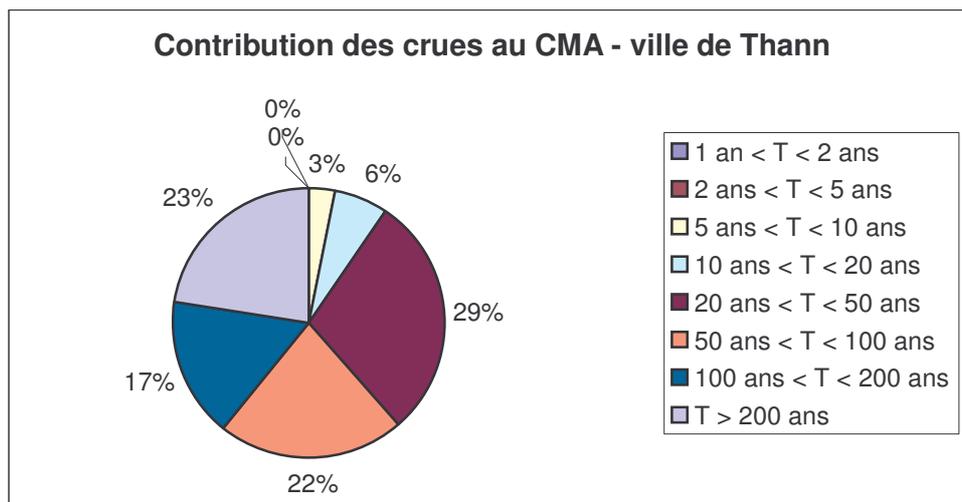
Coût des inondations pour la ville de Thann :

Hypothèses d'endommagement de base :

- coût surfacique : 150 euros/m²
- facteur correctif de surface : 0.75

Période de retour [an]	Surface [m ²]	Coût Ci [€]	Fréquence Fi	$(F_i - F_{i+1}) * (C_i + C_{i+1}) / 2$
1	0	0	1	0
2	0	0	0.5	0
5	0	0	0.2	10 313
10	1 375	206 257	0.1	20 291
20	4 036	605 379	0.05	94 361
50	37 902	5 685 366	0.02	72 621
100	58 926	8 838 930	0.01	53 893
200	84 789	12 718 312	0.005	

