



PPRI PLAN DE PREVENTION
DES RISQUES INONDATIONS DE LA

Clarence

Phase 2 : Mise au point des méthodes
Livrable 5 / Révision n°2

Date : 04/03/2016

▪ www.ppri-clarence.fr



Plan de Prévention des Risques Inondations de la vallée de la Clarence

- Méthodologie de détermination de l'aléa « débordement de cours d'eau »
- Méthodologie de détermination de l'aléa « ruissellement »



Direction départementale
des territoires et de la mer
du Pas-de-Calais
100 avenue Winston Churchill
CS 10007 – 62022 Arras Cedex
▪ Tel. : 03 21 22 99 99
▪ Fax : 03 21 55 01 49



STRATIS



ISL Ingénierie SAS - Siège
75 Boulevard Mac Donald
75019 Paris - FRANCE
▪ Tel. : +33 1 55 26 99 99
▪ Fax : +33 1 40 34 63 36

SOMMAIRE

1	PREAMBULE	11
2	ETUDE HYDROLOGIQUE	12
2.1	Objectifs	12
2.2	Rappel sur l'analyse statistique	12
2.3	Modèle pluie-débit	15
2.3.1	Objectifs	15
2.3.2	Facteurs entrant dans le choix du modèle hydrologique	15
2.4	Evènements réels retenus pour le calage	20
2.4.1	Modèle au pas de temps journalier	22
2.4.2	Modèle au pas de temps horaire	22
2.5	Création des hyétogrammes synthétiques	24
2.6	Comparaison des valeurs obtenues et de la cohérence des études existantes	29
2.7	Répartition spatiale des pluies	29
2.8	Analyse de la concomitance des crues et proposition d'événement hydraulique centennal	30
2.9	Caractérisation de l'événement hydraulique de référence	30
2.9.1	Crue d'orage	30
2.9.2	Crue d'hiver	31
2.10	Résumé	32
3	ALEA DEBORDEMENT DE COURS D'EAU	32
3.1	Préambule	32
3.2	Construction du modèle TELEMAC 2D	34
3.2.1	Présentation générale du modèle TELEMAC	34

3.2.2	Emprise du modèle hydraulique	35
3.2.3	Maillage du modèle	35
3.2.4	Points particuliers du maillage	36
3.2.5	Bathymétrie et topographie	40
3.2.6	Coefficients de frottement	41
3.3	Calage du modèle hydraulique 2D	42
3.4	Modélisation des ruptures de digues (modèle 2D)	44
3.5	Prise en compte des embâcles	45
3.6	Traitement SIG des résultats du modèle	46
3.7	Cartographie de l'aléa débordement	47
3.8	Résumé	48
4	ALEA RUISSELLEMENT	48
4.1	Préambule	48
4.2	Zones de Production	48
4.3	Caractérisation de l'aléa sur les axes de transition et les zones d'accumulation	50
4.3.1	Emprise du modèle hydraulique	50
4.3.2	Injection dans le modèle hydraulique des hydrogrammes issus du modèle hydrologique	51
4.4	Cartographie de l'aléa ruissellement	53
5	METHODE DE DETERMINATION DE L'ALEA REMONTEE DE NAPPE	53
5.1	Etape 1 : exploitation des cartes piézométriques	54
5.1.1	Méthodologie	54
5.1.2	Application à la nappe libre des sables	54
5.1.3	Application à la nappe libre de la craie	57

5.1.4	Limites de la méthode au regard des données disponibles dans le bassin versant de la Clarence	59
5.2	Etape 2 : affinement de la définition des zones sensibles	59
5.2.1	Méthodologie	59
5.2.2	Résultats	60
5.2.3	Limites de la méthode	61
5.3	Conclusions, perspectives	61
6	INCERTITUDES ET GESTION DES RISQUES	64
	ANNEXE 1 : EMPRISE DES MODELES HYDRAULQUES	65
	ANNEXE 2 : DECOUPAGE PRELIMINAIRE DU MODELE HYDROLOGIQUE	66
	ANNEXE 3 REPERES DE CRUE	67
	ANNEXE 4 : CARTOGRAPHIE DES TRONÇONS ENDIGUES OU PERCHE	71
	ANNEXE 5 EXEMPLES DE CARTES D’ALEAS	72
	ANNEXE 6 CARTOGRAPHIE DE L’EMPRISE DES ZONES DE PRODUCTION POTENTIELLES	75

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : articulation des grandes étapes de caractérisation des aléas _____	11
Figure 2 : stations pluviométriques et hydrométriques _____	13
Figure 3 : Schéma de principe du modèle GR4J _____	16
Figure 4 : hyétogramme de décembre 2012 reconstitué à partir des stations pluviométriques d'Ourton et de Fiefs _____	23
Figure 5 : hyétogramme de décembre 2012 sur la station pluviométrique de Lillers _	23
Figure 6 : hydrogrammes de calage de l'évènement de décembre 2012 _____	24
Figure 7 : intensité moyenne des précipitations de la crue de 2012 en fonction de leur durée (à partir des mesures toute les 6 minutes de la station de d'Ourton) ____	25
Figure 8 : intensité moyenne des précipitations de la crue de 2012 en fonction de leur durée (à partir des mesures horaires des stations de Lillers et Ourton) _____	26
Figure 9 : intensité moyenne des précipitations des crues historiques en fonction de leur durée (à partir des mesures journalières de la station de Fiefs) _____	26
Figure 10 : intensité moyenne en fonction de leur durée des précipitations orageuses historiques _____	28
Figure 11 : intensité horaire des précipitations des crues orageuses historiques ____	28
Figure 1 : Exemple de maillage : le lit mineur est raffiné, le lit majeur naturel est à mailles plus lâches et les environs des habitations est très raffiné. _____	36
Figure 2 : Parti retenu pour le maillage des digues. _____	37
Figure 3 : à gauche, le bâti est représenté par une cote de fond très élevée, à droite, il est exclu du maillage. _____	38
Figure 4 : Champ de vitesse sur le port des Sables d'Olonnes. Les écoulements sont bien concentrés entre les bâtiments qui sont toutefois inondés. _____	38
Figure 5 : Ponts non mis en charge et remblais d'accès insubmersibles : seules les piles, les culées et les remblais sont représentés dans le maillage (en l'occurrence, dans ce cas particulier, ils sont tout simplement retirés du maillage). _____	39
Figure 6 : Insertion d'ouvrages de type « siphon » dans le modèle hydraulique (ISL, 2013) _____	40
Figure 7 : Mise en évidence des éléments structurants au débouché de l'étier de Sallertaine. _____	41
Figure 8 : Répartition du coefficient de Strickler, en rouge : lit mineur, en orange : lit majeur, en bleu : lit majeur avec zone urbaine (PPRI de Saint-Jean-Pied-de-Port, ISL 2010-2011) _____	42

Figure 9 : photo prise le 30/12/2012 à 9h40 _____	43
Figure 10 : photo prise le 30/12/2012 à 10h17 _____	43
Figure 11 : photo prise le 30/12/2012 à 11h29 _____	43
Figure 12 : Exemple de modélisation de la formation de la brèche pour un scénario de rupture : Etude de dangers des digues du lotissement Eyherra à Urcuit – ISL 2013 _____	45
Figure 13 : Exemple de modèle TELEMAC2D de rupture de digue réalisé par ISL dans le cadre de la modélisation hydraulique bidimensionnelle du Val d’Authion _____	45
Figure 14 : Arbre pris dans la vanne au moulin de la Ferté en 2012 _____	46
Figure 15 : modèle numérique de pentes et axes de ruissellement sur l’amont du bassin versant de la Clarence _____	49
Figure 16 : extrait du découpage du bassin versant de la Clarence. L’hydrogramme calculé pour chacun des sous bassins versant par le modèle hydrologique sera injecté en amont de l’axe de ruissellement _____	52
Figure 17 : Cartographie des zones à potentiel de remontée de la nappe des Sables d’après la piézométrie interpolée et le MNT _____	56
Figure 18 : Cartographie de la profondeur de la nappe de la craie par rapport à la surface topographique _____	58
Figure 19 : Carte de synthèse de la sensibilité aux remontées de nappe à partir de l’exploitation des cartes piézométrique _____	63
Figure 20 : exemple de carte d'aléa débordement de cours d'eau _____	72
Figure 21 : exemple de carte d'aléa ruissellement _____	73
Figure 22 : exemple de carte de représentation des hauteurs d'eau _____	74

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques des ajustements sur les pluies journalières à Fiefs et Lillers	14
Tableau 2 : Débit centennal calculé par les méthodes du gradex et du gradex progressif – Pivot =10 ans.....	14
Tableau 3 : Débit centennal calculé par les méthodes du gradex et du gradex progressif – Pivot = 50 ans.....	14
Tableau 4 : moyenne interannuelle d’ETP à la station de Lillers	19
Tableau 5 : comparaison des évènements historique et de l’évènement centennal	31
Tableau 6 : comparaison des évènements historique et de l’évènement centennal	31
Tableau 7 : classes d’aléa.....	47
Tableau 8 : Zones de production d’aléa obtenues par croisement de l’occupation du sol et de la pente	49
Tableau 9 : Grille de production d’aléa ruissellement/ravinement.....	50
Tableau 10 : intensité de l'aléa ruissellement en zone urbaine.....	53
Tableau 11 : intensité de l'aléa ruissellement en zone rurale ou périurbaine.....	53

1 PREAMBULE

Le présent livrable s'inscrit dans la phase 2 du PPRI de la Vallée de la Clarence : Mise au point des méthodes.

Le PPRI de la Vallée de la Clarence est multirisque, c'est-à-dire qu'il convient d'étudier séparément les aléas débordement de cours d'eau, remontées de nappe, ruissellement afin de définir l'enveloppe maximale du territoire concerné tout en étant particulièrement attentif au zonage qui en résultera. C'est pourquoi la partie finale consistera à s'assurer de la cohérence des cartes d'aléas « multirisque » obtenues par croisement de celles de chacun des risques.

La stratégie générale de caractérisation des aléas est illustrée sur la Figure 1.

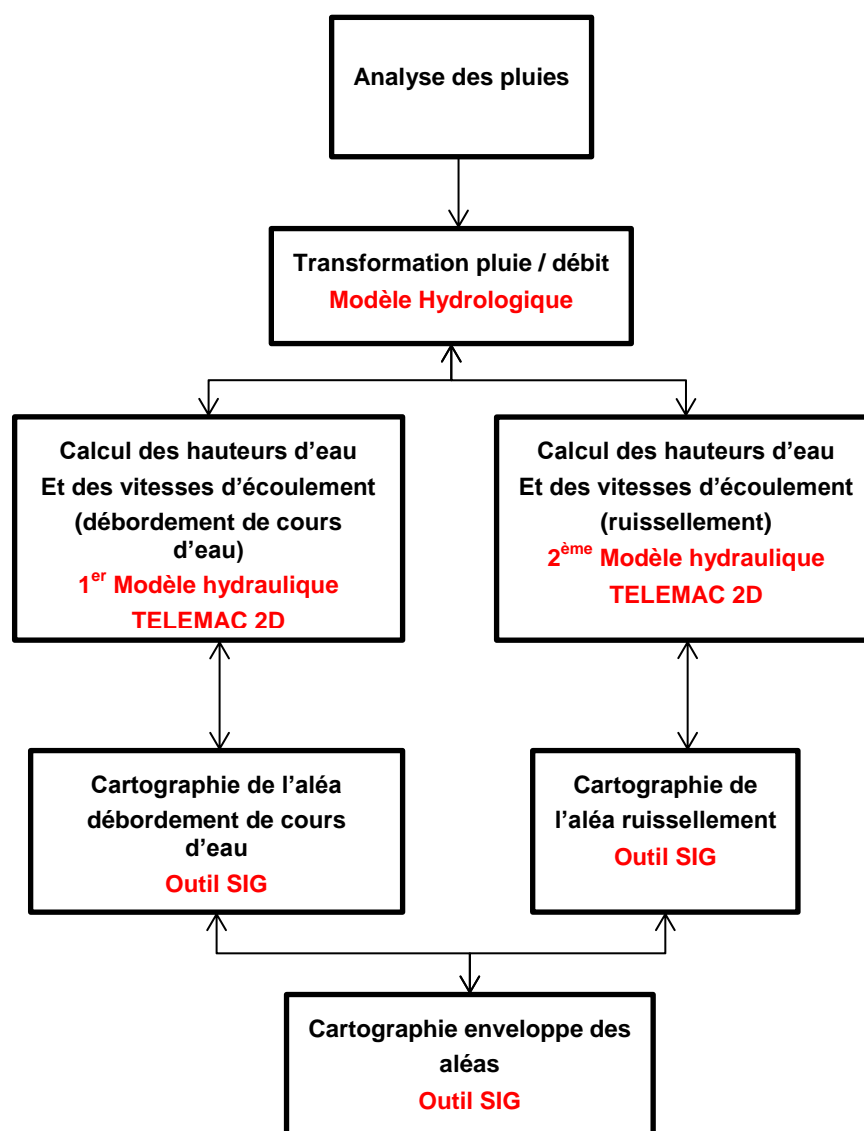


Figure 1 : articulation des grandes étapes de caractérisation des aléas

2 ETUDE HYDROLOGIQUE

2.1 Objectifs

La notion de crue de référence pour les PPRI fait l'objet d'une définition réglementaire précise: il s'agit de la crue centennale ou de la crue la plus forte connue si celle-ci est supérieure à la centennale.

L'objectif principal de l'étude hydrologique est donc de déterminer les débits caractéristiques pour différentes périodes de retour, ainsi que de comprendre le fonctionnement des bassins versants.

L'étude hydrologique comprend les tâches suivantes :

- recueil des données historiques (pluie, débits, emprise...), réalisé en phase 1,
- caractérisation générale du bassin versant (phase 1),
- réalisation d'une analyse statistique (amorcée en phase 1),
- construction d'un modèle qui, à partir de la pluie estime l'évolution dans le temps des débits. Ce modèle fournira les événements de référence sous la forme d'une évolution des débits au cours du temps lors d'une crue (appelés hydrogrammes de projet) .

La modélisation pluie-débit à l'avantage de permettre le calcul en différents points (correspondants aux points d'entrée du modèle hydraulique, aux secteurs à enjeux, aux zones de concentration de ruissellement,...) à partir d'une analyse à grande échelle.

La difficulté résidera néanmoins dans la prise en compte des zones d'échanges entre les cours d'eau, et des zones de transfert, type siphon. Dans ces secteurs, une analyse particulièrement critique des résultats obtenus sera menée via l'analyse hydraulique.

Les résultats obtenus seront injectés dans le modèle hydraulique afin d'en étudier la propagation. A l'issue de cette étape, les modèles pourront, ou pas, être validés. S'ils ne l'étaient pas, des itérations seront nécessaires entre les modélisations hydrologiques et hydrauliques, en faisant varier les paramètres du modèle.

Les deux modèles sont donc fortement liés et il est d'autant plus délicat de caler correctement le modèle hydrologique que les données de calage sont constituées en quasi-totalité de hauteurs d'eau, puisqu'il n'existe que deux points de mesure de débits pour 2012 et un seul pour les crues plus anciennes.

2.2 Rappel sur l'analyse statistique

L'analyse statistique aux stations de mesure est décrite dans le rapport « phase 1 – Livrable 4 – Présentation du bassin versant ». Le présent rapport rappelle les principaux résultats.

La Figure 2 localise l'ensemble des stations pluviométriques et hydrométriques disponibles à proximité de la zone d'étude. L'analyse statistique a été réalisée sur les débits observés à la station hydrométrique de Robecq ainsi que sur les pluies aux stations pluviométriques de Fiefs et Lillers, ces stations ayant des chroniques de valeurs suffisantes.

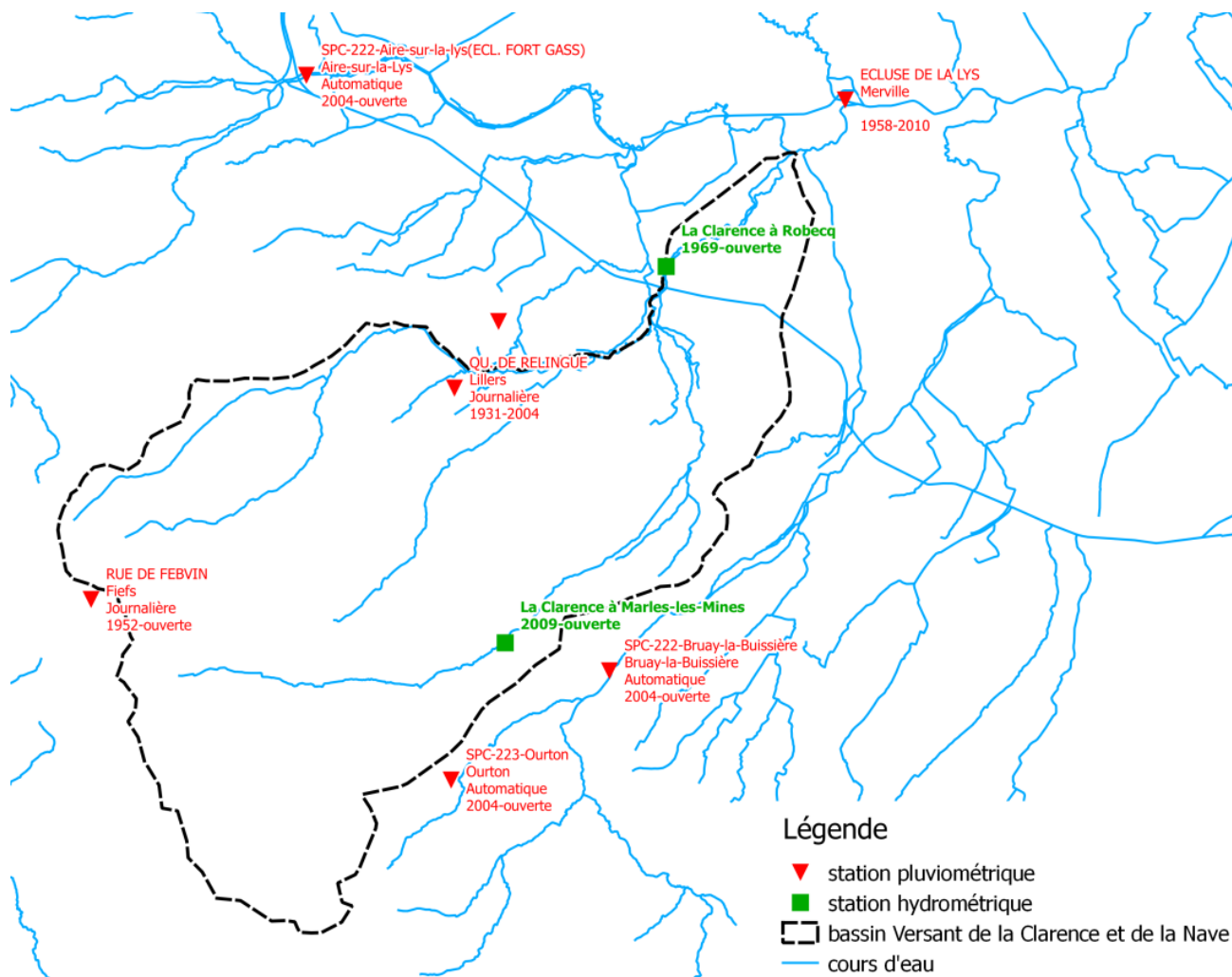


Figure 2 : stations pluviométriques et hydrométriques

Les résultats de l'analyse statistique sur les mesures des stations pluviométriques sont rappelés dans le Tableau 1.

		Fiefs	Lillers
Année hydrologique	Nombre de données	63	58
	gradex (mm)	14,45	16,52
	P10 (mm)	67	71
	P50 (mm)	91	98
	P100 (mm)	101	109
Eté	gradex (mm)	15,28	16,31
	P10 (mm)	67	68
	P50 (mm)	92	95
	P100 (mm)	102	107
Hiver	gradex (mm)	7,06	9,97
	P10 (mm)	45	45
	P50 (mm)	57	61
	P100 (mm)	62	68

Tableau 1 : Caractéristiques des ajustements sur les pluies journalières à Fiefs et Lillers

L'analyse statistique sur les débits a été effectuée en appliquant les méthodes du gradex simple et gradex progressif sur les mesures de la station hydrométrique de Robecq et de la station pluviométrique de Lillers. Pour le gradex progressif, deux pivots ont été testés, 10 ans et 50 ans. Les résultats sont rappelés dans les Tableau 2 et Tableau 3.