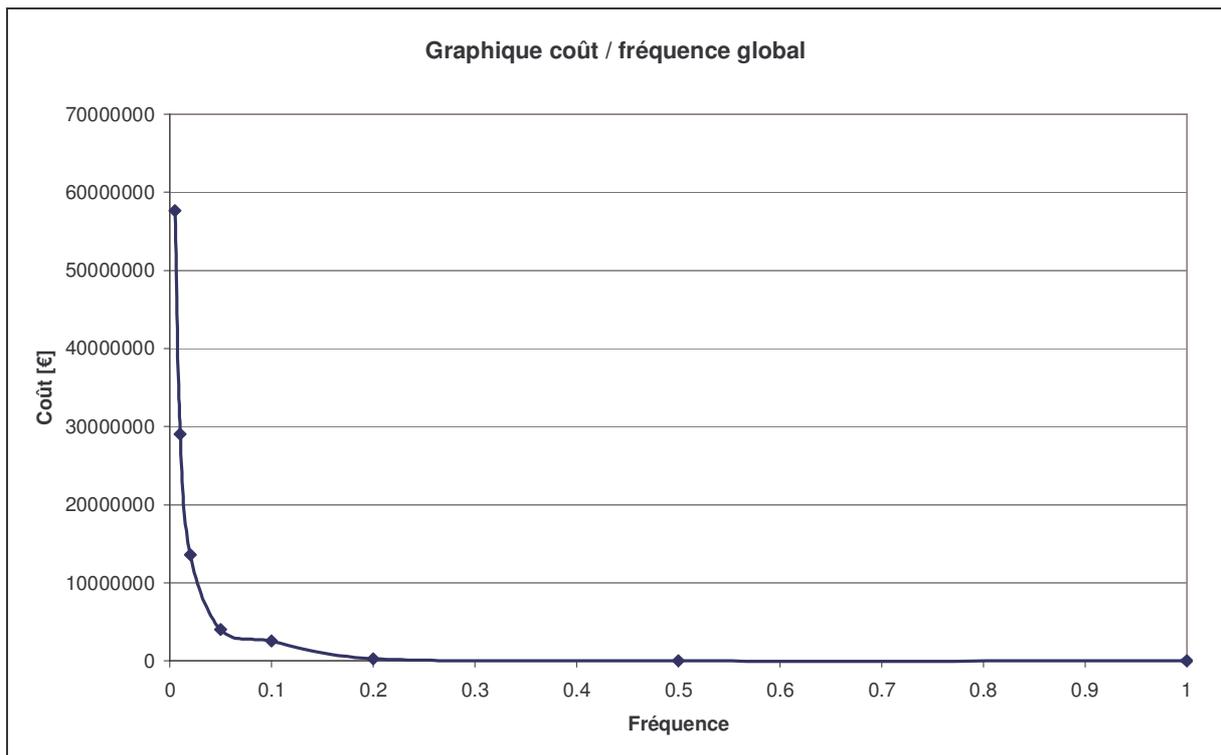
CMA ≈ 325 000 euros/an

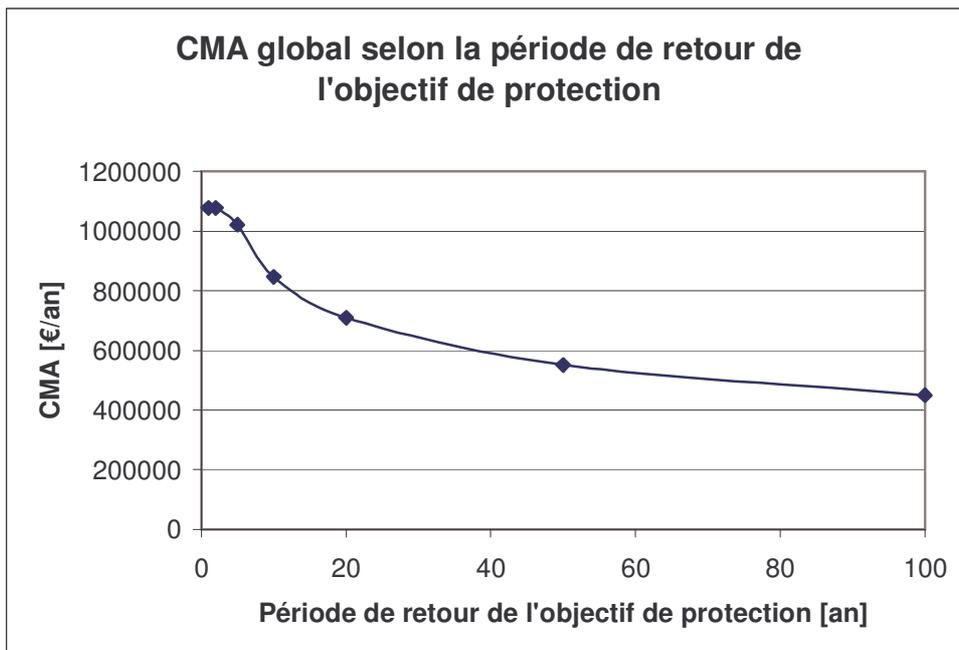
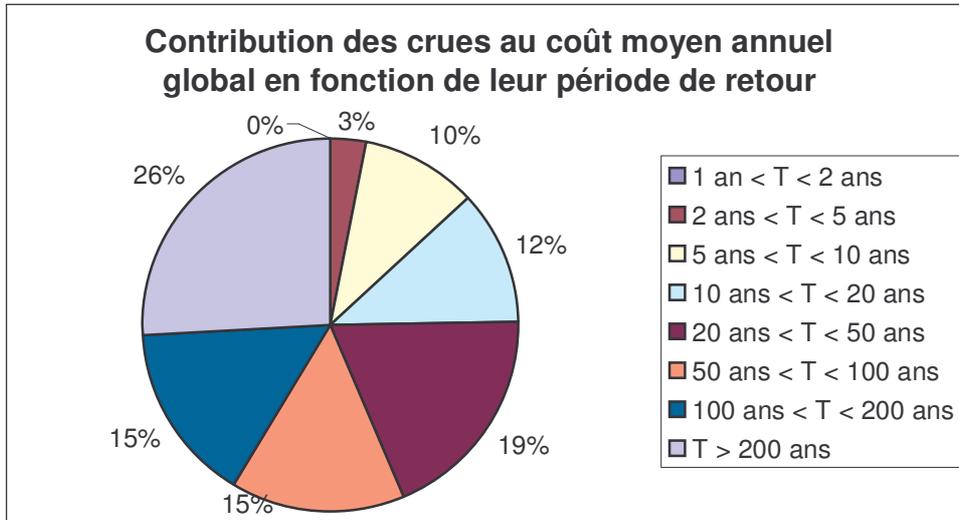


Coût global :

Période de retour [an]	Coût C_i [€]	Fréquence F_i	$(F_i - F_{i+1}) * (C_i + C_{i+1}) / 2$
1	0	1	0
2	0	0.5	42 600
5	284 000	0.2	140 910
10	2 534 201	0.1	164 113
20	4 030 322	0.05	264 692
50	13 615 827	0.02	213 451
100	29 074 341	0.01	216 890
200	57 681 688	0.005	0