	Q100 moyen journalier (m ³ /s)		Q100 pointe (m ³ /s)	
	méthode du gradex	gradex progressif	méthode du gradex	gradex progressif
année hydrologique	78	24	105	32
été	75	22	112	33
hiver	50	22	60	27

Tableau 2 : Débit centennal calculé par les méthodes du gradex et du gradex progressif – Pivot =10 ans

	Q100 moyen journalier (m ³ /s)		Q100 pointe (m ³ /s)	
	méthode du gradex	gradex progressif	méthode du gradex	gradex progressif
année hydrologique	31	13	42	18
été	29	10	43	15
hiver	23	13	28	16

Tableau 3 : Débit centennal calculé par les méthodes du gradex et du gradex progressif – Pivot = 50 ans

Pour compléter cette analyse, les tâches suivantes seront réalisées :

- analyse statistique des cumuls de pluies sur 48h, 72h et 10 jours ;
- rattachement en fréquence des cumuls observés sur les événements mis en évidence en phase 1 ;

Ces résultats seront ensuite utilisés pour s'assurer des caractéristiques de l'événement centennal en débit de pointe, volumes et durée (Cf §2.9 Caractérisation de l'événement hydraulique de référence).

2.3 Modèle pluie-débit

2.3.1 Objectifs

Suite à l'analyse statistique, nous proposons de réaliser un modèle pluie débit.

Cette modélisation a pour objectifs :

- une meilleure compréhension de la genèse des crues,
- la définition des hydrogrammes de crues aux points stratégiques du bassin versant (confluence de la Clarence avec ses affluents, entrée de secteurs à enjeux...),
- l'analyse de la concomitance des crues des différents cours d'eau,
- la prise en compte éventuelle du laminage des hydrogrammes de crue,
- la prolongation de la chronique observée sur la station aval,
- in fine un échantillon de débits suffisamment long pour confirmer les estimations des formulations semi empiriques de type Gradex progressif.

Les résultats issus de cette modélisation seront ainsi comparés aux débits de pointes issus des analyses statistiques précédentes.

2.3.2 Facteurs entrant dans le choix du modèle hydrologique

Type d'évènement de pluie à modéliser

Le rapport « Phase 1 – Livrable 2 : Connaissance historique du territoire » décrit 14 épisodes de crue. Ces crues se divisent en deux catégories :

- les crues qui font suite à une période pluvieuse de plusieurs semaines, voire plusieurs mois ayant lieu généralement en hiver ;
- les crues d'été issues d'épisodes orageux intenses et localisés.

Le modèle hydrologique doit être en mesure de modéliser ces 2 types de crue.

Réponse du bassin versant aux crues les plus importantes

A partir de la description de chacun des évènements présentée dans le rapport « Phase 1 – Livrable 2 : Connaissance historique du territoire », la réponse du bassin versant vis-à-vis des crues d'hiver peut-être caractérisée. Ainsi parmi les crues les plus importantes enregistrées, plusieurs d'entre elles apparaissent suite à une période de quelques semaines à plusieurs mois particulièrement pluvieux. C'est le cas des crues suivantes :

- **Décembre 2012** : pluie quasi continue depuis octobre, et la pluie de fin décembre engendre une réponse quasi instantanée du cours d'eau en termes d'augmentation de débit.
- **Décembre 1999** : les cumuls de pluie sont importants les 2 semaines précédant le pic de crue (66 à 132 mm suivant la station) ;

- **Novembre 1998** : cumul de 69 à 142 mm de pluie sur le mois d'octobre précédent la crue.
- **Décembre 1994** : cumul de 186 mm sur les 3 semaines précédant les 5 jours de crue de la fin du mois.
- **Janvier 1995** : les cumuls importants de décembre 1994, ainsi que la crue de la fin du même mois engendre une réponse à la pluie quasi instantanée du cours d'eau en termes d'augmentation de débit lors de la dernière semaine du mois de janvier 1995.
- **Février 1988** : cumul de pluie 2 fois supérieur à la moyenne en janvier, le cumul modéré en février suffit à causer l'épisode de crue.

Justification du modèle GR4 (Génie Rural à 4 paramètres)

Au vu de l'importance du niveau de saturation du sol mis en évidence par l'analyse des événements historiques, la conception d'un modèle à réservoir est impérative, nous proposons le modèle GR4.

Le modèle hydrologique GR réalise une transformation pluie – débit, il a été développé par le CEMAGREF. La recherche dans le domaine a suivi les évolutions suivantes : modèle GR3J et H en 1999 (Edijatno), modèle GR4h ou J des travaux de Charles Perrin (Perrin, Octobre 2000) (thèse : vers une amélioration d'un modèle global pluie - débit au travers d'une approche comparative, octobre 2000). En particulier GR4 a été appliqué à 429 bassins dont 26 en territoire australien, 82 en territoire américain, une quinzaine en régime méditerranéen et quelques bassins africains et brésiliens.

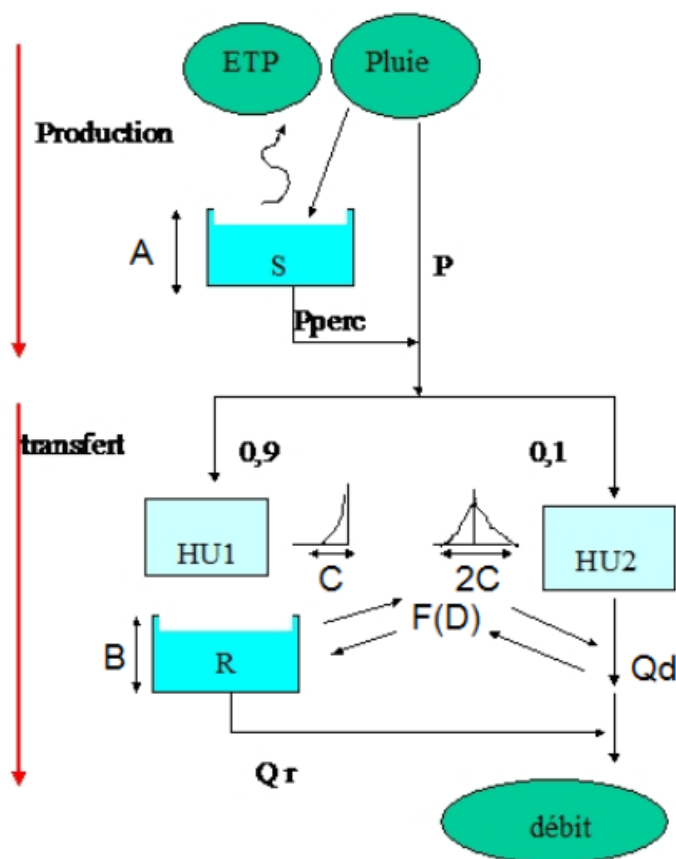


Figure 3 : Schéma de principe du modèle GR4J

Le modèle hydrologique, est un outil numérique de représentation de la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant. Il permet de transformer des séries temporelles décrivant le climat en une série de débits. Cette transformation est souvent divisée en deux parties:

- Une première partie souvent appelée "production", qui consiste à déterminer la répartition de la pluie "brute" observée en pluie "nette" (la proportion de la pluie brute qui participe au débit du bassin versant étudié), en quantité d'eau évapotranspirée et en quantité d'eau stockée par le bassin versant.
- Une deuxième partie souvent appelé le "transfert" ou "le routage", qui consiste à répartir dans le temps la quantité d'eau participant au débit du bassin versant étudié.

Différentes d'approches existent pour représenter cette relation pluie-débit. GR4J, le modèle utilisé ici est un modèle conceptuel, qui cherche à représenter les principaux processus sans utiliser les lois physiques régissant les processus concernés. Il est constitué de réservoirs connectés entre eux, dont les niveaux augmentent et diminuent au cours du temps et qui sont censés représenter les différents compartiments hydrologiques des bassins versants.

Le modèle GR4J a quatre paramètres à optimiser en calage :

A : capacité du réservoir de production, modélisant le stockage/déstockage du sol en tenant compte de la pluie et de l'évapotranspiration (la prise en compte de la nature du sol, de la saturation et des parts d'infiltration sont donc pris en compte dans ce paramètre) ;

B : capacité du réservoir de routage, permet de définir la répartition dans le temps du transfert du débit à son arrivée à l'exutoire ;

C : temps de base de l'hydrogramme unitaire ;

D: coefficient d'échanges souterrains, modélisant les échanges souterrains possibles dans le bassin versant (son ajustement permet donc de prendre en compte d'éventuelles pertes/gains d'eau par rapport à d'autres systèmes).

Le calage de la combinaison optimale des paramètres de GR4J par rapport aux débits observés à l'exutoire, permet donc d'intégrer tous les échanges implicites et explicites dans un même bassin versant. Toutes les incertitudes sont prises en compte dans les paramètres retenus.

Le modèle GR4 s'applique aussi bien à des pas de temps journalier qu'horaire. Il permet notamment de modéliser :

- l'évapotranspiration (ETP) ;
- le niveau de saturation du sol avant un évènement à simuler.

Le modèle GR4 présente les avantages suivants :

- prise en compte de la saturation du sol avant l'évènement à modéliser, de ce fait il est également adapté pour la modélisation de périodes en continu ;
- comparé à d'autres modèles tels que l'hydrogramme unitaire, le calage du GR sur une crue individuelle sera moins bon ; en revanche il sera meilleur, en moyenne, sur plusieurs évènements. Le modèle GR est robuste ;
- le calage des paramètres peut être fastidieux pour trouver la bonne combinaison, mais la qualité du calage est peu sensible à la variation de ces paramètres individuellement (encore une fois, robustesse du modèle GR). Le paramètre prépondérant jouant sur la qualité calage du modèle est la qualité des enregistrements de pluies injectée dans le modèle.

Remarque : Les modèles à réservoirs sont, de manière générale, assez robustes dès lors que la pluie de bassin est bien appréciée. Ils peuvent être moins performants pour les bassins karstiques ; néanmoins, dans ce cas, l'adaptation des paramètres du réservoir sol permet de prendre en compte et de compenser les pertes supplémentaires observées.

Il semble que le modèle de prévision GRP ne donne pas satisfaction sur ce bassin. Différentes raisons peuvent être recherchées : pluie de bassin, simplification du schéma (un seul réservoir), procédures de recalage, faible valeur du critère de persistance... L'expérience montre qu'un modèle hydrologique de crue correct (bonne appréciation des volumes et débits de crue) peut conduire à un modèle de prévision médiocre.

Si le modèle GR4 ne donnait pas satisfaction, nous testerons un autre modèle à réservoir.

Construction du modèle GR4

Le modèle sera construit avec le logiciel GESRES_{ISL}. Il est constitué des éléments suivants :

- des nœuds, correspondant aux points stratégiques auxquels nous souhaitons calculer les hydrogrammes (points d'entrée du modèle hydraulique, points de calage, points à enjeux,...),
- des biefs permettant la propagation des crues d'un nœud à l'autre (différentes méthodes de calcul possibles : calcul de propagation type Muskingum simple, intégration de profils réels,...),
- des bassins versants sur lesquels sont appliquées les pluies.

Une première version de l'emplacement des nœuds et du découpage en sous bassins versant que nous envisageons est illustrée sur la carte en annexe 1. Ce découpage pourra être affiné pendant l'étude en particulier pour l'aléa ruissellement.

L'évapotranspiration (ETP) est issue d'une moyenne interannuelle calculée sur 7 ans à la station de Lillers.

Mois	ETP mensuelle moyenne (mm/mois)
janvier	9.3
février	16.7
mars	46.8
avril	80.7
mai	108.7
juin	117.7
juillet	129.8
août	103.3
septembre	65.8
octobre	29.9
novembre	14.2
décembre	6.9

Tableau 4 : moyenne interannuelle d'ETP à la station de Lillers

Traitement des transferts d'eau entre bassins versants

Le modèle hydrologique a pour objectif de caractériser les débits et hydrogrammes produits sur les bassins versants au droit des exutoires retenus.

Il ne servira pas pour la caractérisation des échanges qui seront, par contre, reproduits par la modélisation hydraulique et la prise en compte des ouvrages et/ou échanges de surface dans celui-ci (Nave, Busnes, Grand Nocq).

L'emplacement des exutoires de sous-bassins versants dans le modèle hydrologique pourra ainsi être ajusté afin de s'assurer de disposer du volume ruisselé à l'amont des zones d'échanges.

Prise en compte des bassins d'expansions

Les ouvrages de gestion de l'eau sur le bassin versant seront intégrés à GESRES avec les dimensions qui les caractérisent (loi hauteur/volume stocké, cote et dimensions des vannes, pertuis ou déversoirs de surface) pour permettre un calage au plus juste des événements réels.

Pour la modélisation de l'événement de référence, un choix sera à réaliser par le Maître d'Ouvrage puisque la doctrine nationale prévoit que les ouvrages soient considérés comme transparents, c'est-à-dire sans effet sur la crue, ce qui est le cas lorsque le bassin est plein au moment où se produit l'événement.

2.4 Evènements réels retenus pour le calage

Rappel de la conclusion de phase 1 (livrable 4, § 9.4)

Plusieurs critères rentrent en compte dans le choix des crues de calage :

- les conditions météorologiques et hydrogéologiques doivent être connues au mieux ;
- le déroulement de la crue doit être suffisamment documenté pour reconstituer les événements (manœuvres, rupture de digue) ;
- les zones inondées doivent être connues ;
- le maximum de données concernant les hauteurs d'eau atteintes est souhaitable ;
- la crue doit avoir été impactante en termes de dégâts et de zones touchées.

Quelques éléments de réponse peuvent aider à la décision :

- Les événements les plus dommageables sont ceux de décembre 1994 - février 1995, décembre 1999, août 2002 et juillet 2005.
- Les données de hauteur sur la Lys, soit les conditions aval, sont disponibles depuis 1999, avec des interruptions lors des épisodes de 2000, 2002 et 2007.
- Les pluies horaires sont disponibles depuis 2001 à Aire-sur-la-Lys et Ourton, depuis 2002 à Lillers, depuis 2003 à Bruay-la-Buissière.
- Les repères de crue les plus nombreux, ainsi que les zones inondées les mieux cernées correspondent aux épisodes de décembre 1999, août 2002 et juillet 2005 (cf. ANNEXE 3).
- Décembre 1999 reste une crue issue d'un événement météorologique particulier (à l'échelle de la France) couplée à des circonstances aggravantes (manipulation de vanne, obstruction de pont, rupture de digue).
- Les épisodes d'août 2002 et juillet 2005 sont localisés et n'ont pas touché les mêmes lieux : août 2002 était concentré sur la Clarence intermédiaire et le Grand Nocq et juillet 2005 sur la Nave.
- Pour la crue de décembre 1993, quelques niveaux sont disponibles pour la Clarence à Calonne-sur-la-Lys, Robecq et Mont Bernanchon.
- Pour la crue de janvier 1995, les niveaux en amont et aval des siphons du Grand Nocq et de la Clarence ont été mesurés.
- Les épisodes de 2007, mars et décembre 2012 et juillet 2014 sont plus récents mais ont eu des conséquences moindres ou plus localisées. Des données de hauteur sont disponibles sur tout le territoire.
- Depuis 2009 la station de Marles-les-Mines est en fonction.
- Des aménagements type bassins de rétention et zones d'expansion des crues ont été mis en place depuis 2002. La date et le descriptif de la majorité de ces aménagements sont disponibles.
- Des données de hauteur d'eau sur le bassin versant de la Clarence (Clarence, Grand Nocq, Nave, Rimbart) sont disponibles depuis janvier 2007.

Au vu des informations disponibles, il est préférable de caler le modèle en lit mineur sur une crue récente, décembre 2012 par exemple, et de le valider ensuite en lit

majeur sur une crue hivernale de type 1999 ainsi que sur les crues orageuses de 2002 et 2005 respectivement sur la Clarence et sur la Nave.

Suite à donner

Les informations pour caler le modèle sont peu nombreuses avant 2012 et moins fines (une seule station hydrométrique, pas de données pluviométriques horaires), néanmoins de nombreux événements sont antérieurs à cette date.

Afin d'exploiter l'ensemble des données, il est donc nécessaire de réaliser des simulations dont les résultats seront adaptés aux données disponibles en limitant les hypothèses réalisées.

Par exemple, si un événement est décrit uniquement par des données journalières, la simulation au pas de temps horaire introduira une hypothèse sur la répartition durant la journée de référence,

L'année 2012 est ainsi particulièrement importante à deux titres : les données disponibles sont nombreuses (pluies horaires, existence d'une deuxième station hydrométrique) et elles sont récentes, ce qui permet de s'affranchir du risque de grosses modifications du bassin versant (aménagements d'ouvrages, occupation du sol).

Méthode pour les petits bassins versants (aléa ruissellement)

En tête de bassin, la méthode GR4 ne pourra pas être appliquée, car le réservoir sol est beaucoup plus petit et impossible à quantifier.

Nous appliquerons donc la méthode préconisée par le guide PPR ruissellement péri-urbain qui prévoit d'estimer les débits ruisselés à l'aide de la formule rationnelle qui a été implémentée dans GESRES_{ISL} selon les principes suivant.

La pluie ruisselée est une part fixe de la pluie tombée. L'équation permettant le calcul du ruissellement est indiquée ci-après. Afin d'introduire une variation saisonnière, la pluie brute est soustraite de l'ETP.

$$Qu(t) = C \times [Pb(t) - a \times ETP(t)]$$

Avec

- Qu le débit unitaire ;
- C : le coefficient de ruissellement (%) ;
- a : coefficient d'abattement de l'ETP (%)
- Pb : la pluie brute tombant sur le bassin versant ;
- ETP : l'évapotranspiration potentielle.

De plus, une fonction de transfert induisant un retard et une diffusion des débits unitaires générés par la fonction de production est intégrée.

2.4.1 Modèle au pas de temps journalier

Un premier calage est effectué au pas de temps journalier sur l'évènement hivernal de décembre 1999 pour lequel nous ne disposons que de données de pluie journalière. Les crues de 1998 et décembre 1994 à janvier 1995 sont ensuite simulés pour valider le jeu de paramètre du modèle journalier.

Ce modèle hydrologique au pas de temps journalier sera exploité pour déterminer les hydrogrammes des évènements hivernaux servant au calage du modèle hydraulique.

2.4.2 Modèle au pas de temps horaire

Un second modèle est construit au pas de temps horaire. Ce modèle sera utilisé pour caractériser les aléas ruissellement et débordement de cours d'eau des scénarios de référence. Nous proposons de réaliser le calage sur 2 crues, **les plus documentées** sur l'hydrologie : mars 2012 et décembre 2012.

Compte tenu de la taille des sous-bassins versants et de leurs temps de réponse prévisibles, le modèle hydrologique devra être construit avec un pas de temps horaire. C'est pourquoi le calage devra également être réalisé au pas de temps horaire. Les évènements dont les données sont disponibles au pas de temps horaire sont les suivants :

- Mars 2012 :
 - débits : Marles et Robecq
 - pluie : Ourton et Lillers
- Décembre 2012 :
 - débits : Marles et Robecq
 - pluie : Ourton et Lillers

Pour les évènements précédents, il n'y a pas de données horaires.

Remarque : Le modèle GR4 construit sera calé et validé pour les crues anciennes au pas de temps journalier. Néanmoins, pour déterminer les hydrogrammes de référence, en particulier orageux, le modèle GR4 horaire calé sur 2012 sera utilisé.

Le pluviomètre à enregistrement journalier de la station de Fiefs est également utilisé pour compléter les données d'Ourton pour les mois précédents les crues.

Le calage du modèle est réalisé sur l'évènement de décembre 2012. Le hyétogramme reconstitué et injecté dans le modèle hydrologique est illustré sur la figure suivante.

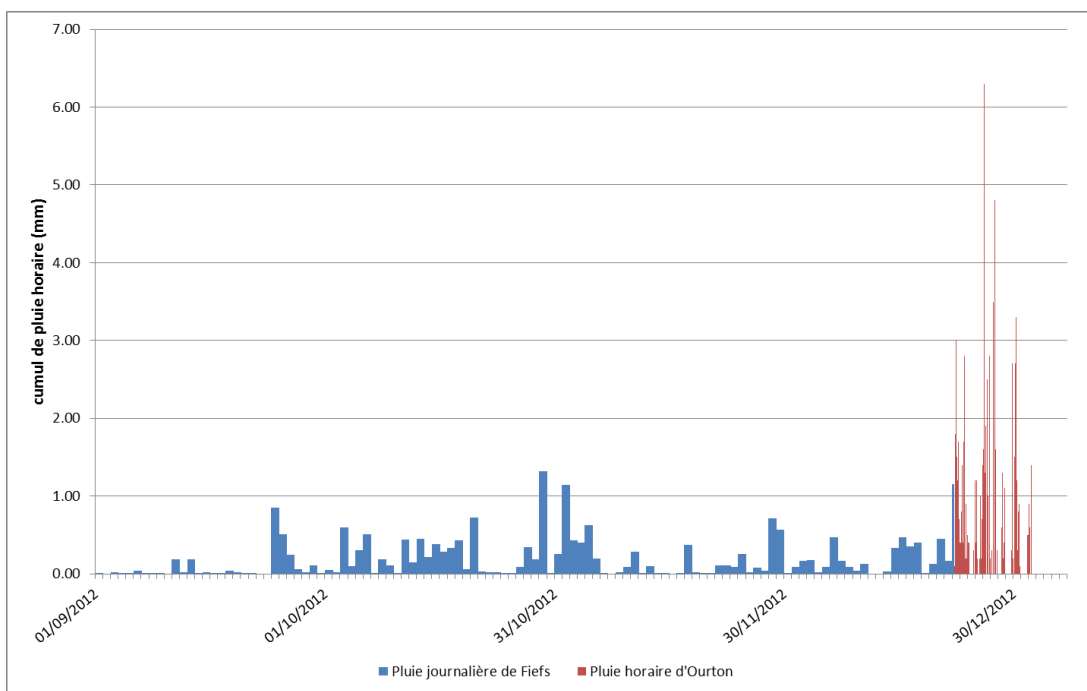


Figure 4 : hyetogramme de décembre 2012 reconstitué à partir des stations pluviométriques d'Ourton et de Fiefs

Il n'est pas nécessaire de disposer des données à un pas de temps identique sur toute la durée de la simulation. En particulier, la précision est recherchée sur la durée de la crue et, sur la période antérieure, le pas de temps journalier, voire mensuel au-delà d'un mois, est suffisant.

Le hyetogramme de Lillers injecté dans le modèle est illustré sur la figure ci-dessous.

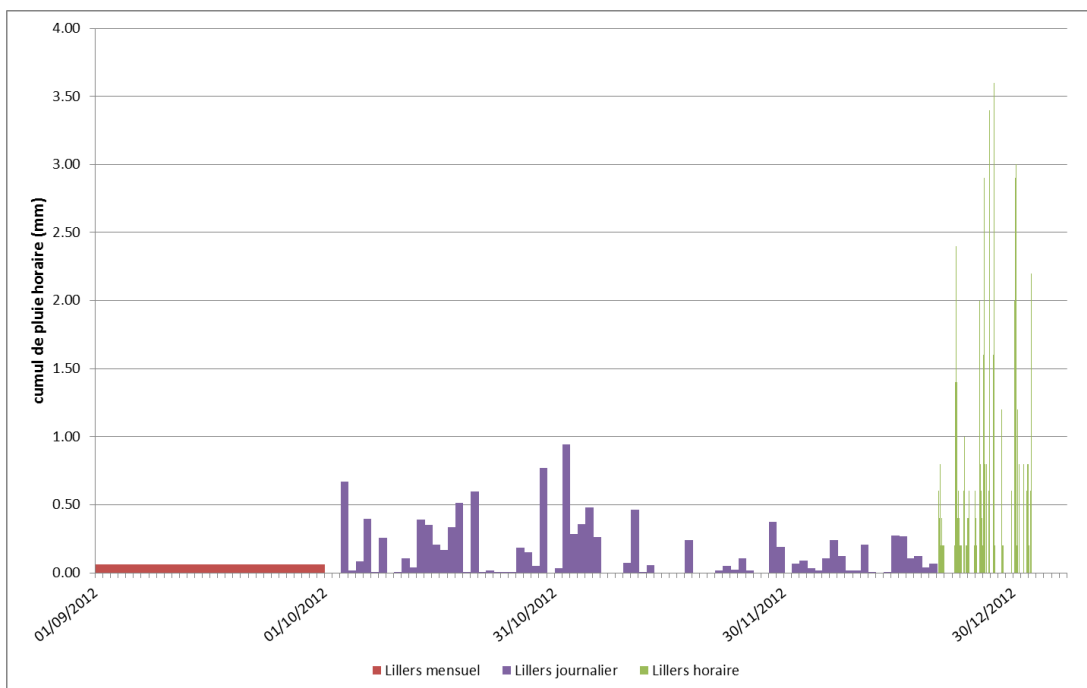


Figure 5 : hyetogramme de décembre 2012 sur la station pluviométrique de Lillers

Nous nous assurerons d'effectuer le calage à la fois en débit et en volume sur les hydrogrammes mesurés aux stations hydrographiques illustrés ci dessous.

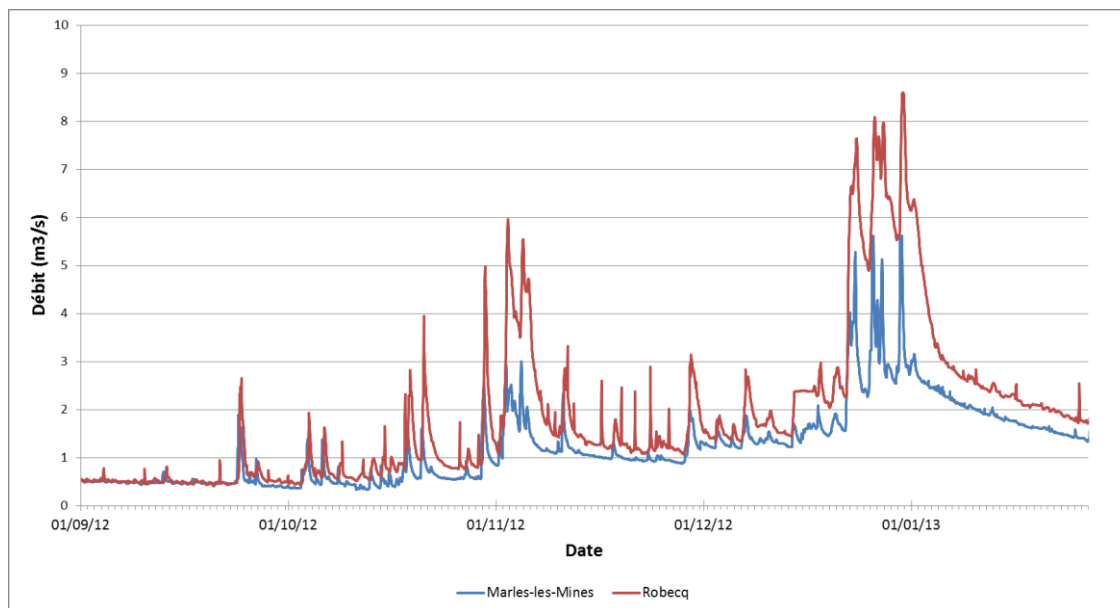


Figure 6 : hydrogrammes de calage de l'évènement de décembre 2012

La validation du modèle hydrologique sera réalisée par exploitation du modèle préalablement calé, sur l'évènement de mars 2012.

2.5 Création des hyétogrammes synthétiques

La construction des hyétogrammes synthétiques nécessite de connaître la relation « hauteur durée fréquence » des pluies. Ces relations peuvent être déterminées à l'aide des coefficients de Montana.

Les stations les plus proches dont les coefficients de Montana sont calculés, sont listées ci-dessous :

- LILLE-LESQUIN (59) à 40 km - altitude : 47m
- LE-TOUQUET (62) à 60 km - altitude : 5m
- ABBEVILLE (80) à 60 km - altitude : 70m
- ST QUENTIN (02) à 90 km - altitude : 98m

La station de Lille est la plus proche du bassin versant de la Clarence et est située dans le même espace géographique, la plaine des Flandres. Cette station est donc retenue.

Deux types de hyétogrammes seront construits, l'hivernal et l'orageux.

Hyétogramme hivernal

Les hyétogrammes hivernaux seront utilisés pour la caractérisation de l'aléa débordement de cours d'eau. Leur pas de temps doit donc être au minimum égal au temps de concentration des sous-bassins versant dont les exutoires sont les conditions limite amont du modèle hydraulique, soit 30 minutes.

Les Figure 7 (mesure toute les 6 minutes sur l'évènement de décembre 2012) Figure 8 (données horaires sur l'évènement de décembre 2012) et Figure 9 (données journalière sur les évènements de 1994-1995, 1998, 1999 et 2012) présentent les intensités moyennes des pluies historiques en fonction de leur durée. Ces 3 figures mettent en évidences les périodes suivantes :

- un pic de précipitation sur la durée de 6 minutes (Figure 7), durée correspondant au pas de temps d'enregistrement de la station ;
- une 2^{ème} période de 30 minutes pendant laquelle les précipitations varient significativement (Figure 7) ;
- une 3^{ème} période de 24 heures (Figure 8).
- A l'échelle de la semaine, une 4^{ème} période de 10 jours (Figure 9).

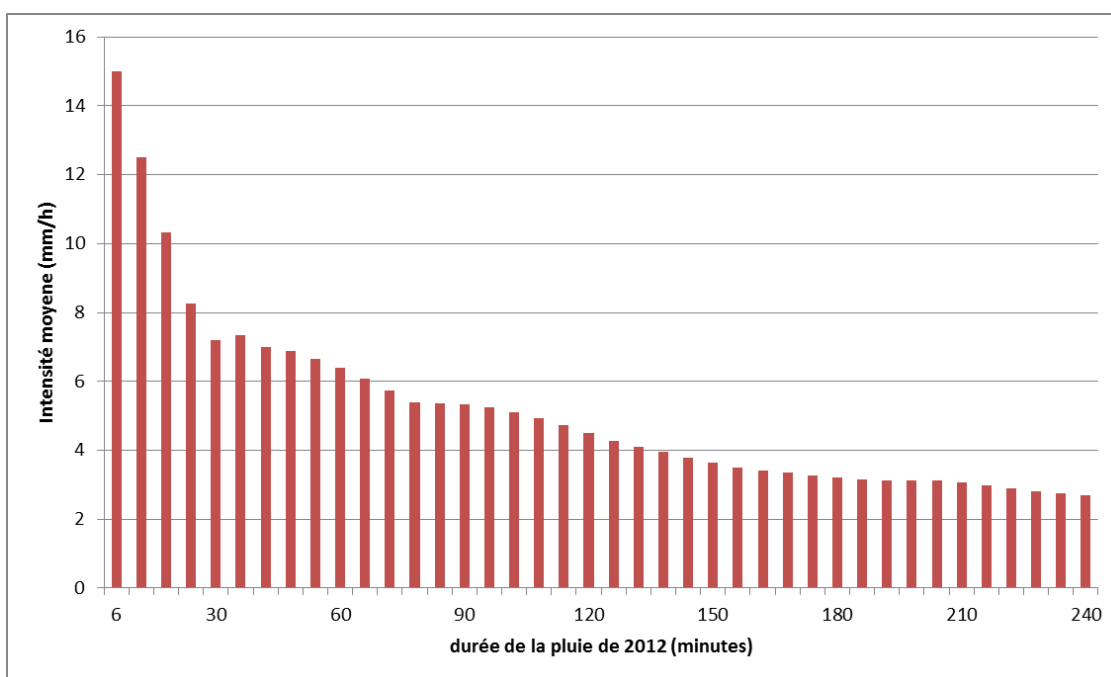


Figure 7 : intensité moyenne des précipitations de la crue de 2012 en fonction de leur durée (à partir des mesures toute les 6 minutes de la station de d'Ourton)

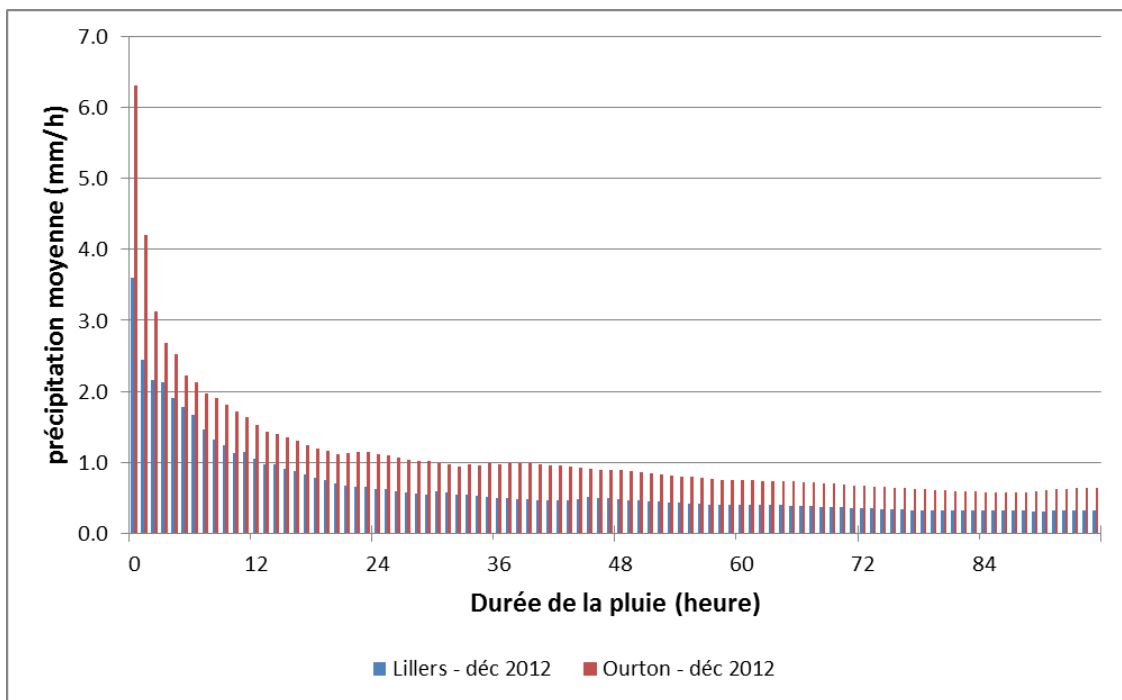


Figure 8 : intensité moyenne des précipitations de la crue de 2012 en fonction de leur durée (à partir des mesures horaires des stations de Lillers et Ourton)

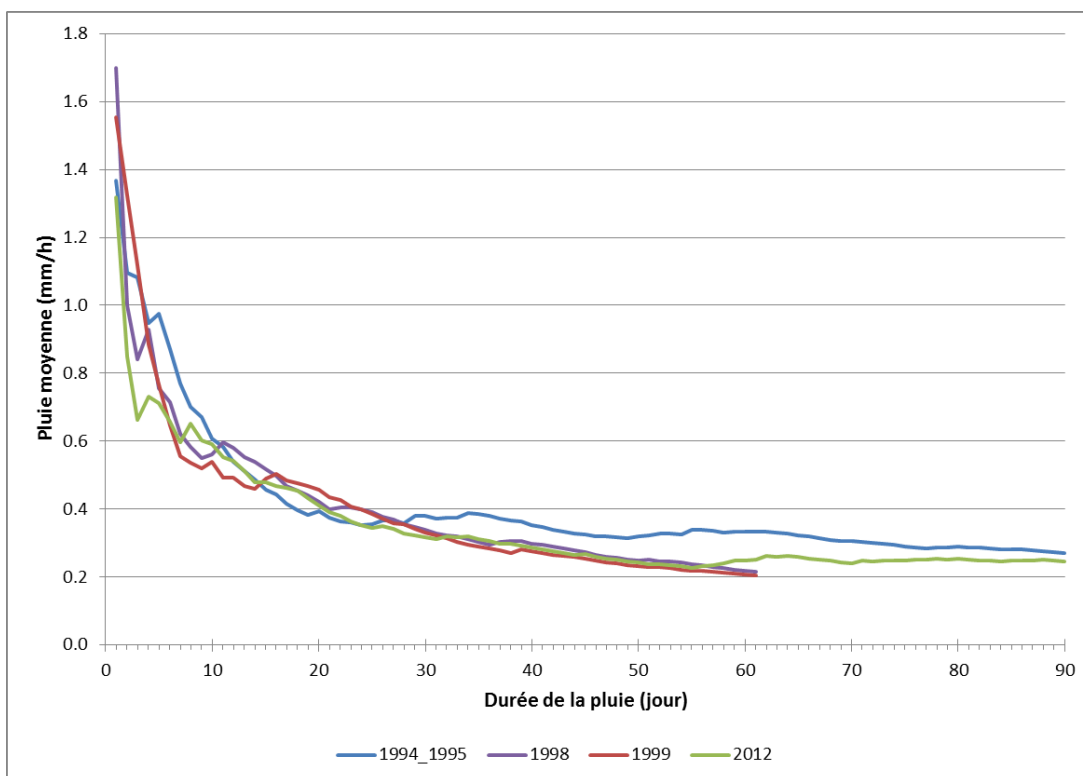


Figure 9 : intensité moyenne des précipitations des crues historiques en fonction de leur durée (à partir des mesures journalières de la station de Fiefs)

Cette analyse des événements réels permet de définir les caractéristiques pour la définition des hyétogrammes type hivernal. Ils seront formés d'une succession de trois épisodes pluvieux de différentes intensités avec :

- un état initial correspondant à une pluie sur les 3 mois précédant la crue identique à la période précédant la crue de fin 1994 début 1995 (intensité moyenne la plus importante sur une aussi longue durée) ;
- une durée du hyétogramme de crue égale à 10 jours ;
- une durée de 24 heures sur laquelle la période de retour du cumul de pluie de l'évènement sera calculée ;
- un pic intense de 30 minutes correspondant au pas de temps du hyétogramme et déterminé à partir des coefficients de Montana.

Hyétogramme d'évènements orageux

Les hyétogrammes synthétiques sont construits avec un pas de temps égal au plus court temps de concentration des sous bassins versant, qui sont plus petits que pour l'aléa hivernal. En effet, il est courant que le ruissellement produit par un orage touchant un petit bassin versant soit dommageable pour une pluie très courte de forte intensité.

D'après la Figure 10 et la Figure 11, les évènements orageux historiques mettent en évidence :

- un évènement pluvieux de 3 heures (Figure 11) ;
- un pic intense pouvant être marqué sur 6 minutes, comme cela a été le cas en juillet 2014 (Figure 10) ;

Les hyétogrammes seront donc construits de la manière suivante :

- un évènement pluvieux de 3 heures correspondant à la période de retour calculée.
- un pic intense de 6 minutes ou d'une durée du plus petit temps de concentration, déterminé à partir des coefficients de Montana ;
- l'application de la méthode de Desbordes à double triangle.