CMA \approx 1 400 000 euros/an

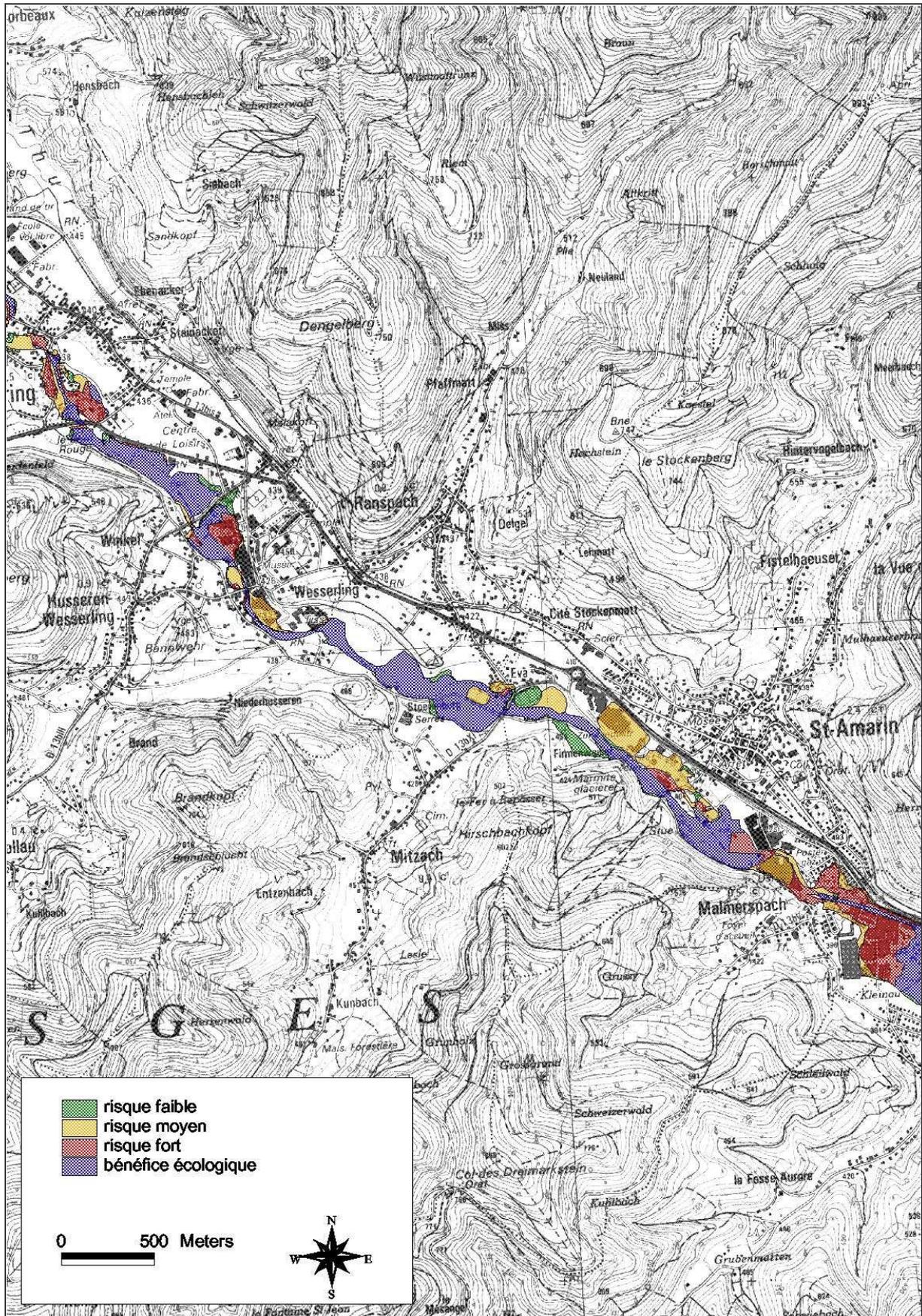




Annexe 8 :
Analyse qualitative du risque après
changement climatique

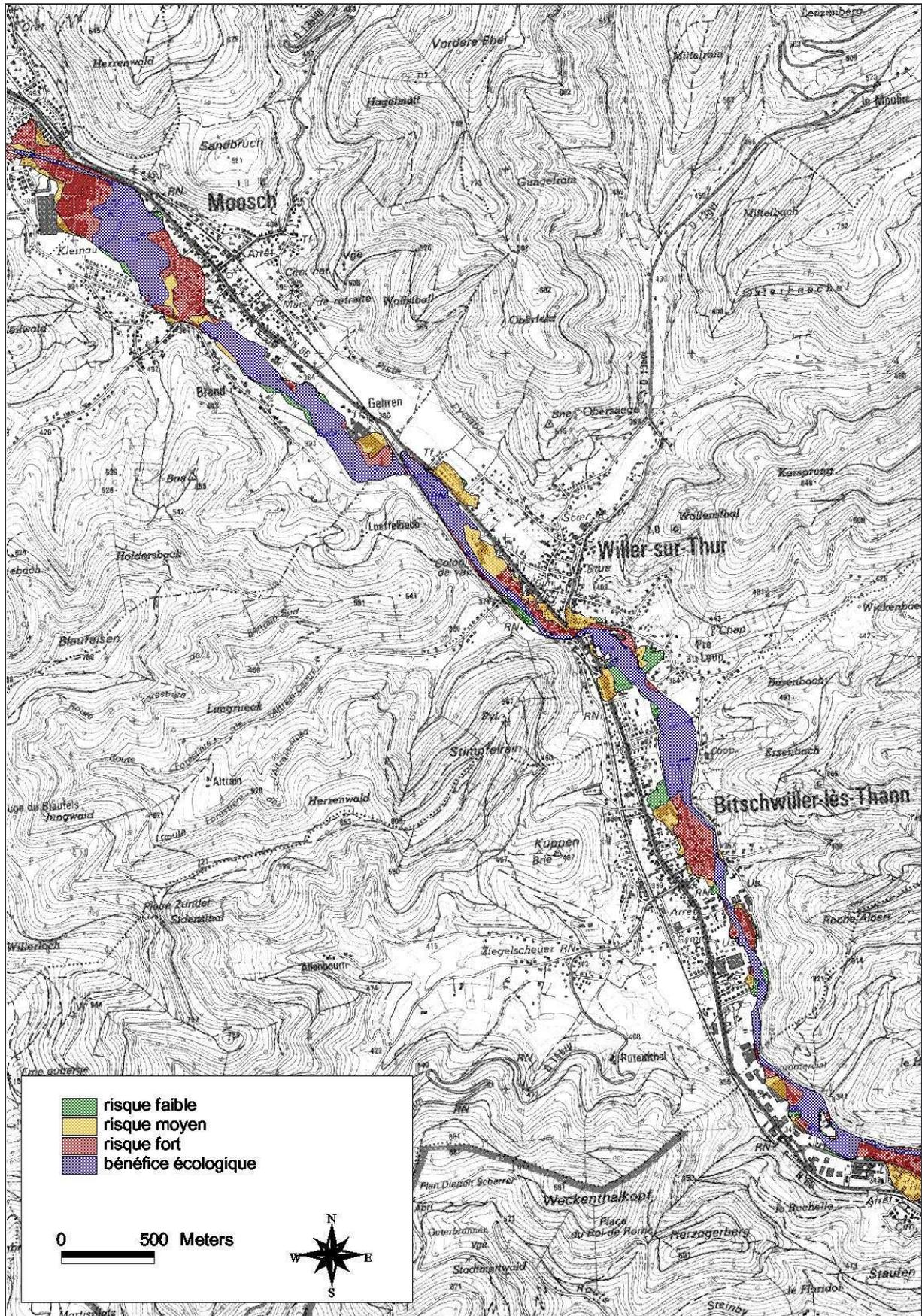
Analyse qualitative du risque – changement climatique

FELLERING HUSSEREN-WESSERLING RANSPACH SAINT-AMARIN MALMERSPACH



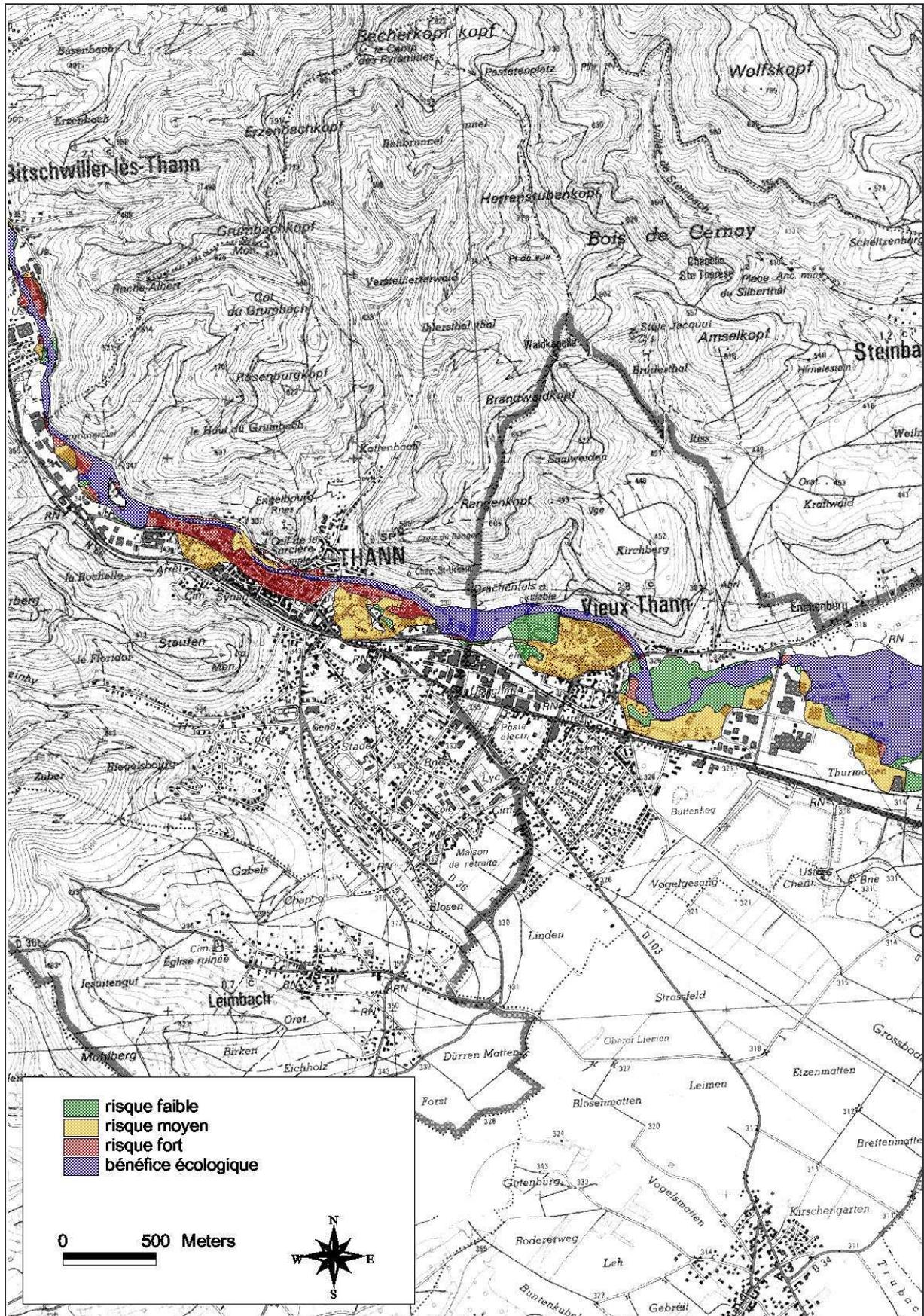
Analyse qualitative du risque – changement climatique

Communes : MOOSCH WILLER-SUR-THUR BITSCHWILLER-LES-THANN



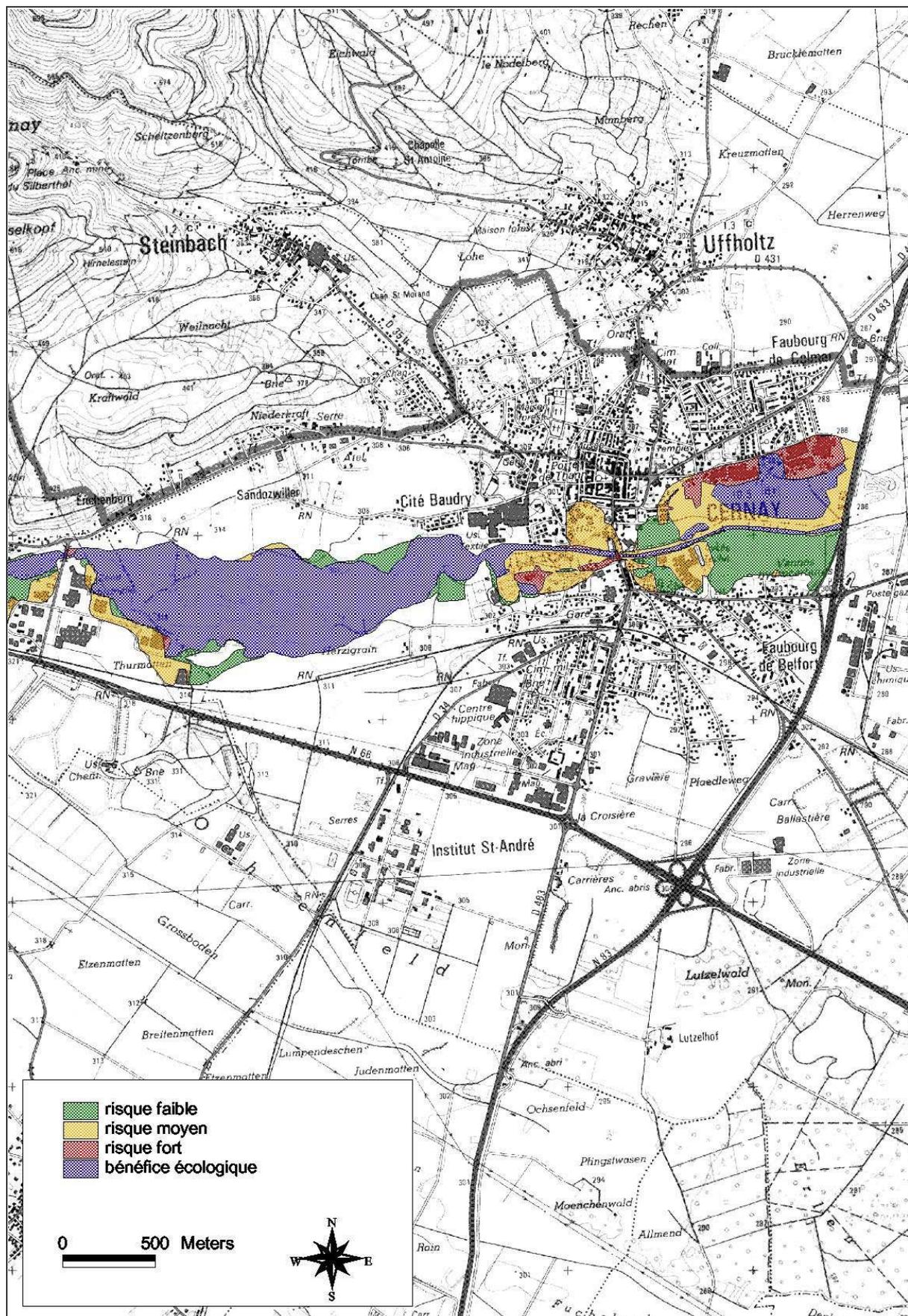
Analyse qualitative du risque – changement climatique