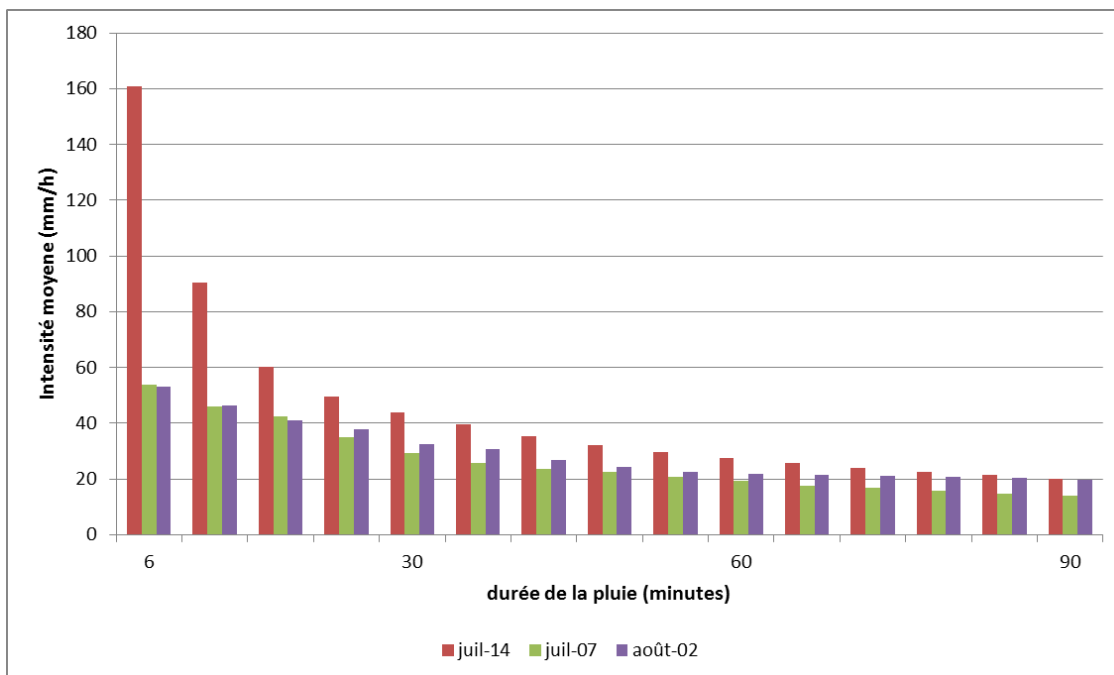


Figure 10 : intensité moyenne en fonction de leur durée des précipitations orageuses historiques

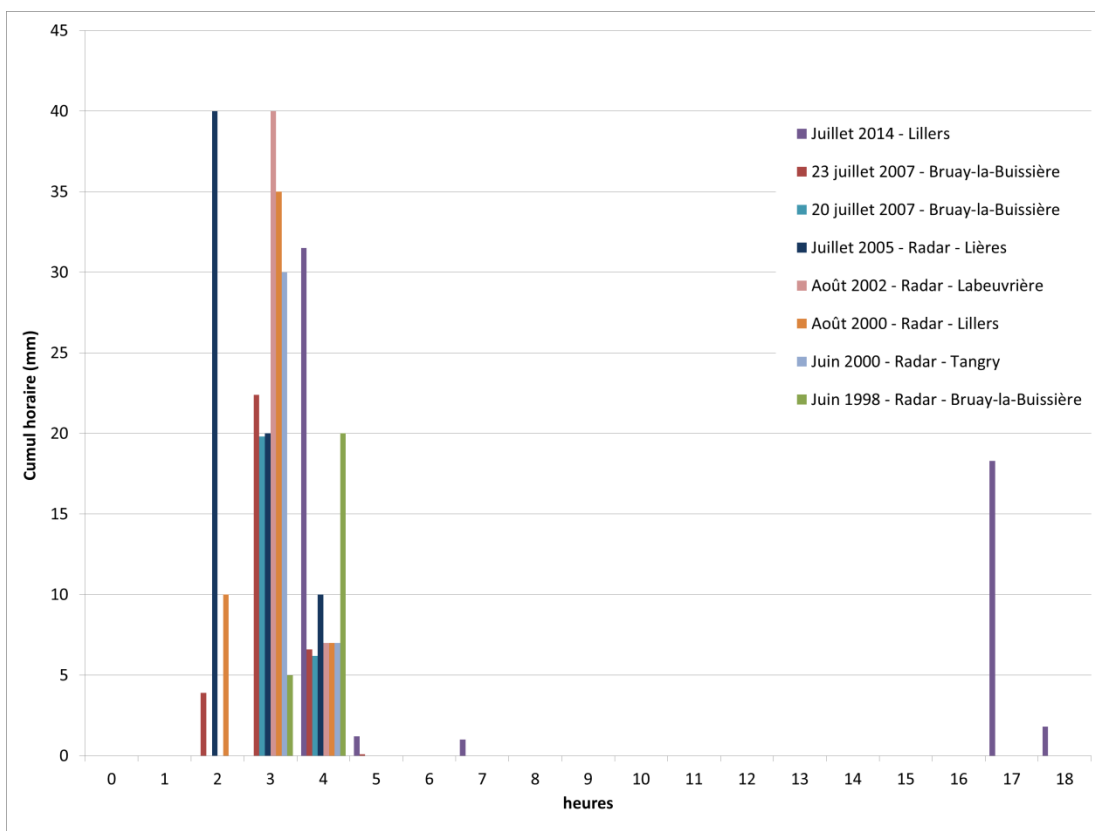


Figure 11 : intensité horaire des précipitations des crues orageuses historiques

Tests de sensibilité

Un test de sensibilité sur le choix de la durée de l'événement centennal sera mené. Ainsi, pour chaque événement hivernal et orageux, trois durées seront testées afin de retenir, après discussion avec le COTEC, l'événement centennal de référence.

L'analyse des événements réels réalisée (Cf. § Rappel sur l'analyse statistique) mettra en évidence la période de retour sur plusieurs durées de crue et permettra d'alimenter cette réflexion sur le choix des paramètres de construction du hyétogramme de référence.

2.6 Comparaison des valeurs obtenues et de la cohérence des études existantes

L'étude hydrologique aura permis de calculer les débits à l'aide de la méthode du gradex progressif et du modèle hydrologique.

On comparera ces valeurs de débit à celles retenues dans les études existantes et, en cas de différence, on en analysera les causes (séries pluviométriques ou hydrométriques plus longues, différences d'hypothèses sur les paramètres de ruissellement ou de temps de concentration, etc...).

En cas de constat d'incohérence, nous proposerons un débit au regard des données et des méthodes employées dans les différentes études mais également de notre connaissance de l'hydrologie régionale et locale.

Le débit retenu sera soumis à validation du Comité Technique.

2.7 Répartition spatiale des pluies

La conclusion de phase 1 (livrable 4) est la suivante :

Les stations pluviométriques fournissant les plus grandes chroniques sur ou à proximité immédiate du bassin versant sont au nombre de deux, Lillers en plaine et Fiefs en tête de bassin versant, mais l'analyse statistique ne met pas en évidence une grande différence entre les deux. La pluie sur le bassin versant peut donc être considérée comme homogène pour les événements d'hiver.

S'agissant des orages, statistiquement, leur intensité est la même quel que soit le point du bassin versant, seule leur localisation diffère.

Un seul hyétogramme synthétique, homogène sur l'ensemble du bassin versant, sera donc utilisé.

2.8 Analyse de la concomitance des crues et proposition d'événement hydraulique centennal

Les possibilités de concomitance des crues des affluents de la Clarence avec une crue de la Clarence est analysées. Les crues d'hiver et les crues orageuses sont analysées séparément.

Crue d'hiver

La crue de décembre 1999 a touché l'intégralité du bassin versant.

Nous considérerons donc qu'un événement étendu à l'ensemble du bassin versant est l'hypothèse d'aléa la plus probable. La période de retour centennale sera donc retenue pour chacune des stations pluviométriques.

Crue d'orage

Celles-ci dépendent de l'étendue des phénomènes météorologiques générateurs des crues extrêmes : orages localisés ou pluies plus étendues.

D'après l'analyse des événements orageux (rapport Phase 1 – Livrable 2 : Connaissance historique du territoire), les orages historiques ont été très souvent localisés, et quelquefois relativement homogènes sur le bassin versant. Le cas d'un orage homogène sur le bassin versant étant le plus défavorable, nous proposons de retenir cette hypothèse. Néanmoins, un déphasage peut exister entre les différents sous-bassins versant. L'analyse des hyétogrammes mesurés aux stations et des images radar montre que le déphasage sur le bassin versant peut être compris entre 1 h et 2 h 30. Une modélisation hydrologique sera réalisée afin d'observer les possibilités de concomitance aux confluences, en cas de déphasage. Le cas le plus défavorable entre déphasage et homogénéité temporelle sera retenu. Le déphasage sera appliqué entre les 2 pluies injectées dans le modèle hydrologique issues des stations de Fiefs et Lillers.

2.9 Caractérisation de l'événement hydraulique de référence

L'événement de référence est la plus forte crue historique si elle est suffisamment documentée en repères de crue et de période de retour supérieure à 100 ans ou l'événement centennal sinon.

Les différentes analyses menées sur les durées différentes de pluies et les périodes de retour associées permettront d'alimenter la discussion concernant le choix de l'événement de référence pour l'aléa débordement et pour celui de ruissellement.

2.9.1 Crue d'orage

Les crues orageuses les plus dommageables ont été celles d'août 2000 et août 2002 sur le milieu et l'aval du bassin versant et celle de juillet 2005 sur l'amont et la Nave. En termes de débits de pointe et de volume enregistrés à Robecq, la crue d'août 2002 est la plus importante de ces 3 crues. Néanmoins, toutes crues orageuses confondues,

la crue de mars 2012 est la plus importante en termes de débit de pointe et de volume, cependant elle n'a pas été aussi dommageable que les 3 crues de 2000, 2002 et 2005.

Le Tableau 5 présente les débits de pointes des différentes crues d'orage historiques et le débit de pointe calculé statistiquement dans le rapport « Phase 1 – Livrable 4 – Présentation du bassin versant ». Les caractéristiques manquantes de l'évènement centennal seront calculées et discutées en phase caractérisation de l'aléa.

	Aout 2000	Aout 2002	Juillet 2005	Evènement centennal
Débit de pointe (station de Robecq)	5,68 m ³ /s	8,49 m ³ /s	8,23 m ³ /s	Comparaison gradex / gradex progressif et GR
Volume de crue (station de Robecq)	471 000 m ³	2 335 000 m ³	1 593 000 m ³	Calculé avec le modèle hydrologique
Cumul de pluie en 1 heure (mm)	35 mm (radar, Lillers)	20,6 mm (Ourton) 19,2 mm (Lillers)	33,5 mm (Lillers)	Calculé avec coefficient de Montana à Lille
Cumul de pluie en 3 heures	52 mm (radar, Lillers)	27,2 mm (Lillers)	64,9 mm (Lillers)	Calculé avec coefficient de Montana à Lille
Cumul de pluie sur 24 heures	4,3 mm (Fiefs) 46,8 mm (Lillers)	46,2 mm (Lillers)	100,9 mm (Lillers)	102 mm (Fiefs) 107 mm (Lillers)

Tableau 5 : comparaison des évènements historique et de l'évènement centennal

2.9.2 Crue d'hiver

En termes de débit de pointe aux stations hydrométriques, la plus forte crue historique est celle de 1999. Les caractéristiques sont comparées dans le Tableau 6.

Les autres caractéristiques de l'évènement centennal seront calculées en phase caractérisation de l'aléa.

	Décembre 1999	Evènement centennal
Débit de pointe (station de Robecq)	8,46 m ³ /s	Comparaison gradex / gradex progressif et GR
Volume de crue (station de Robecq)	5 500 000 m ³	Calculé avec le modèle hydrologique
Cumul de pluie sur 24 heures	37,3 mm	62 mm (Fiefs) 68 mm (Lillers)
Cumul de pluie sur 10 jours	129,2 mm	Calculé avec coefficient de Montana à Lille

Tableau 6 : comparaison des évènements historique et de l'évènement centennal

2.10 Résumé

Les évènements qui conduisent à des risques inondations sur le territoire sont de deux types : les crues d'hiver qui surviennent après de longs jours de pluie qui ont saturé les sols, les pluies d'orage violentes mais beaucoup plus localisées. Pour être capable d'estimer en tous points du territoire les hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement qui pourraient être atteintes, il est nécessaire d'estimer les débits. A ces fins, Il est proposé de bâtir un modèle hydrologique. Il s'agit à partir de la pluie tombée sur le territoire de simuler le ruissellement qui sera repris par le réseau et acheminé vers l'aval.

Pour les évènements d'hiver, il est essentiel de prendre en compte les pluies sur les mois précédant l'évènement. L'importance de la saturation initiale dans la genèse de la crue nous conduit à proposer un modèle à réservoir, modèle robuste très utilisé dans de tels contextes. Il y aura lieu de vérifier la bonne adéquation de ce modèle avec la réalité et sa capacité à simuler des conditions hydrologiques variées en comparant les données avec celles issues des stations hydrométriques d'une part, en réalisant des analyses de sensibilité aux données d'entrée d'autre part. L'évènement de référence résultera ainsi du croisement des approches statistique et modélisatoire.

Pour les évènements orageux, le modèle à réservoir sera également utilisé. Compte tenu de la spécificité de ces évènements (importance du ruissellement superficiel, condition initiale : sol sec, réseau non permanent), nous comparerons les résultats du modèle GR4 à ceux obtenus à partir de l'application de la méthode rationnelle. L'évènement de référence résultera ainsi du croisement des approches statistique et modélisatoires GR4 et rationnelle.

3 ALEA DEBORDEMENT DE COURS D'EAU

3.1 Préambule

Le type de modèle à mettre en œuvre dépend des éléments suivants :

- la présence d'ouvrages hydrauliques,
- la présence d'ouvrages de protection potentiellement défaillants ou submergés,
- le maillage du réseau,
- les paramètres entrant en jeu dans l'aléa.

La Clarence et ses affluents nécessitent une connaissance fine de l'aléa. De plus le réseau hydrographique du bassin versant est particulièrement complexe avec de nombreuses interactions entre les différents axes d'écoulements notamment dans la partie aval. De nombreux ouvrages sont également présents tout au long des cours d'eau. Enfin la caractérisation de l'aléa comprend la simulation de rupture de digues.

Le tableau ci-après présente les options de modélisation explorées, les avantages et inconvénients de chacune d'elles :

logiciel	Avantages	inconvénients	conclusions
HEC RAS 1D et 1D à casiers	<p>Retours d'expérience : Nombreux retours d'expérience.</p> <p>Ouvrages et singularités : Hec Ras donne la possibilité de représenter de nombreuses pertes de charges singulières.</p> <p>Données d'entrée : besoins en informations topographiques limités.</p>	<p>Nombreuses difficultés possibles liées à la représentation des échanges entre lit et casiers et à la caractérisation des échanges entre bassins versants en aval de la Clarence</p>	<p>Bien que largement utilisé, Hec-Ras 1D et Hec-Ras1D à casiers ne peuvent répondre aux exigences du maître d'ouvrage</p>
HEC RAS nouvelle version	<p>La nouvelle version du logiciel Hec Ras propose une modélisation 1D couplé à un modèle 2D. Il allie la modélisation 2D en lit majeur et une juste représentation des ouvrages en lit mineur.</p> <p>Le modèle peut être attaché à une base de données géo référencées.</p> <p>Il existe un module de rupture de digues.</p>	<p>La nouvelle version fait l'objet de peu de retours d'expérience (version beta en cours d'évaluation).</p> <p>Le lien entre lit mineur 1D et majeur 2D se fait par l'intermédiaire de discrétisation par succession de seuils latéraux, ce qui constitue une schématisation qui peut porter préjudice à la qualité locale du modèle.</p>	<p>La nouvelle version de Hec Ras peut répondre pour une grande partie aux demandes du maître d'ouvrage. Il existe cependant peu de retours d'expérience. La schématisation nécessaire pour simuler les relations entre lits mineur et majeur est assez discutable et dans tous les cas est difficile à interpréter.</p>
TELEMAC 2D	<p>Retours d'expérience : Le logiciel est largement utilisé par la profession</p> <p>Telemac 2D peut prendre en compte la diversité des situations rencontrées en lit majeur. Un forum d'utilisateurs permet une amélioration continue.</p> <p>L'intégration de sous-routines est assez aisée.</p> <p>Le modèle est attaché à une base de données géoréférencée. Les cartographies automatiques sont largement utilisées.</p> <p>Il existe un module de rupture de digues.</p>	<p>Besoins en topographie plus importants que pour une approche 1D ou 1D à casiers</p> <p>Prise en compte des singularités (ouvrages) via des sous-routines à développer</p>	<p>Le logiciel Telemac 2D répond à la précision du calcul demandé en particulier en zone urbaine.</p>

Les modélisations hydrauliques seront réalisées en **régime transitoire**.

La modélisation bidimensionnelle est proposée du fait de la topographie plate à l'aval et de la nécessité de simuler une rupture dans les digues. Ce type de modélisation permet de disposer d'un modèle fin (notamment en termes de vitesses d'écoulement) dans le domaine urbanisé.

La modélisation bidimensionnelle permet de disposer de valeurs de hauteurs d'eau calculées en tout point, avec une prise en compte de la totalité de la topographie disponible grâce au MNT LIDAR. La modélisation bi-dimensionnelle est mise en œuvre très rapidement lorsque les données topographiques sont aussi fournies que celles du LIDAR.

La densité du maillage pourra être différente suivant les occupations du sol (plus dense en zone urbanisée) et éventuellement d'amont vers l'aval.

Le principal défaut de la modélisation avec TELEMAC2D est la prise en compte des pertes de charges aux ouvrages qui sont intégrées à partir de sous-routines adaptées à chacun des ouvrages. Pour palier à ce problème, les pertes de charges aux ouvrages seront vérifiées à l'aide d'un modèle 1D tel que HEC-Ras ou des formules empiriques (lois d'orifices, Rehbock, Bradley...).

Lors de l'élaboration des cartes d'aléas, il s'agira de convenir, avec le Maître d'ouvrage de la grille à retenir : croisement hauteurs/vitesses ou classes de hauteurs d'eau seules.

3.2 Construction du modèle TELEMAC 2D

3.2.1 Présentation générale du modèle TELEMAC

TELEMAC2D est un logiciel de modélisation hydraulique développé par EDF Recherche et Développement, en libre utilisation et géré aujourd'hui par un groupement d'organisations européennes (EDF R&D, Artelia, CETMEF, Bundesanstalt für Wasserbau, Daresbury Laboratory, HR Wallingford). Il résout les équations de Saint-Venant à l'aide de la méthode des éléments finis sur une grille de calcul à mailles triangulaires. Il permet d'effectuer des simulations en régime transitoire aussi bien qu'en régime permanent.

TELEMAC2D permet de prendre en compte les phénomènes physiques suivants :

- Propagation des ondes longues avec prise en compte des effets non linéaires,
- Frottement sur le fond,
- Turbulence,
- Écoulements torrentiels et fluviaux,
- Coordonnées cartésiennes ou sphériques pour les grands domaines,
- Zones sèches dans le domaine de calcul : bancs découvrants et plaines inondables,
- Suivi de flotteurs et dérives lagrangiennes,

Traitement de singularités : seuils, digues, buses.

3.2.2 Emprise du modèle hydraulique

L'emprise des modèles hydrauliques débordement de cours d'eau et ruissellement sont présentés en ANNEXE 1 .

3.2.3 Maillage du modèle

Le maillage est constitué de triangles formés par les nœuds de calcul. Le maillage doit à la fois reproduire l'écoulement en lit mineur (mailles fines organisées dans le sens de l'écoulement d'amont vers l'aval) et en lit majeur (mailles plus lâches pour des écoulements latéraux).

Nous utilisons deux mailleurs pour la construction de nos modèles : Matisse (mailleur « historique » de TELEMAC) et Blue-Kenue. Bien que s'appuyant sur des « philosophies » un peu différentes, ces deux mailleurs offrent sensiblement les mêmes possibilités de maillage.

En particulier, tous deux permettent :

- de mailler finement et de manière régulière le lit mineur : nombre de mailles constant en largeur, mailles étirées en longueur pour réduire le nombre de mailles ;
- dans le même principe, de mailler finement et régulièrement les digues ;
- de mailler finement les zones d'intérêts : zones urbaines, abords d'ouvrages... ;
- de faire des « trous » dans le maillage afin d'exclure des éléments (obstacles) insubmersibles et imperméables (par exemple, des piles de ponts) ;
- de mailler de manière plus lâche les zones sans enjeux mais qui participent tout de même à la dynamique de la crue (lit majeur naturel par exemple).

L'extrait de maillage ci-dessous représente le passage d'un cours d'eau (en bleu-vert) à travers un remblai routier (en orange) équipé d'un pont et d'un ouvrage de décharge. En rive gauche, un lotissement est visible avec un maillage très raffiné entre les habitations et des bâtiments considérés comme des obstacles à l'écoulement.