Communes : THANN VIEUX-THANN



Analyse qualitative du risque – changement climatique

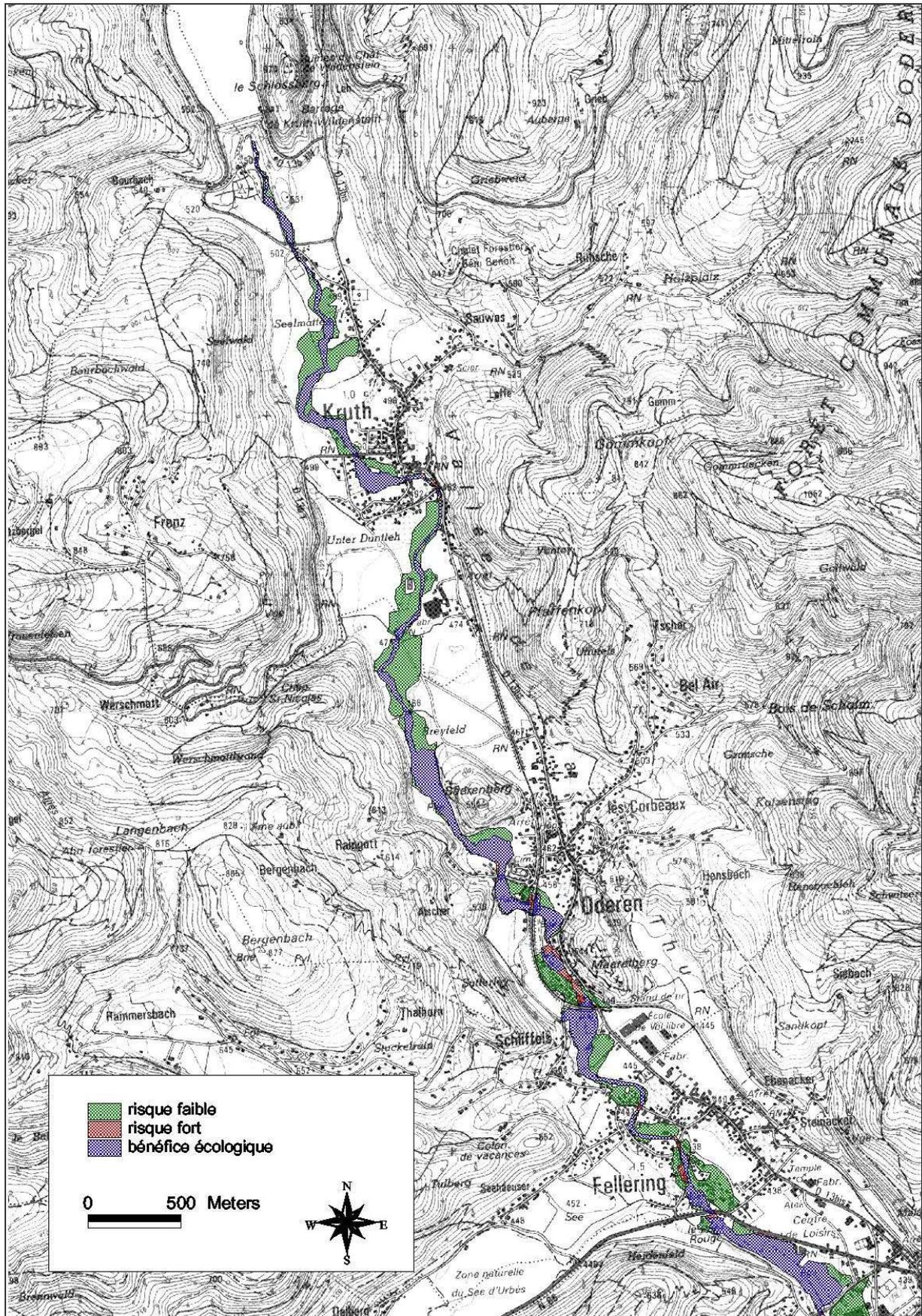
Commune : CERNAY



Annexe 9 :
Analyse qualitative du risque après
amélioration de la résilience

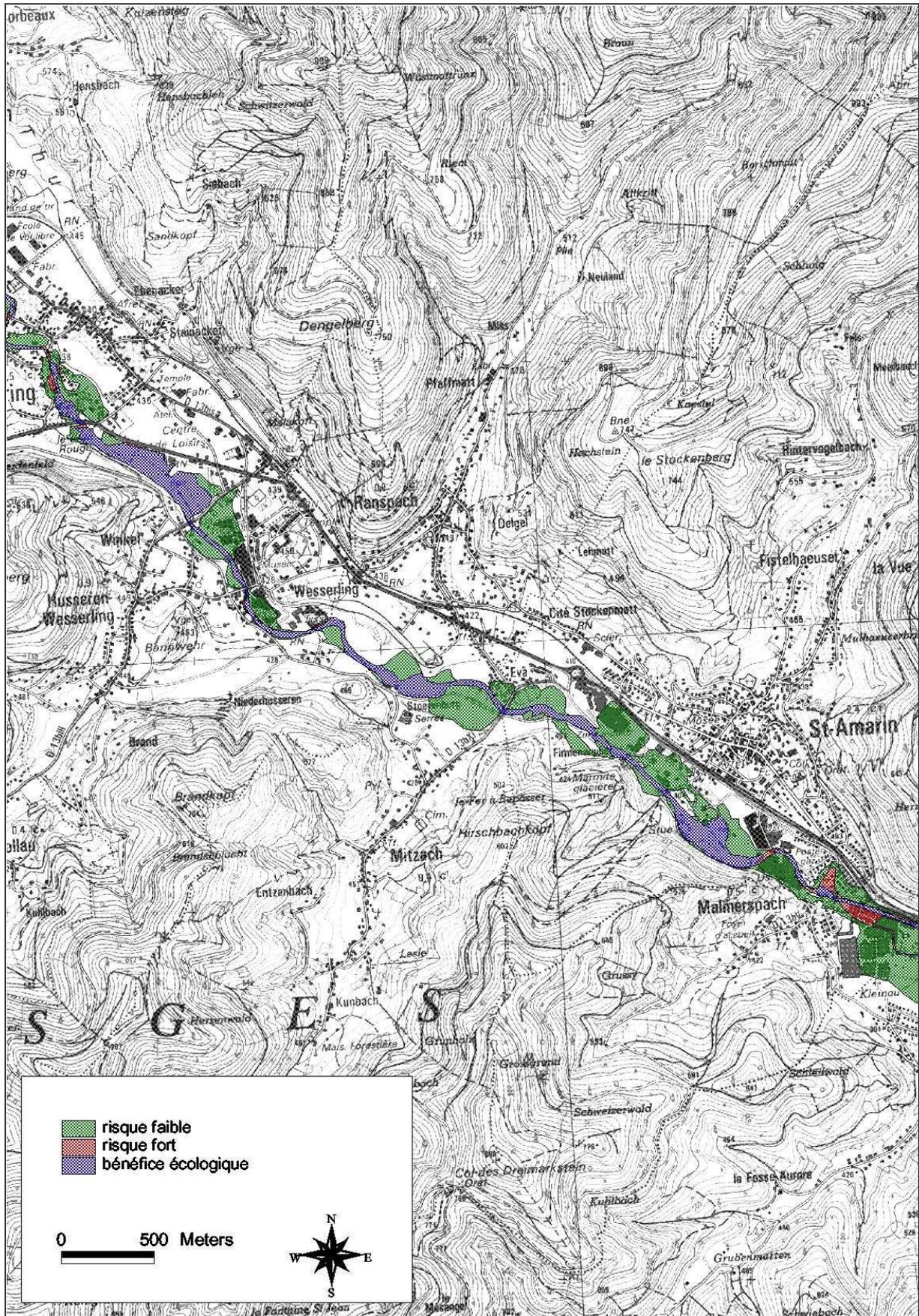
Analyse qualitative du risque – amélioration de la résilience

Communes : KRUTH ODEREN FELLERING



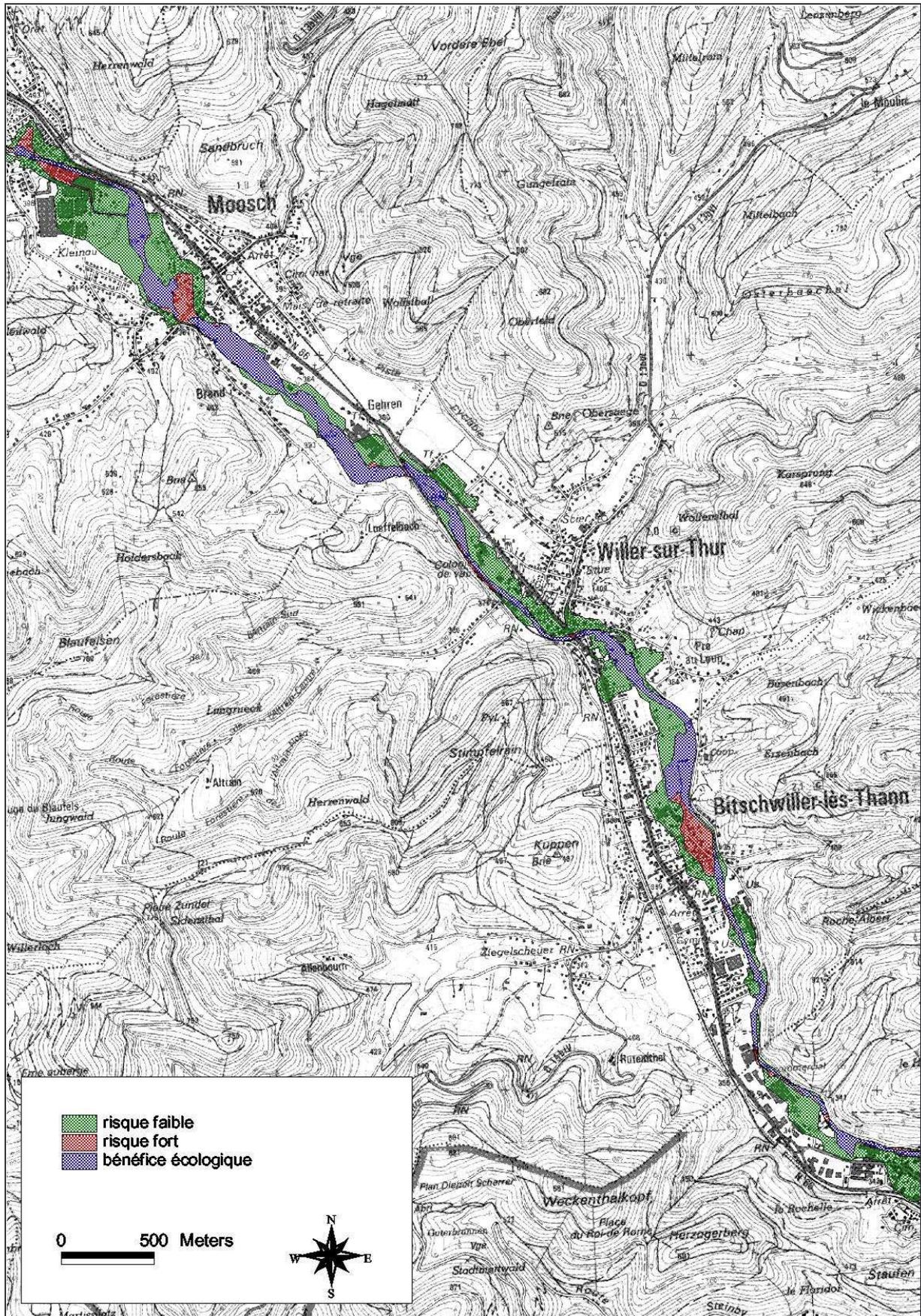
Analyse qualitative du risque – amélioration de la résilience