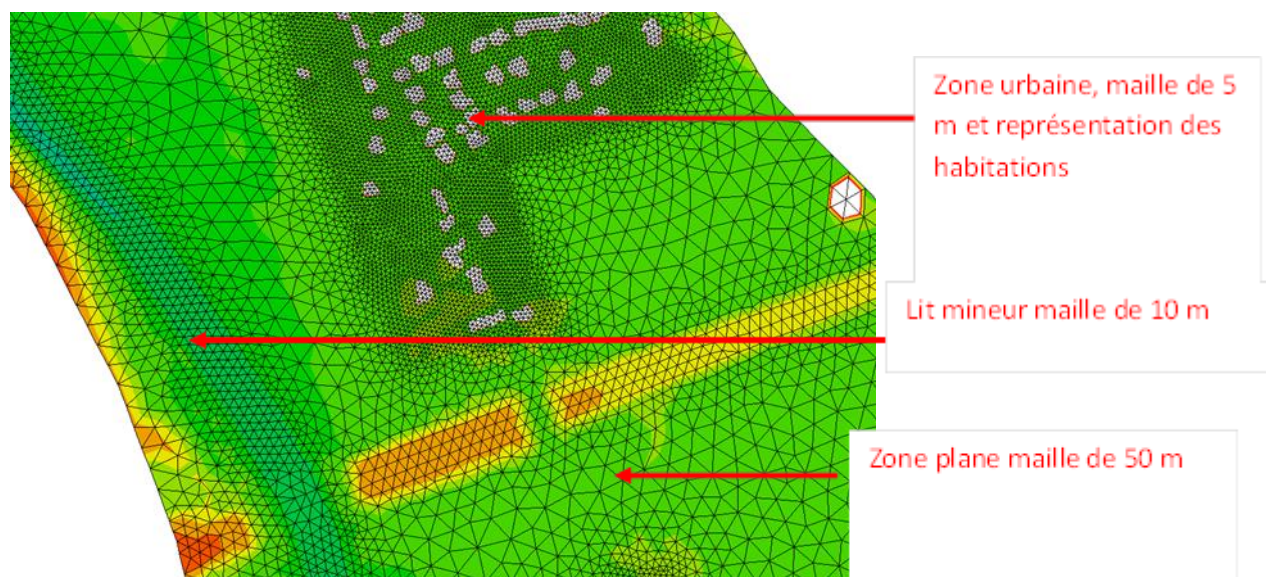


Figure 1 : Exemple de maillage : le lit mineur est raffiné, le lit majeur naturel est à mailles plus lâches et les environs des habitations est très raffiné.

En conclusion, le modèle 2D prendra en compte :

- les lits mineurs des cours d'eau sur le domaine d'étude ;
- les digues ;
- les ouvrages hydrauliques influençant les écoulements ;
- l'occupation du sol (via les coefficients de rugosité) ;
- les adaptations nécessaires du maillage pour prendre en compte les aménagements futurs connus ;
- de manière plus générale, l'ensemble de la zone inondable.

Les points suivants seront soumis à validation du Maître d'Ouvrage :

- Le périmètre modélisé ;
- La résolution du modèle (c'est-à-dire la taille des mailles).

Il est difficile de donner a priori les tailles des mailles. Quelques ordres de grandeurs peuvent toutefois être donnés :

- Dans les zones urbanisées, la finesse du maillage devra descendre au niveau de la rue et des habitations (soit 5 à 10 m) ;
- Le système hydraulique (canaux, fossés, biefs...) sera également intégré, la taille de maille sera de 5 à 10 m avec localement 1 à 2 m.

3.2.4 Points particuliers du maillage

Intégration des digues

L'ensemble des digues doit être représenté dans le modèle. Le maillage sera raffiné à leur proximité : dans le sens transversal, les digues sont décrites par quatre nœuds (2 en crête et 2 en pied), dans le sens longitudinal, un pas d'espace d'environ 5 m apparaît adapté.

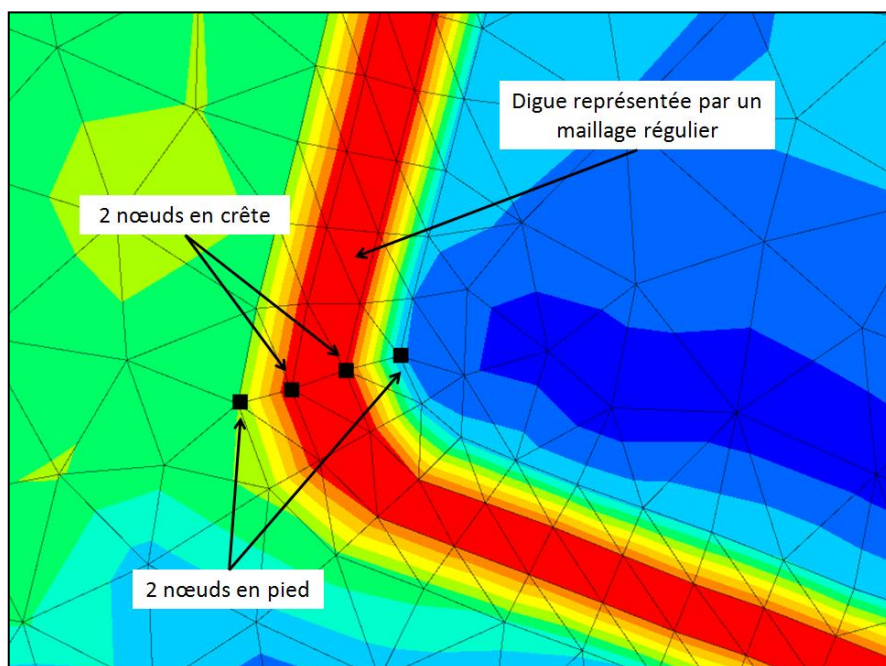


Figure 2 : Parti retenu pour le maillage des digues.

Cette méthode de maillage est systématiquement utilisée dans nos modèles et elle a montré sa robustesse.

Prise en compte du bâti

La prise en compte du bâti est indispensable. Aujourd'hui, il n'existe pas véritablement de consensus quant à la manière de modéliser les zones bâties, chaque situation étant traitée au cas par cas. On peut distinguer 3 approches.

La **première approche** consiste à imposer un coefficient de frottement global à la zone urbaine considérée : cette approche simpliste est tout à fait suffisante lorsque la zone urbaine ne participe pas (ou marginalement) à la propagation des écoulements. Dans le cas présent, cette approche n'est pas applicable.

La **seconde approche** consiste à représenter explicitement le bâti dans le maillage : les bâtiments constituent des obstacles physiques aux écoulements qui se retrouvent concentrés dans les rues. D'un point de vue pratique, on peut représenter les bâtiments en leur appliquant une cote de fond très haute ou bien en faisant des « trous » dans le maillage. Ces deux méthodes sont sensiblement équivalentes.

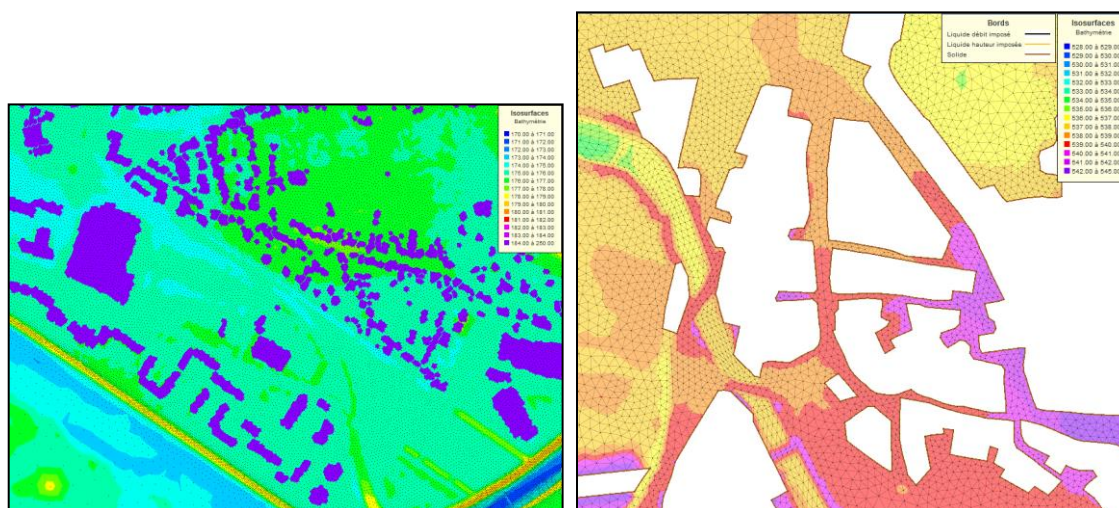


Figure 3 : à gauche, le bâti est représenté par une cote de fond très élevée, à droite, il est exclu du maillage.

La **troisième approche** est une variante des deux premières : elle consiste à différencier le coefficient de frottement dans les rues et sur l'emprise des bâtiments. Un coefficient de frottement très fort sur l'emprise du bâti permet de concentrer les écoulements dans les rues tout en assurant la mise en eau du bâtiment (cf. Figure 4). Cette approche présente l'avantage de prendre en compte le volume d'eau stocké dans les bâtiments inondés.

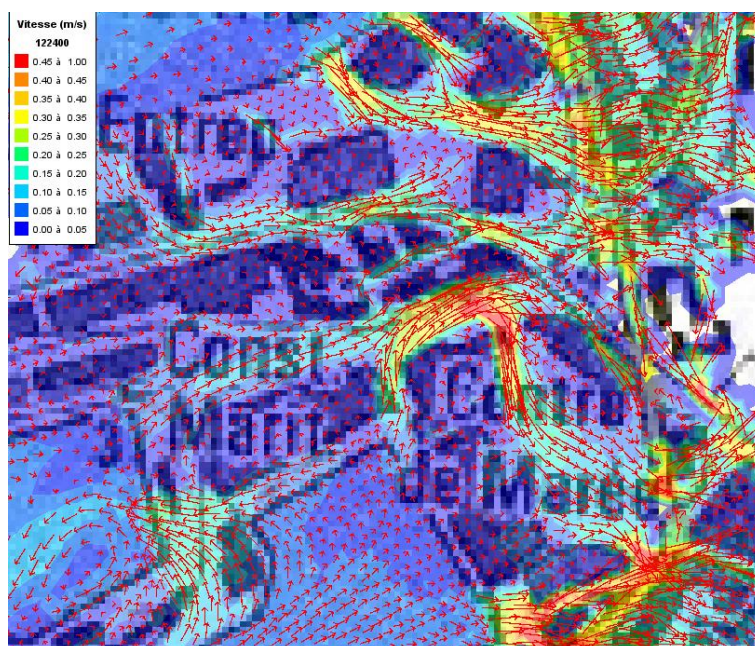


Figure 4 : Champ de vitesse sur le port des Sables d'Olonnes. Les écoulements sont bien concentrés entre les bâtiments qui sont toutefois inondés.

Nous proposons d'utiliser cette dernière approche. Toutefois si le nombre de maille du modèle conduisait à une impossibilité de faire converger le calcul ou à des temps de calcul des simulations trop importants, la première devra être utilisée.

Prise en compte des ouvrages hydrauliques

La prise en compte des singularités hydrauliques comme les ponts en charge, les organes mobiles (clapets, vannes) peut être délicate sous modèle 2D TELEMAC.

Concernant les ouvrages de franchissement importants, type ponts non mis en charge, ils peuvent être représentés par leurs remblais, leurs culées et leurs piles, sans leur tablier. Cela n'affecte que très marginalement le résultat obtenu sur les cotes maximales atteintes en crue.

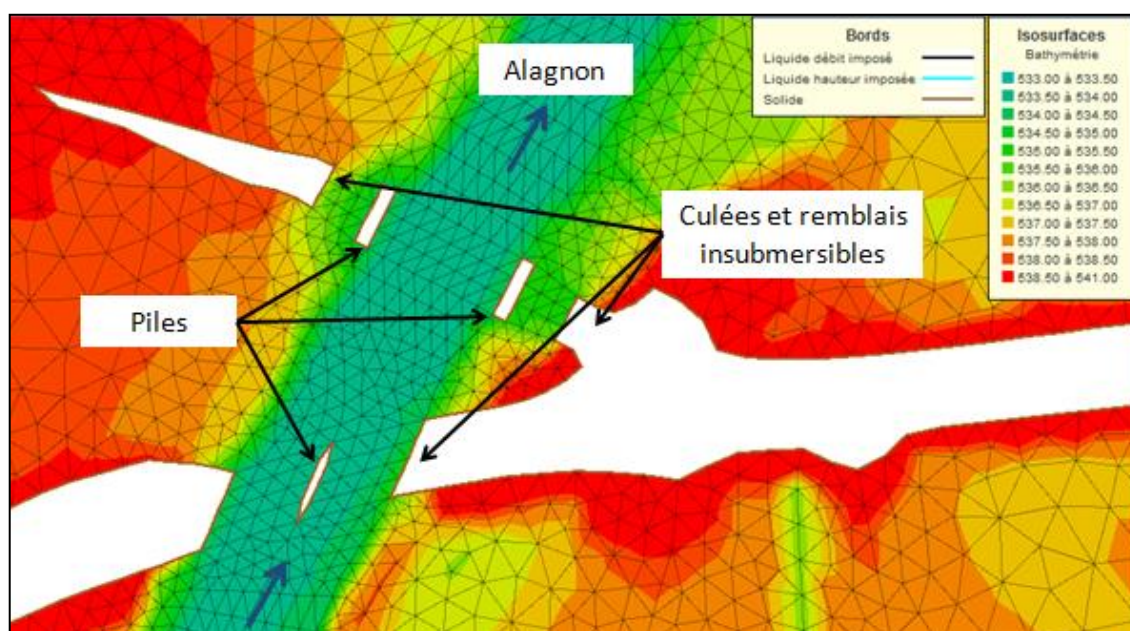


Figure 5 : Ponts non mis en charge et remblais d'accès insubmersibles : seules les piles, les culées et les remblais sont représentés dans le maillage (en l'occurrence, dans ce cas particulier, ils sont tout simplement retirés du maillage).

Pour les passages en charge, des ouvrages de type orifice permettent de représenter les pertes de charges linéaires en même temps que les débordements surfaciques sont calculés par les équations de Saint-Venant. D'un point de vue théorique, les conditions d'écoulements n'entrent pas dans les hypothèses d'application des équations de Barré de Saint-Venant. Toutefois, dans la pratique, nous avons pu constater sur de nombreux modèles que cette approche est très satisfaisante moyennant un ajustement des coefficients de frottement sur le remblai modélisé : ces coefficients sont « recalés » par analogie avec les formules de déversoir larges de forme trapézoïdales.

La figure suivante présente un exemple d'ouvrage de type « siphon » permettant la modélisation d'un ouvrage de franchissement sous remblai (Etude de dangers des digues de classe A de la Loire Moyenne – Modélisation hydraulique bidimensionnelle du Val d'Authion – ISL, 2013).

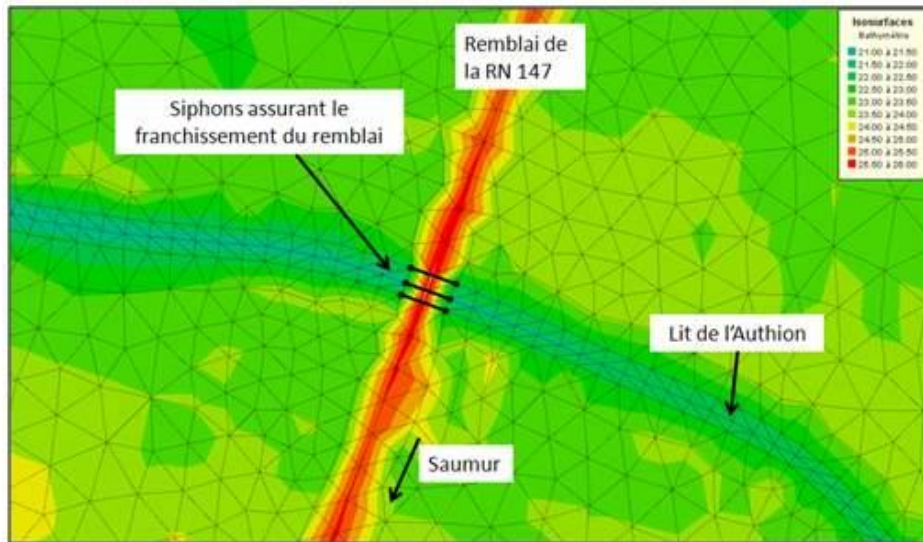


Figure 6 : Insertion d’ouvrages de type « siphon » dans le modèle hydraulique (ISL, 2013)

Ce type de représentation des ouvrages peut ne pas être satisfaisant pour modéliser les pertes de charge. Nous proposons donc de les vérifier en construisant des modèles locaux 1D avec le logiciel HEC-Ras de l’US Army Corps of Engineers.

Pour les seuils fixes, TELEMAT 2D prévoit des singularités obéissant à des lois classiques de seuils. Le calage des paramètres de seuils pourra être affiné grâce à une approche semi-empirique via les formulations de Bradley, reprises dans la notice sur les déversoirs (CETMEF, février 2005).

$h_1/C < 0,1$ Seuil à crête épaisse et longue Un ressaut se crée au-dessus du déversoir	$0,1 < h_1/C < 0,4$ Seuil à crête épaisse La nappe s’abaisse jusqu’à obtenir un parallélisme avec la crête du déversoir et passe par une hauteur critique, notée h_c .	$0,4 < h_1/C < 1,5$ Seuil à crête « pas très épaisse » La nappe s’incline de l’amont vers l’aval sur toute l’épaisseur du déversoir. L’écoulement passe par une hauteur critique difficilement identifiable.
D’après Muralidhar et Woodburn cité par Williams Mahonri Lee dans son ouvrage « Calibration of Long Crested Weir Discharge Coefficient », Mai 1993.		

Pour les organes mobiles, des modifications de géométrie en cours de calcul sont possibles : les consignes de gestion permettront de définir les évolutions de géométrie des ouvertures hydrauliques aux seuils et vannages associés aux écluses. **ISL développe pour cela ses propres « sous-programmes » (sous-programme de TELEMAT en langage fortran, permettant d’adapter les équations résolues).**

3.2.5 Bathymétrie et topographie

Les données bathymétriques et topographiques sont utilisées en affectant à chaque nœud de calcul (sommets d’une maille triangle) une valeur de cote de terrain.

Les données suivantes seront utilisées successivement :

- MNT Lidar pour l'ensemble du domaine maillé ;
- bathymétrie pour les zones de lit mineur ;
- levés au sol pour la géométrie des ouvrages.

L'application Fudaa-Prepro développée par le CETMEF permet d'appliquer les cotes de fond à chaque nœud à partir de bases de données SIG.

Ainsi l'ensemble des obstacles naturels et artificiels sont représentés, comme sur la figure suivante où les digues de premier rang (en rouge), les digues de second rang et les voiries en remblais (jaune-orangé) apparaissent nettement.

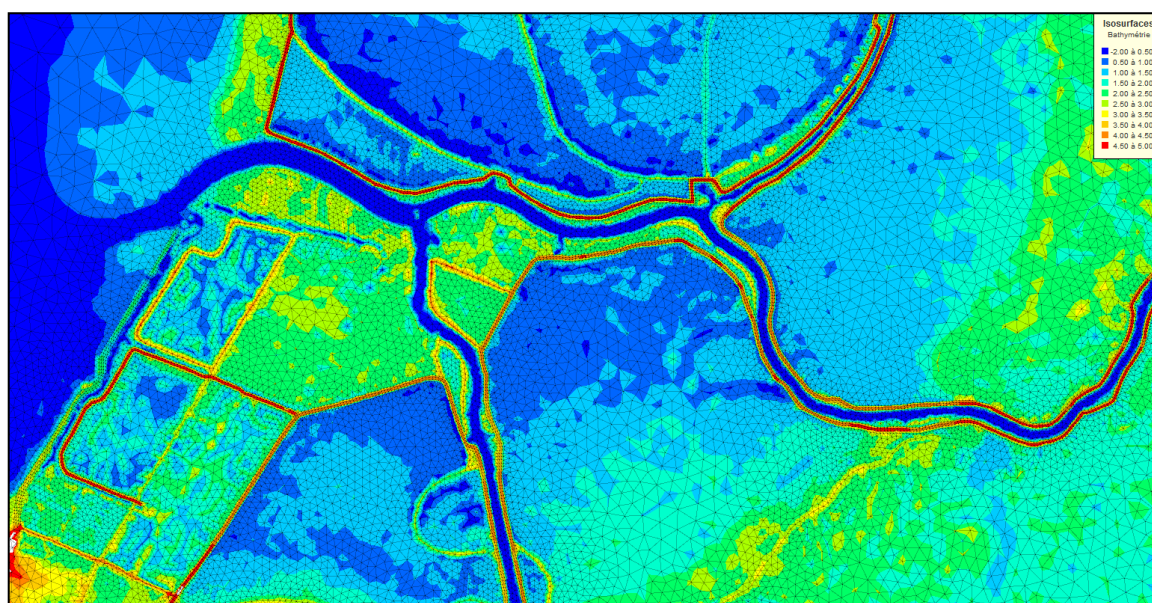


Figure 7 : Mise en évidence des éléments structurants au débouché de l'étier de Sallertaine.