FELLERING HUSSEREN-WESSERLING RANSPACH SAINT-AMARIN MALMERSPACH



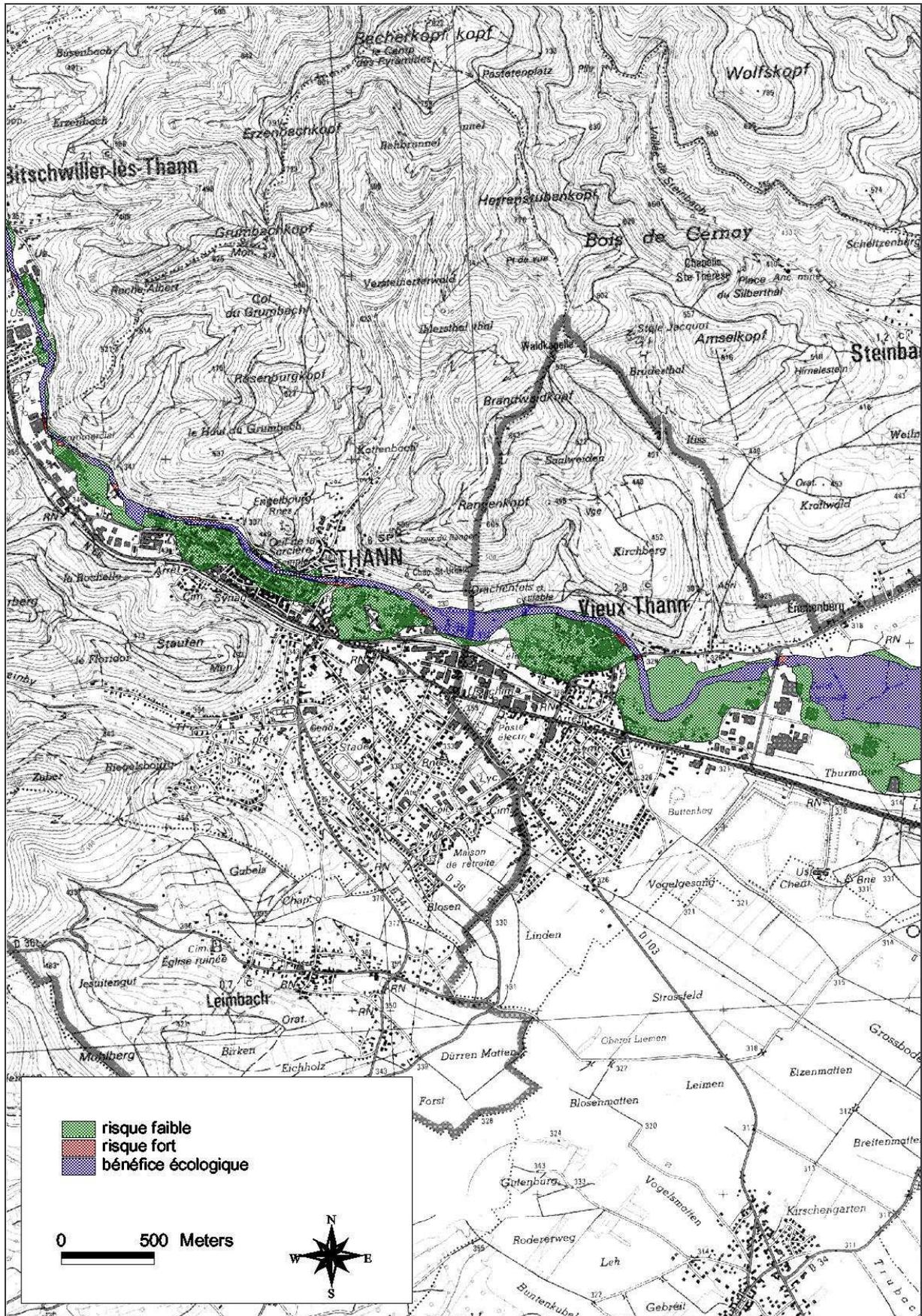
Analyse qualitative du risque – amélioration de la résilience