3.2.6 Coefficients de frottement

La loi de frottement retenue sera une loi de Strickler. Les coefficients seront définis pour chaque nœud du maillage.

Le zonage des coefficients se fera en fonction de l'occupation des sols. Le choix des coefficients initiaux à retenir pour chaque classe d'occupation des sols se fera sur notre expérience de ce type de modèles. Ces coefficients de Strickler feront l'objet d'un calage sur une crue réelle, puis d'une validation sur une 2nd crue. Le calage est abordé dans le paragraphe 3.3.

A titre d'exemple, la figure suivante présente les coefficients de Strickler définis dans le cadre de l'élaboration du PPRI de Saint-Jean-Pied-de-Port, réalisé par ISL en 2010-2011.

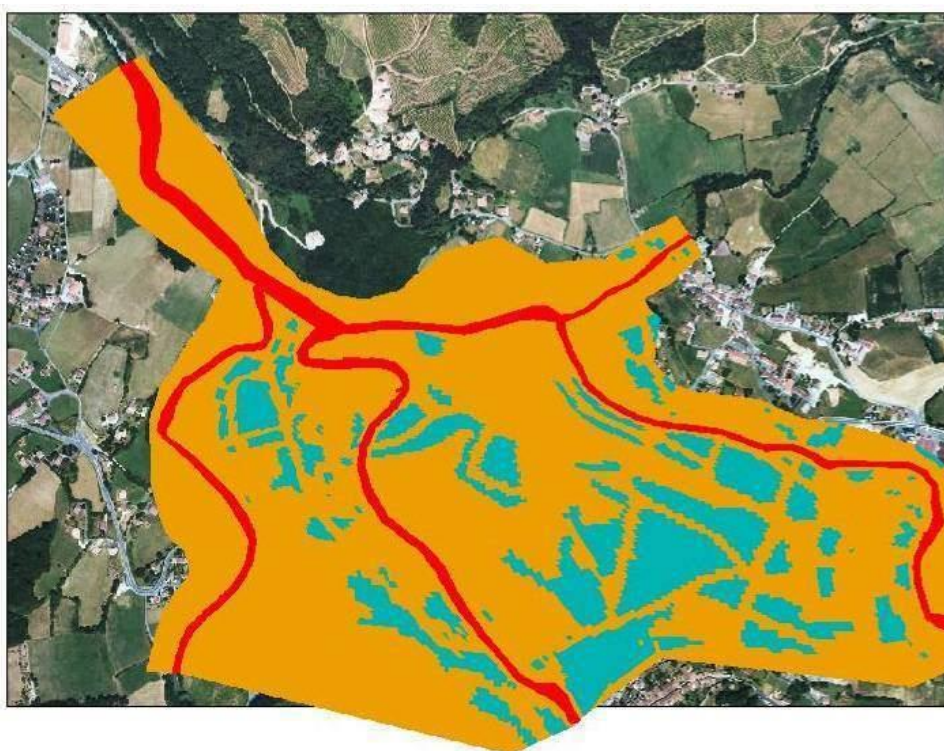


Figure 8 : Répartition du coefficient de Strickler, en rouge : lit mineur, en orange : lit majeur, en bleu : lit majeur avec zone urbaine (PPRI de Saint-Jean-Pied-de-Port, ISL 2010-2011)

3.3 Calage du modèle hydraulique 2D

Le calage des modèles hydrauliques sera réalisé en adaptant les coefficients de Strickler.

Suite à l'analyse réalisée dans le rapport de Phase 1 « Livrable 4 – Présentation du bassin versant », nous proposons de caler le modèle en lit mineur sur une crue récente, décembre 2012 par exemple, et de le caler et valider ensuite en lit majeur sur une crue hivernale de type 1999 ainsi que sur les crues orageuses de 2002 et 2005 respectivement sur la Clarence et sur la Nave.

Le tableau de l'ANNEXE 3 présente les informations disponibles et notamment les hauteurs d'eau estimées sur les photos des repères de crue.

Les repères de crue disponibles pour ces différentes crues sont illustrés en ANNEXE 1 .

Le tableau et la cartographie en ANNEXE 1 ne font pas figurer la localisation des photos prises par la DREAL lors de l'évènement de 2012. Celles-ci seront néanmoins utilisées. La série de photos ci-dessous ont été prises au croisement de l'Avenue Corbier et de la rue de Pressy lors de la crue de décembre 2012 et seront exploitées pour caler le coefficient de Strickler dans lit mineur.



Figure 9 : photo prise le 30/12/2012 à 9h40



Figure 10 : photo prise le 30/12/2012 à 10h17



Figure 11 : photo prise le 30/12/2012 à 11h29

Pour cette même crue, les niveaux enregistrés aux stations hydrographiques seront exploités pour caler le coefficient de Strickler dans le lit mineur.

Pour ces crues nous disposons des hydrogrammes aux stations hydrométriques (cf. figures ci-dessous). La condition amont du modèle sera située bien en amont de la station, les hydrogrammes de la condition amont seront donc reconstitués à l'aide du modèle hydrologique GR4 au pas de temps horaire ou journalier suivant la crue simulée. Il sera ainsi possible d'injecter des hydrogrammes au niveau des différents affluents.

Les valeurs des coefficients de Strickler retenues seront proposées au Maître d'Ouvrage pour validation.

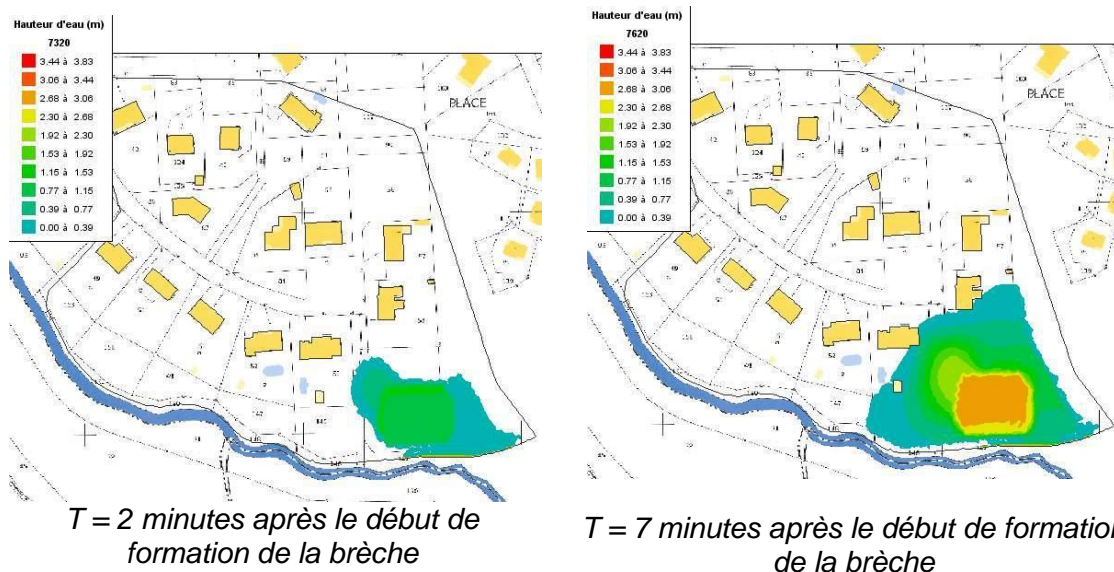
3.4 Modélisation des ruptures de digues (modèle 2D)

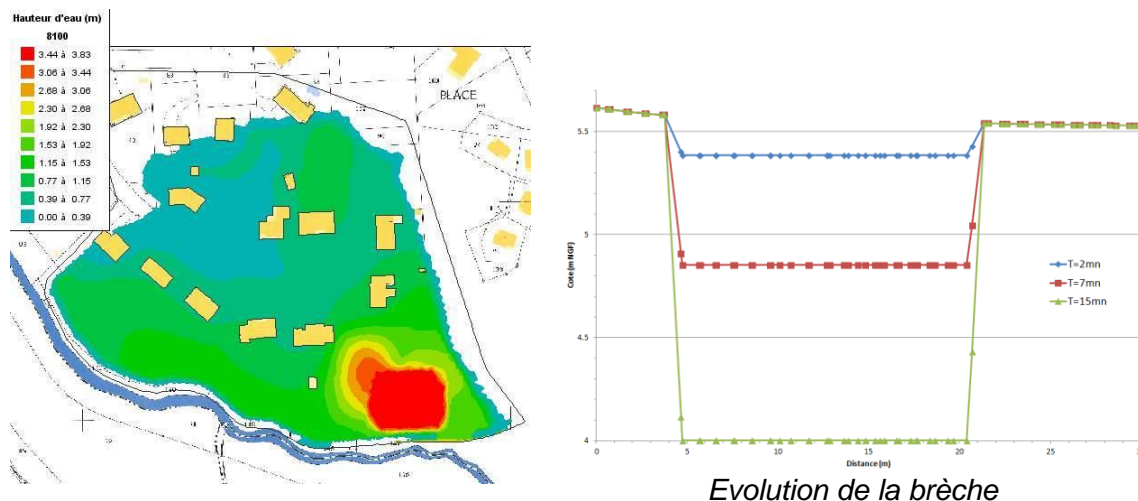
Le paragraphe suivant présente la méthodologie générale pour la modélisation hydraulique des ruptures de digue.

La définition des scénarios de rupture se fera en étroite collaboration avec le Maître d'Ouvrage, en tenant compte des informations historiques recueillies dans les études antérieures (ruptures passées, digues en mauvais état...).

Pour la modélisation des ruptures, la version V6P2 du logiciel TELEMAC-2D propose un module permettant de simuler des brèches progressives ou instantanées. La formation de la brèche sera intégrée directement au modèle TELEMAC de l'état actuel en régime transitoire, avec les paramètres de début de formation de la brèche, de durée de formation de la brèche et de dimension de la brèche.

La modélisation des brèches intégrées au modèle hydraulique a déjà été expérimentée pour l'étude de dangers de la digue Eyherra à Urcuit pour l'Institution Adour (ISL, 2013). La figure suivante présente la propagation des hauteurs d'eau dans le cadre de la formation progressive d'une brèche sur la digue de protection du lotissement.





T = 15 minutes : la brèche est complètement formée

Figure 12 : Exemple de modélisation de la formation de la brèche pour un scénario de rupture : Etude de dangers des digues du lotissement Eyherra à Urcuit – ISL 2013

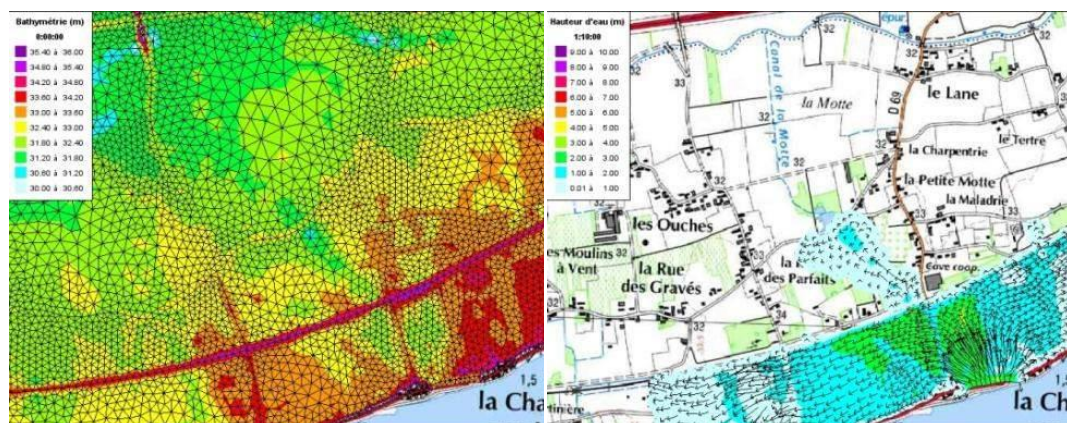


Figure 13 : Exemple de modèle TELEMAC2D de rupture de digue réalisé par ISL dans le cadre de la modélisation hydraulique bidimensionnelle du Val d'Authion

Endiguements et brèches historiques

La carte en ANNEXE 4 représente la localisation des brèches historiques observées sur le bassin versant ainsi que les tronçons de cours d'eau endigués.

3.5 Prise en compte des embâcles

Le bassin versant de la Clarence est à dominante agricole avec quelques forêts en tête de bassin versant. La présence d'embâcles sur les premiers ouvrages n'est donc pas à écarter. Les enquêtes ont confirmées la présence d'embâcles sur les ouvrages pendant les crues historiques. Ces embâcles peuvent être naturels (arbres, végétation...) ou anthropique (voiture, débris...). Une voiture a déjà obturé en parti le pont de la D86 à Pernes bloquant l'écoulement en 1999.

La figure ci-dessous illustre un arbre bloqué dans le seuil vanné en aval de Pernes en 2012.



Figure 14 : Arbre pris dans la vanne au moulin de la Ferté en 2012

L'exploitation de laisses de crues influencées par des embâcles permettra notamment de caler les modèles hydrauliques en tenant compte de ces phénomènes. En revanche, nous attirons l'attention du Maître d'Ouvrage sur le fait que la quantification théorique de l'effet d'embâcles sur une crue de projet (ici, la crue de référence) est très difficile.

Des tests de sensibilité sur l'obturation partielle des ouvrages pourront être réalisés pour vérifier l'influence de ces phénomènes sur les cotes d'eau atteintes et l'emprise de l'inondation.

A minima, des tests de sensibilités seront effectués sur les sites ayant fait l'objet d'embâcles par le passé : le pont de la D86 à Pernes, ainsi que le vannage du moulin de la Ferté.

3.6 Traitement SIG des résultats du modèle

L'aléa inondation sera qualifié sur la base de la modélisation hydraulique pour l'événement de référence retenu en concertation avec le COTEC.

Un modèle numérique d'eau sera calculé sous SIG. La taille du pixel de cette couche de type raster sera égale à la taille de la plus petite maille du modèle hydraulique.

Un modèle numérique de hauteur d'eau sera ensuite calculé en appliquant sous SIG l'opération suivante :

modèle numérique des hauteurs d'eau = modèle numérique d'eau - modèle numérique de terrain

Les couches raster ainsi obtenues seront vectorisées. Un nettoyage manuel de ces couches SIG de hauteur d'eau et de vitesse d'écoulement sera effectué afin de supprimer les polygones issus du calcul SIG mais n'ayant pas de sens physique.

3.7 Cartographie de l'aléa débordement

L'aléa sera déterminé par croisement de la carte des hauteurs d'eau qui pourra comporter trois polygones (0 à 50 cm, 50 cm à 1 m, plus d'1 m) et des vitesses selon la grille suivante (la grille finale sera établie en concertation avec le comité technique) :

Hauteur \ Vitesse	Vitesse		
	Faible (stockage) $V < 0,5$ m/s	moyenne (écoulement) $0,5 < V < 1$ m/s	forte (grand écoulement) $V > 1$ m/s
$H < 0,5$ m	Faible	moyen	Fort
$0,5 \text{ m} < H < 1$ m	moyen	moyen	Fort
$H > 1$ m	fort	fort	fort à très fort

Tableau 7 : classes d'aléa

Quatre classes d'aléa sont définies, et reportées sur la carte d'aléas :

- Aléa faible : hauteur d'eau inférieure à 0,5 m et vitesse d'écoulement inférieure à 0,5 m/s.
- Aléa moyen : hauteur d'eau comprise entre 0,5 m et 1 m et vitesse d'écoulement inférieure à 0,5 m/s ou, hauteur d'eau inférieure à 0,50 m et vitesse comprise entre 0,5 et 1,0 m/s.
- Aléa fort : hauteur d'eau supérieure à 1 m et vitesse d'écoulement inférieure à 1,0 m/s ou, hauteur d'eau inférieure à 1 m et vitesse d'écoulement supérieure à 1,0 m/s.
- Aléa fort à très fort : hauteur d'eau supérieure à 1 m et vitesse d'écoulement supérieure à 1,0 m/s.

Les cartographies d'aléa feront apparaître les cotes d'eau telles que présentées en ANNEXE 5 ou en faisant apparaître des isocotes. Ces isocotes d'eau seront portées sur les cartes de hauteurs d'eau et d'aléas avec un pas moyen en hauteur d'eau adapté aux niveaux rencontrés.

Le calcul des isocotes est fait automatiquement par SIG. Une polyligne est alors établie pour une cote donnée.

Si certaines zones font l'objet de critiques, nous réaliserons une visite de terrain de vérification avec les cartes des hauteurs d'eau.

Cette contre-visite permettra de valider les cartes et corriger les éventuelles incohérences.

L'annexe ANNEXE 5 illustre des exemples de cartographies d'aléa débordement de cours d'eau.

3.8 Résumé

L'existence d'une topographie bien fournie nous permet de bien caractériser la hauteur d'eau atteinte à partir des résultats d'une modélisation hydraulique. Cette modélisation représentera les écoulements dans les deux dimensions transversale et longitudinale et permettra d'apprécier les vitesses d'écoulement maximales. Le logiciel choisi, Telemac 2D, est très couramment utilisé dans le cadre de telles analyses.

La hauteur d'eau et les vitesses pour un évènement centennal nous permettent de caractériser ce que l'on appelle l'aléa hydraulique. La transcription cartographique est facilitée par l'existence du levé topographique Lidar qui offre une très forte densité de points (un point par mètre carré).

4 ALEA RUISSELLEMENT

4.1 Préambule

Des cartographies présentant les principaux axes de ruissellement ainsi que les zones inondées par ruissellement lors des évènements historiques ont été réalisées en phase 1 à partir :

- de l'analyse des témoignages recueillis en enquête,
- des observations de terrain (repérage des axes d'écoulements, des points bas, des ouvrages,...),

Lors de la phase de caractérisation de l'aléa, le territoire exposé au risque de ruissellement sera découpé, sur la base de l'exploitation des pentes du terrain naturel et de l'occupation du sol, en trois grandes zones d'aléa ruissellement :

- la zone de production de l'aléa en amont des axes de ruissellement et dans les zones à forte pente,
- la zone de transition dans les axes de ruissellement et les talwegs,
- la zone d'accumulation dans les parties à pentes faibles en aval des axes de ruissellement.

4.2 Zones de Production

Une première analyse topographique couplé aux axes de ruissellement permet de définir une emprise des zones de production potentielle des ruissellements (cf. ANNEXE 6). Sur le bassin versant, ces zones de production sont situées en amont de l'altitude 25 m NGF. En dessous de cette altitude, nous sommes situés dans la plaine et les watergangs.

Sur cette emprise, des zones de production initiales seront calculées sous SIG à partir des pentes et de l'occupation du sol. Les pentes seront calculées à partir du modèle numérique de terrain (cf. exemple Figure 15).