Communes : MOOSCH WILLER-SUR-THUR BITSCHWILLER-LES-THANN



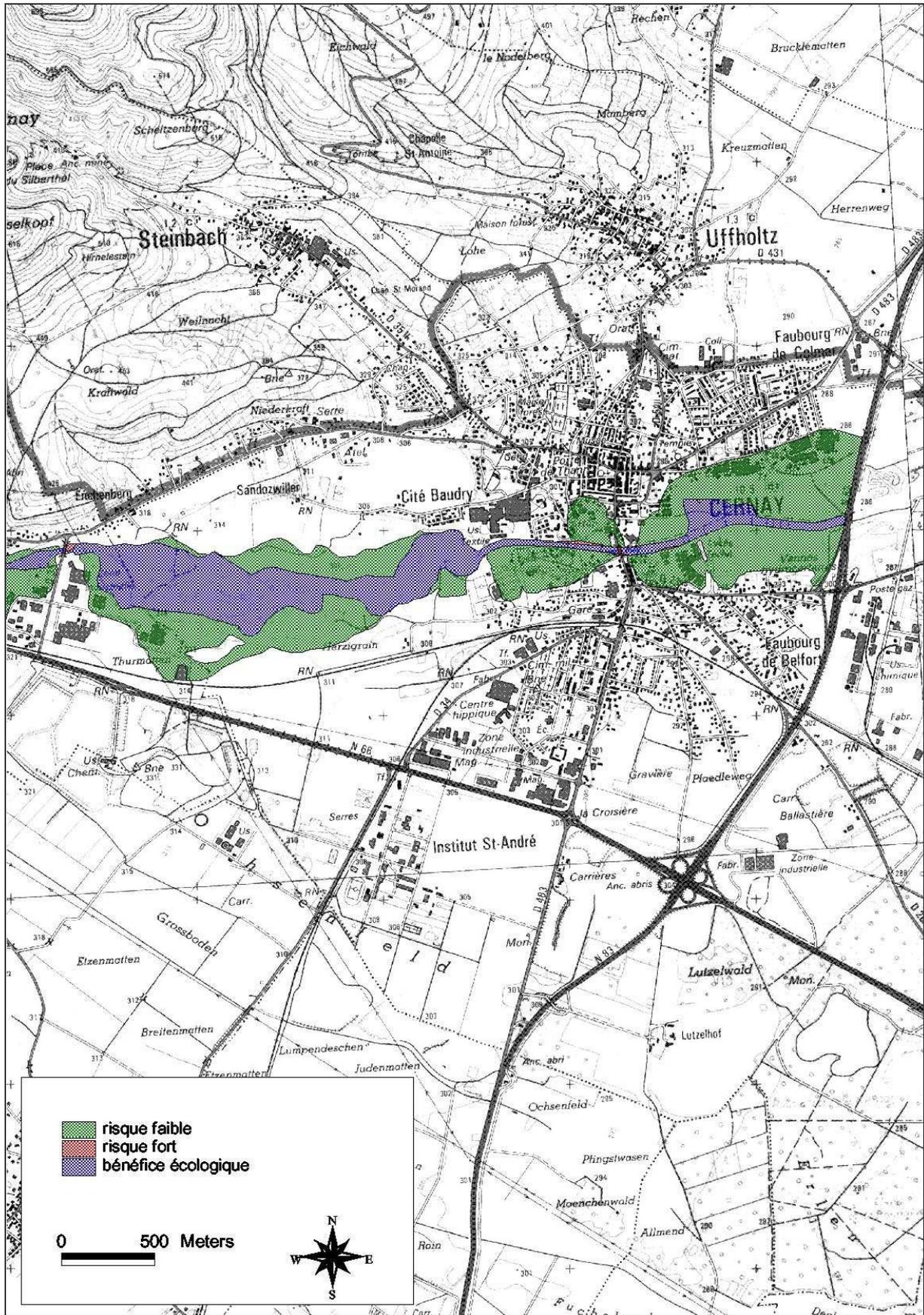
Analyse qualitative du risque – amélioration de la résilience

Communes : THANN VIEUX-THANN



Analyse qualitative du risque – amélioration de la résilience

Commune : CERNAY



Titre

Modélisation des crues des rivières de moyenne montagne pour la gestion intégrée du risque d'inondation. Application à la vallée de la Thur (Haut-Rhin).

Résumé

Les dommages dus aux inondations sont en constante augmentation malgré la réglementation de l'urbanisation. La politique traditionnelle de lutte contre les crues ne donne pas satisfaction, tant du point de vue de la sécurité que des impacts sur les milieux naturels. La gestion du risque d'inondation doit s'inscrire à l'échelle du bassin versant et respecter le fonctionnement naturel des rivières. Il est nécessaire de développer des outils techniques nouveaux pour l'aide à la décision. Nous proposons une méthodologie de modélisation opérationnelle pour la gestion intégrée du risque d'inondation dans le contexte des rivières de moyenne montagne.

La recherche de solutions techniques adaptées à chaque rivière peut s'appuyer sur un diagnostic complet du risque et l'exploration de scénarios de prospective. Pour permettre une approche à grande échelle, nous proposons une méthode de production et de sélection d'événements de référence conservant la même fréquence en tout point du bassin versant. Ces événements sont utilisés en simulation pour produire une cartographie précise de l'aléa en intensité et en fréquence.

Le diagnostic du risque d'inondation permet d'identifier les enjeux à protéger et les hydrosystèmes à réhabiliter. Pour répondre à ces attentes, nous avons testé en prospective une renaturation de la rivière. L'application à la vallée de la Thur (68) et la simulation à l'aide d'une rivière virtuelle montrent que ce type de projet ne permet pas de réduire sensiblement l'aléa pour les rivières à pente forte. La pertinence des événements de référence choisis fait l'objet d'une discussion. Nous avons par ailleurs montré que les endiguements ne constituent pas une protection durable contre les crues. L'étude de scénarios de changement climatique annonce une aggravation des crues à moyen terme. Ainsi, nous intégrons dans la méthodologie l'étude de stratégies de résilience, encore peu explorées en France. La société doit réapprendre à vivre avec les crues pour concilier développement économique et équilibre des milieux naturels.

Mots-clés

Modèle hydraulique ; modèle stochastique ; modèle pluie-débit ; MNT ; spatialisation ; choix d'événements ; risque d'inondation ; gestion intégrée ; renaturation ; prospective ; changement climatique ; résilience.

Title

Mountainous river flood modelling for integrated flood risk management. Application to the Thur river (France)

Abstract

Floods are the major natural risk in France and, in spite of a better control of urbanisation, flood damages become more and more expensive. The traditional flood management fails to protect people from floods and threatens the functionality of alluvial ecosystems. Flood risk management should be projected at a large scale and integrate the natural functionality of rivers. New engineering tools should be developed to build a decision support system. We propose an operational methodology to improve flood risk management applied to mountainous rivers.

In order to find new technical solution for each case study, we set a complete diagnostic of flood risk, then we explore foresight scenarios. Production and selection of reference flood events which keep the same frequency everywhere along the river is presented. These events enable to perform unsteady flow simulations and to draw maps of flood hazard intensity and frequency.

Flood risk diagnostic highlights the needs for protection and the ecosystems which should be restored. A foresight simulation of natural flooding restoration has been tested on the Thur river and on a "virtual" mountainous river. Both simulations show that this kind of project does not improve a better flood mitigation for strong slope rivers. Selection and validity of reference flood events is discussed. We also have shown that embankments are not a sustainable flood management. Climatic change scenarios applied to the Thur river forecast an aggravation of floods for the 21st century. That's why we propose a new flood management based on resilience strategies. Society should learn to live with floods and to reconcile economical development and functional ecosystems.

Keywords

Hydraulics model ; stochastic model ; rainfall-runoff model ; DTM ; spatialisation ; flood event sampling ; flood risk ; integrated river management ; renaturation ; foresight study ; climatic change ; resilience.