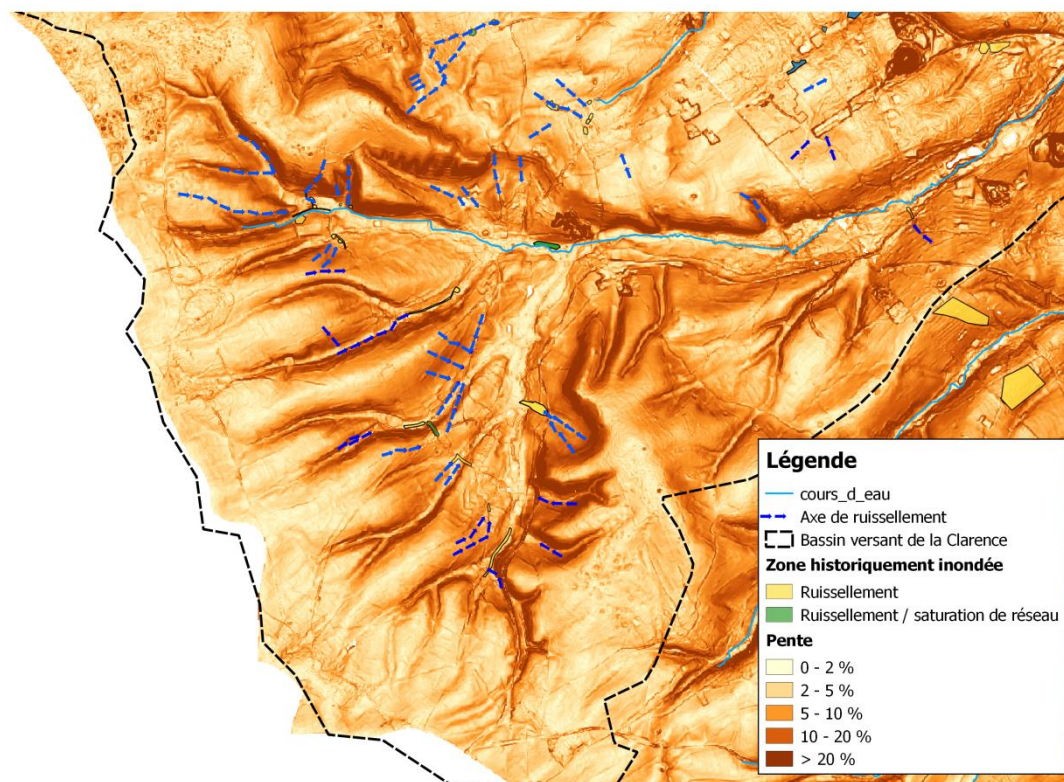


Figure 15 : modèle numérique de pentes et axes de ruissellement sur l’amont du bassin versant de la Clarence

Les critères suivants, disponibles dans la littérature (Le Bissonais / King, Derancourt, Bolo), seront utilisés pour définir les zones de production :

		Occupation du sol			
		Forêts	Prairies	Zones urbanisées	Cultures
Pente	< 3 %	P0	P0	P1	P1
	3 – 5 %	PPA	PPA	P2	P2
	> 5 %	PPA	PPA	P2	P3

Tableau 8 : Zones de production d’aléa obtenues par croisement de l’occupation du sol et de la pente

Remarque : la littérature indique aussi que pour des pentes entre 0 et 1%, le ruissellement a lieu sans érosion des sols.

Les zones P0 correspondent aux zones de production d’aléas très faible de ruissellement sur versant ; les P1 correspondent aux zones de production de l’aléa de ruissellement diffus de faible ampleur. Ces zones n’ayant pas lieu d’être réglementées, elles ne seront pas cartographiées.

Les zones de production de l'aléa cartographiées seront donc les suivantes :

Zones de production de l'aléa		Indice
<p>Zone active de production de l'aléa</p> <p><i>Ces zones, pour l'essentiel, étaient à l'origine des zones de productions très faibles de l'aléa (P0), dont les conditions d'occupation et d'exploitation des sols par l'homme les ont rendu plus vulnérables aux phénomènes de ruissellements et d'érosion, aggravant à des degrés divers les aléas hydrauliques sur les pieds de versants et dans le fond des vallées.</i></p>	<p>Écoulement d'eau plus ou moins boueuse sur les versants.</p> <p><i>Exemples : zones agricoles sur pentes moyennes, zones urbaines imperméabilisées, zones agricoles sur fortes pentes.</i></p>	<p>P2 et P3</p>
<p>Zones de production potentielle d'aléa</p>	<p>Zones actuellement classées en zone de production d'aléas très faible de ruissellement sur versant ou ruissellements diffus de faible ampleur, susceptibles de générer du ruissellement (évolution en P2 ou P3) si un changement d'occupation du sol a lieu (extension du vignoble, défrichement, projet d'urbanisation, etc.)</p>	<p>PPA</p>

Tableau 9 : Grille de production d'aléa ruissellement/ravinement

Une analyse des zones de production préliminaire ainsi obtenues couplées aux axes de ruissellement et talwegs permettra d'écarter les zones qui n'ont pas lieu d'être :

- zones en aval des axes de ruissellement ;
- zone en lit majeur de cours d'eau.

Par ailleurs, les zones qui sont en zones de transition ou en zone d'accumulation (cf. §4.3) seront retirées des zones de production.

4.3 Caractérisation de l'aléa sur les axes de transition et les zones d'accumulation

La caractérisation de l'aléa ruissellement sera réalisée à l'aide d'un modèle TELEMAC 2D étendu aux axes de transition ainsi qu'aux zones d'accumulation des ruissellements. Ce modèle permettra ainsi de déterminer les vitesses et hauteurs d'écoulement en tous points du secteur d'étude concerné par le ruissellement dans la limite d'une hauteur d'eau significative.

4.3.1 Emprise du modèle hydraulique

Un modèle hydraulique 2D (TELEMAC 2D) spécifique à l'aléa ruissellement sera construit. Il permettra de calculer les hauteurs d'eau et vitesses sur les talwegs naturels et axe de ruissellement sur voiries où des écoulements significatifs sont constatés.

Le modèle 2D établi s'étendra sur l'intégralité du bassin versant. Cette emprise est différente du modèle pour l'aléa débordement, car pour optimiser les durées de calcul, il est impératif d'adapter la taille des mailles à l'étendue du territoire représenté.

Toutes les informations recueillies sont intégrées au système SIG. Elles sont croisées aux éléments linéaires tels que les routes et talwegs, favorisant les ruissellements.

Cette synthèse cartographique de synthèse du ruissellement permettra de définir les zones du modèle hydraulique 2D sur lesquelles le maillage sera affiné pour le calcul de la caractérisation de l'aléa ruissellement.

4.3.2 Injection dans le modèle hydraulique des hydrogrammes issus du modèle hydrologique

Nous reprendrons le découpage en sous bassins versants élémentaires du modèle hydrologique pour l'adapter à la problématique du ruissellement. Ceux-ci auront été dessinés en fonction des axes préférentiels d'écoulement (théoriques ou observés) définis ainsi que de leur position par rapport aux zones à enjeux. Les caractéristiques de ces bassins (limites, chemin hydraulique, pente...) seront rassemblées sous le SIG.

Les hydrogrammes issus du modèle hydrologique pourront ainsi être injectés directement dans le modèle hydraulique en amont des axes de transition et des zones d'accumulation où l'aléa doit être caractérisé et où la hauteur d'eau prévisible est significative. En effet, les secteurs où les hauteurs d'eau attendues sont très faibles seront très mal représentés par la modélisation et il sera impossible de distinguer ce qui relève de l'incertitude liée à la modélisation (quelques centimètres) de ce qui représente un ruissellement réel.

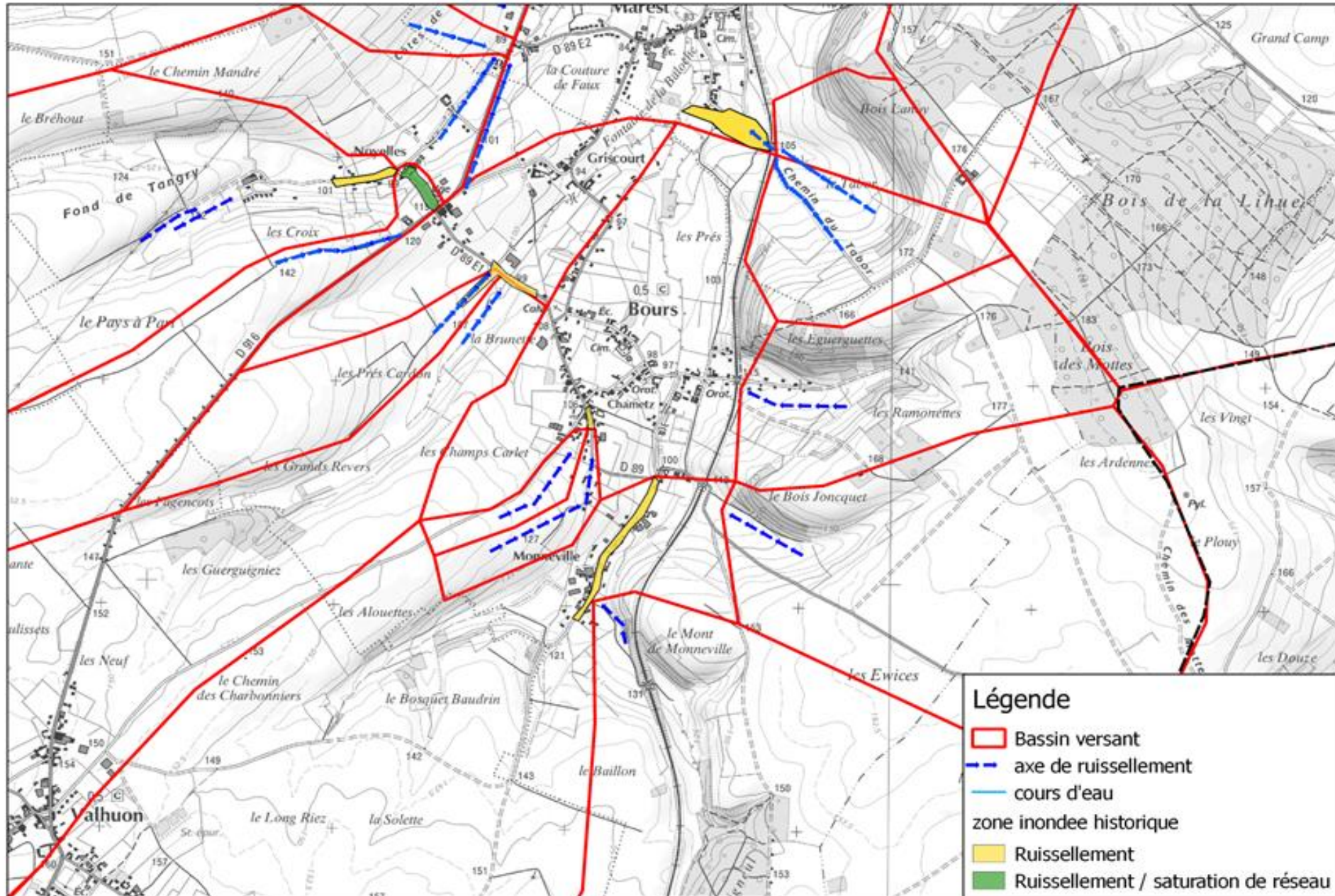


Figure 16 : extrait du découpage du bassin versant de la Clarence. L'hydrogramme calculé pour chacun des sous bassins versant par le modèle hydrologique sera injecté en amont de l'axe de ruissellement

4.4 Cartographie de l'aléa ruissellement

Le guide de PPR de ruissellement propose deux tableaux : l'un pour les écoulements en zone urbaine (cf. Tableau 10), l'autre pour les écoulements en zone rurale ou périurbaine (cf. Tableau 11).

	Vitesse			
	Faible	moyenne	forte	très forte
	< 0,2	0,2 < V < 0,5	0,5 < V < 1,00	V > 1,00
Hauteur < 0,2	faible	faible	moyen	fort
Hauteur comprise entre 0,2 et 0,5m	moyen	moyen	moyen	fort
Hauteur comprise entre 0,5 et 1,0m	moyen	moyen	moyen	fort
Hauteur > 1m	fort	fort	fort	très fort

Tableau 10 : intensité de l'aléa ruissellement en zone urbaine

	Vitesse		
	Faible	moyenne	forte
	< 0,2	0,2 < V < 0,5	V > 0,5
Hauteur < 0,5	faible	moyen	fort
Hauteur comprise entre 0,5 et 1,0m	moyen	moyen	fort
Hauteur > 1m	fort	fort	très fort

Tableau 11 : intensité de l'aléa ruissellement en zone rurale ou périurbaine

La cartographie de l'aléa fera également apparaître les axes de ruissellement sur les talwegs et les voiries.

5 METHODE DE DETERMINATION DE L'ALEA REMONTEE DE NAPPE

« Les inondations par remontée de nappe se produisent lorsque le niveau d'une nappe phréatique libre dépasse le niveau topographique des terrains qui la renferme » (*extrait de 'Directive Inondation – Cartographie – Mission n°6 « Remontées de nappes »*).

Dans notre zone d'étude, nous pouvons ajouter qu'en limite de son domaine de captivité, la nappe de la craie peut, par artésianisme, participer à l'alimentation d'une inondation.

Au regard des données acquises lors de la phase 1 « connaissance du territoire et des événements historiques », la méthodologie proposée pour caractériser l'aléa remontée de nappe consiste à enchaîner deux étapes :

1°) établissement d'une cartographie de zones potentiellement affectées de remontée de nappe sur la base de l'exploitation des cartes piézométriques ;

2°) affinement de la définition des zones sensibles sur la base de données historiques (témoignages) et de facteurs hydrogéomorphologiques.

5.1 Etape 1 : exploitation des cartes piézométriques

5.1.1 Méthodologie

Dans cette première étape, il s'agit de confronter la carte piézométrique des plus hautes eaux connues ou mesurées avec la topographie aussi fine que possible du secteur étudié. Les secteurs où la cote piézométrique est supérieure à la cote topographique sont affectés d'un phénomène de remontée de nappe. Si cette méthode apporte une représentation spatiale, elle n'illustre pas la durée du phénomène.

D'après la 'Directive Inondation – Cartographie – Mission n°6 « Remontées de nappes »' du CETE Nord Picardie, un aléa extrême est considéré « d'un temps de retour $\geq 1\ 000$ ans et/ou comme la situation la plus défavorable imaginable dans les conditions actuelles de connaissances des phénomènes ». Toutefois, compte tenu de la faible durée des chroniques disponibles, la détermination d'une période de retour ou de fréquence d'événement significative apparaît hypothétique. La cartographie de l'aléa « extrême » s'établirait alors en appliquant les paramètres suivants :

- Cote terrain naturel abaissée de 2,5 m afin de tenir compte de l'existence d'infrastructures enterrées (sous-sol, passage sous voirie...)
- La cote d'une piézométrie connue ou construite de moyennes eaux est augmentée d'un demi battement annuel de la nappe afin de « simuler » une cote de plus hautes eaux connue de la nappe.

5.1.2 Application à la nappe libre des sables

La cartographie de l'aléa remontée de la nappe des sables s'appuie sur la piézométrie établie en phase 1 sur la base d'une interpolation mathématique réalisée à partir des niveaux d'eau des ouvrages de la BSS captant la nappe des sables ; la répartition temporelle et spatiale de ces derniers étant très hétérogène. Cette estimation représente néanmoins la meilleure connaissance du contexte hydrogéologique local.

Une donnée propre au secteur de Chocques a permis d'estimer le battement annuel de la nappe des sables. Il est d'environ 0.7 m à 0.8 m. Le battement de la nappe est donc très faible (comparativement à celui du réservoir crayeux) illustrant une circulation privilégiée de l'eau sur un plan horizontal plutôt que la remontée du niveau d'eau.

Les données Lidar permettent d'avoir une approche aussi fine que possible de la topographie. La décote de 2,5 m proposée dans la 'Directive Inondation – Cartographie – Mission n°6 « Remontées de nappes »' n'est pas appliquée ici.

La carte illustrant les résultats est présentée en Figure 17.

Globalement les remontées de nappe (placage bleu sur la carte) concernent principalement les points bas du secteur étudié, c'est-à-dire les vallées des principaux cours d'eau ou vallées sèches, ainsi que les zones de marais. Les excavations d'origine anthropique (gravières, bassins...) apparaissent logiquement sur la carte. Toutes les communes ayant référencées des remontées de nappe (Lapugnoy, Lespesses, Lillers, Chocques et Burbure) se situent dans les vallées qui constituent donc les zones de plus grandes vulnérabilités face aux phénomènes des remontées de nappe.

Cependant, dans ces secteurs, les phénomènes de remontée de nappe resteront *a priori* généralement limités par :

- Les faibles volumes d'eau disponibles du fait de la proximité avec la faille de Ruitz qui marque l'extension amont du réservoir.
- Le très faible battement de la nappe du fait de la bonne perméabilité des terrains sableux.

Deux communes situées à l'aval du bassin versant (Mont-Bernanchon, Robecq) font état de remontée de nappe. Cependant la nappe des sables étant captive à leur niveau (pas de dépassement du niveau topographique) et les terrains affleurant étant de nature argileuse (argile des Flandres), il semble plus probable que les remontées de nappe soient le fait d'une rapide saturation des horizons superficiels créant ainsi des nappes superficielles plus ou moins temporaires.

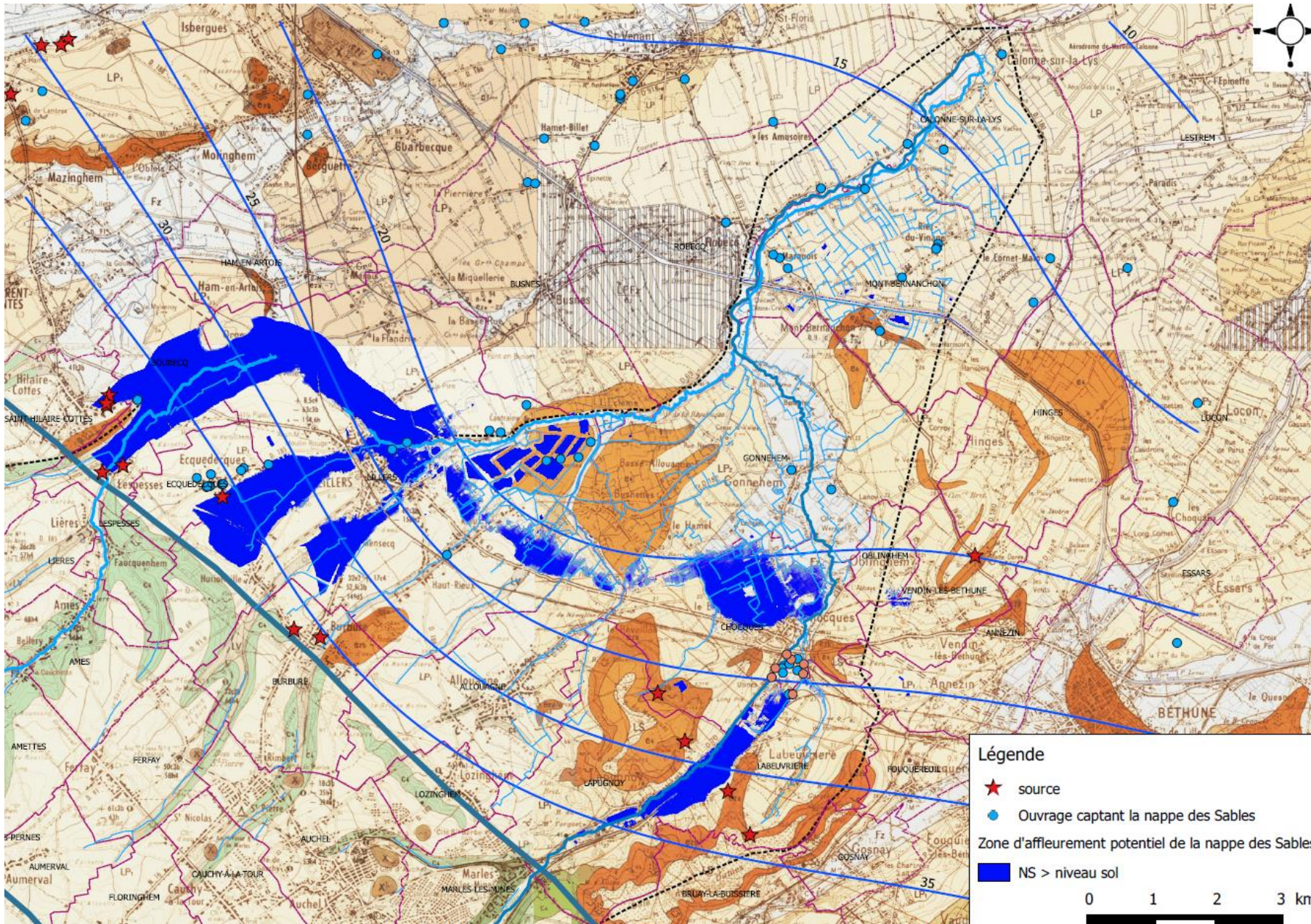


Figure 17 : Cartographie des zones à potentiel de remontée de la nappe des Sables d'après la piézométrie interpolée et le MNT

5.1.3 Application à la nappe libre de la craie

Le niveau des eaux souterraines de la nappe libre de la craie observées en 2001 (période de retour supérieur à 10 ans dans le bassin versant) constitue le niveau le plus haut des dix dernières années. La cartographie disponible (donnée BRGM) sera considérée comme le niveau piézométrique extrême.

A noter que cette cartographie, qui est la plus détaillée de toutes les cartographies disponibles sur la zone d'étude, a été réalisée à l'échelle de la région Nord-Pas de Calais (soit approximativement 1:100 000ème). Pour ne pas altérer la donnée, le niveau de détails maximum ne doit pas dépasser 1:50 000ème. Dans ces conditions il n'est pas possible de rendre compte des variations locales, comme celles observées au niveau de la carrière de Pernes par exemple.

Les données Lidar permettront d'avoir une approche aussi fine que possible de la topographie. La carte illustrant les résultats est présentée en Figure 18

D'après les résultats de cette cartographie, il apparaît que l'ensemble des vallées peuvent être sujettes à des remontées de nappe. Les zones les plus exposées, par leur étendue et leur hauteur de dépassement de la côte topographique (figurés rouge et crème) sont les vallées des hauts plateaux artois autour des localités des Pernes, Bours, Marest, Pressy et Sachin, dans le compartiment situé en amont de la faille de Pernes jouant un rôle de barrière hydraulique. Ces zones sont composées de vallées profondes qui contraignent l'écoulement souterrain et favorisent l'apparition de sources de débordement.

Lorsque la topographie est relativement peu prononcée, le gradient hydraulique de la nappe est faible favorisant les remontées du niveau piézométrique plutôt que son écoulement gravitaire vers son exutoire. Lorsque les fonds de vallées conservent une pente marquée, les débordements de nappe restent limités du fait d'une évacuation rapide du débordement. Des répercussions peuvent exister en aval.

Il semblerait que les remontées de nappe modélisées juste au Nord de la faille de Pernes ne soient pas représentatives de la réalité (aucune remontée de nappe recensée dans ce secteur lors des enquêtes de terrain) mais soient le fait d'approximations mathématiques réalisées lors de l'estimation de la surface piézométrique. Malheureusement aucun ouvrage souterrain présent dans cette zone ne permet de vérifier la hauteur d'eau.

Un peu plus bas dans la vallée de la Clarence, à proximité de la faille de Ruitz, les niveaux de remontées de nappe sont eux aussi élevés. Cependant aucune remontée de nappe n'a été recensée dans ces communes. Ceci pourrait être dû au fait que les quantités d'eau souterraines sont faibles (aire de recharge limitée au Sud par la faille de Pernes et à l'Est par la limite topographique) et que les terrains encaissants (Turonien supérieur) disposent d'une perméabilité élevée contribuant ainsi à une meilleure circulation de l'eau souterraine vers les exutoires.

En bordure de la faille de Ruitz, à Burbure, Lespesses et Lières, les débordements pourraient être corrélés avec l'artésianisme de la nappe.

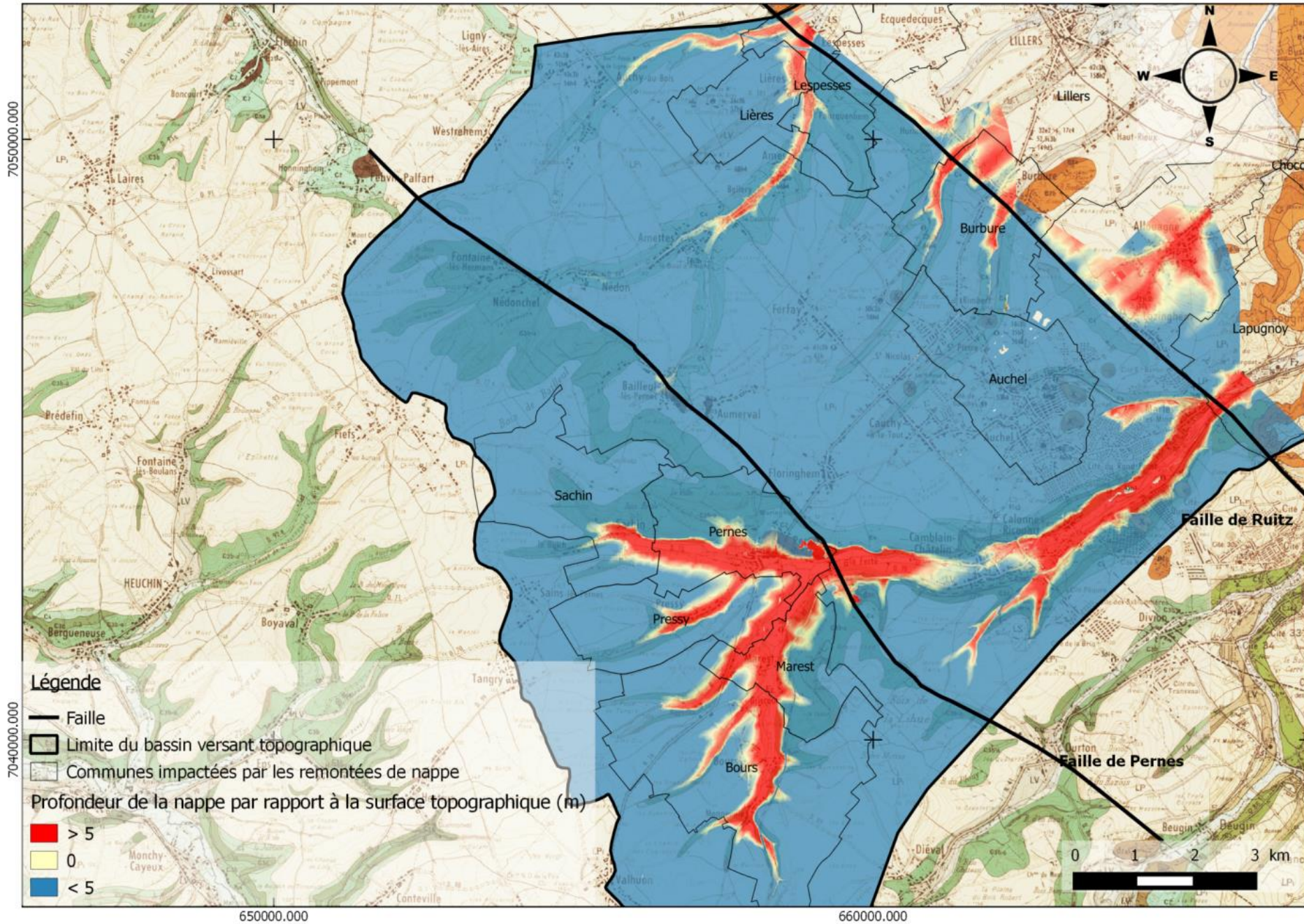


Figure 18 : Cartographie de la profondeur de la nappe de la craie par rapport à la surface topographique

5.1.4 Limites de la méthode au regard des données disponibles dans le bassin versant de la Clarence

Les limites de l'application de cette étape de la méthode proposée sur le territoire du bassin versant de la Clarence sont les suivantes :

➤ **nappe des Sables :**

- Carte piézométrique établie sur la base de données bibliographique (BSS) asynchrones, de répartition spatiale hétérogène,
- Carte établie à l'échelle 1/75 000,
- Connaissance de l'amplitude de la nappe limitée spatialement et temporellement.

➤ **nappe de la Craie :**

- Carte piézométrique de référence correspondant à une carte régionale établie à l'échelle 1/100 000, disposant de peu de points de mesure dans le bassin versant de la Clarence (<5) ;
- Piézomètres disposant de chroniques significatives implantés en amont des zones sensibles au phénomène.

Ainsi, du fait de la précision des différents paramètres, les profondeurs estimées en mètres ne doivent pas être considérées comme des cotes exactes de niveau de nappe. Il convient plutôt de considérer la définition d'enveloppes de sensibilité au risque remontée de nappe. A fortiori, une représentation à l'échelle cadastrale n'est pas envisageable.

Il apparaît également que cette approche ne permet pas d'évaluer des débits d'apport par les eaux souterraines. En outre, les hauteurs et durées de submersion seront fortement dépendants des conditions d'écoulement de surface et de leur capacité à évacuer le trop-plein de la nappe.

L'aléa éventuellement engendré par des remontées de nappes type nappes perchées n'apparaît ni quantifiable ni représentable. Il concerne par définition des entités localisées, de faible extension et de nature hétérogène dont la connaissance est quasi nulle. Il apparaît illusoire d'obtenir une représentation de l'aléa engendré par ce type de nappe.

5.2 Etape 2 : affinement de la définition des zones sensibles

5.2.1 Méthodologie

Afin de préciser les résultats obtenus à partir de l'exploitation des cartes piézométriques et de cerner plus précisément les secteurs sensibles, nous proposons d'établir une cartographie de synthèse qui permet de dessiner le contour de zones sensibles aux remontées de nappe en intégrant :

- « à dire d'expert », les résultats de l'analyse du contexte hydrogéologique dans le bassin versant de la Clarence, notamment le rôle hydraulique de barrière étanche joué par les failles, la présence de sources, zones humides, le passage d'un

- contexte de nappe libre à captive pour la nappe de la craie et propice à l'artésianisme ;
- les informations et témoignages recueillis sur le terrain.

Cette approche naturaliste et descriptive utilise une représentation plus ou moins ponctuelle du phénomène. Cela permet de cerner des secteurs sensibles en fonction de la densité des indices cartographiés ou décrits.

5.2.2 Résultats

La carte issue de cette analyse est présentée dans la Figure 19.

Sur cette carte, il est proposé de classer les remontées de nappes en trois catégories : sensibilité très élevée, élevée et moyenne. Le figuré rouge correspond à une sensibilité très élevée de la zone c'est-à-dire un dépassement du niveau topographique d'au moins un demi battement de la nappe considérée (soit environ 5 m pour la nappe de la craie et environ 0.5 m pour la nappe des sables). Le figuré crème correspond à une sensibilité élevée, c'est-à-dire une nappe dépassant la surface topographique de moins d'un demi battement. Et le figuré bleu représente une sensibilité moyenne c'est-à-dire un niveau piézométrique ne dépassant pas la surface topographique et profond d'au maximum un demi battement de nappe.

Sur l'ensemble des communes ayant recensées des remontées de nappe (14 communes), 11 communes se superposent à des zones sensibles aux remontées de nappe identifiées à partir de l'exploitation des cartes piézométriques. Ces communes sont essentiellement localisées dans les points bas topographiques.

Les trois communes qui ne se situent pas dans des zones sensibles sont (du Nord vers le Sud) : Mont-Bernanchon, Robecq, et Auchel.

Les communes de Mont-Bernanchon et Robecq sont situées proches de l'exutoire du bassin versant où la couverture quaternaire et la présence des Argiles de Flandres isolent la nappe des Sables de la surface topographique. La nappe des Sables d'Ostricourt ne peut donc remonter jusqu'au niveau topographique. Les remontées d'eau souterraine observées proviendraient probablement de l'existence de niveaux semi-perméables dans les limons de plateaux qui atteignent rapidement un état de saturation lors d'épisodes pluvieux provoquant la remontée des eaux souterraines à la faveur d'une topographie très plane et d'une perméabilité très faible.

Au niveau de la commune d'Auchel, la nappe de la craie se situe à plus de 20 m sous la surface topographique. La nappe de la craie ne peut donc pas remonter jusqu'en surface. L'émergence d'eau souterraine semble donc plus liée à des phénomènes locaux du même type que ceux observés dans les communes de Mont-Bernanchon et Robecq.

Pour les communes situées au sud-ouest de la faille de Pennes, les « remontées de nappe » correspondront à des débordements de la nappe de la craie dont l'écoulement est localement contraint par la barrière hydraulique constituée par la faille.

Les communes situées de part et d'autre de la faille de Ruitz peuvent être touchées par des remontées de la nappe de la craie liées à la discontinuité hydraulique de l'écoulement : passage d'un état de nappe libre à captive. Des phénomènes d'artésianisme peuvent exister. En bordure Nord-Est de la faille, les remontées de nappe peuvent également être liées à la saturation de la nappe des Sables.

5.2.3 Limites de la méthode

Cette seconde étape ne constituant qu'un ajustement sur la base de la cartographie établie à partir des cartes piézométriques, les limites de l'application de cette méthode sur le territoire du bassin versant de la Clarence sont globalement les mêmes que celles évoquées précédemment :

- L'échelle de travail (< 1/75 000),
- La représentativité locale des données exploitées,
- L'absence de chronique représentative des zones a priori sensibles au phénomène

Ainsi, les zones résultantes restent des enveloppes indicatives de la sensibilité au risque remontée de nappe. A fortiori, une représentation à l'échelle cadastrale n'est pas envisageable.

5.3 Conclusions, perspectives

Sur la base des données acquises lors de la phase 1, en l'état des connaissances du contexte hydrogéologique du bassin versant de la Clarence, il apparaît difficile d'obtenir une définition précise de l'aléa remontée de nappe. La méthode proposée aboutit à la définition d'un zonage de sensibilité au phénomène de remontée de nappe. Les données disponibles n'apparaissent pas suffisamment précises pour aller plus en avant dans la définition du phénomène, notamment proposer des cotes altimétriques de remontée du niveau de la nappe. En outre, les hauteurs et durées de submersion liées à un épisode de remontée de nappe seront fortement dépendantes des conditions d'écoulement de surface et de leur capacité à évacuer le trop-plein de la nappe. Dans ce cadre, rappelons que la partie amont du bassin versant (Sud de la faille de Ruitz) est moins sensible à la problématique remontée de nappe compte tenu de pentes du terrain naturel et du lit des cours supérieures à celles de la partie aval du bassin versant. Quoiqu'il en soit, une quantification des débits d'apport par les eaux souterraines restera toujours très délicate. Par ailleurs, d'éventuels phénomènes localisés qui concerneraient des nappes perchées ne sont pas appréhendés.

Sur le territoire du bassin versant de la Clarence, les principales données manquantes identifiées afin de définir un aléa remontée de nappe plus précis sont :

- Une carte piézométrique de la nappe de la Craie adaptée à l'échelle du bassin versant. Celle-ci doit être établie en période de hautes eaux, par l'intermédiaire de mesures de terrain.
- Une carte piézométrique de la nappe des Sables adaptée à l'échelle du bassin versant. Celle-ci doit être établie en période de hautes eaux, par l'intermédiaire de mesures de terrain.
- Des chroniques piézométriques obtenues sur des points de mesures localisés dans les zones pressenties à forte sensibilité, sur une dizaine d'années.
- Des suivis quantitatifs de sources de débordement de la nappe dans les zones pressenties à forte sensibilité, sur une dizaine d'années.

Ces compléments de suivis ne peuvent être réalisés à l'échelle de l'étude du PPRI.

Ainsi, pour le PPRI, trois prises en compte de l'influence de la nappe sont envisageables :

1. Le zonage de sensibilité établi pourra être utilisé dans une modélisation hydraulique, notamment du ruissellement en appliquant une surcote à la topographie naturelle dans les zones sensibles au phénomène de remontée de nappe (notamment lit majeur de cours d'eau).
L'hypothèse de surcote retenue (10-20 cm) aura cependant une incidence importante et sera difficile à justifier sans mesures de terrain précises.
2. Le porter à connaissance pourra utiliser la carte de sensibilité au risque suivante.
3. Le porter à connaissance se pourra se baser seulement sur la cartographie des événements réels recensés lors des enquêtes. Cependant, ces derniers sont peu nombreux.

Aucune de ces trois solutions n'est totalement satisfaisante. Nous estimons cependant que la 2^{ème} serait la plus facilement défendable.

Il appartient au Maître d'Ouvrage ou au Comité Technique de retenir celle qui lui paraît la plus pertinente.

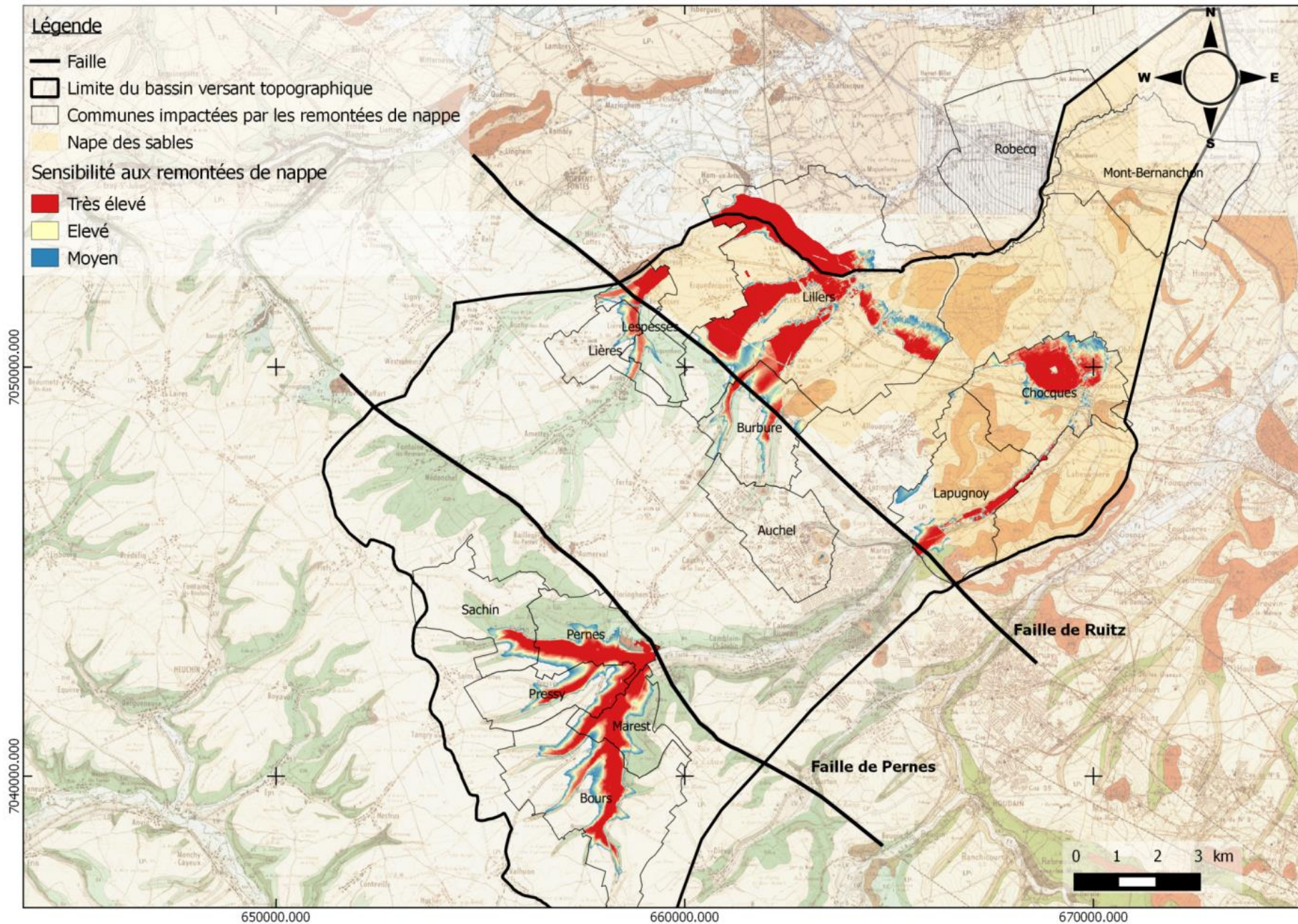


Figure 19 :
Carte de
synthèse de
la sensibilité
aux
remontées
de nappe à
partir de
l'exploitation
des cartes
piézométrique
ue

6 INCERTITUDES ET GESTION DES RISQUES

L'estimation de l'aléa de référence est associée à des incertitudes liées aux facteurs suivants :

- la bonne représentativité du modèle hydrologique en lien avec le fonctionnement karstique du bassin versant ;
- l'estimation de la pluie de référence ;
- la qualité du modèle hydraulique en lien avec le faible nombre de points de calage.

Le fonctionnement karstique du bassin peut rendre difficile le calage de certains évènements surtout lors des crues moyennes. Le caractère karstique du bassin versant constitue une difficulté pour l'application de méthodes de type gradex car le pivot habituellement fixé à 10 ans est sensiblement plus haut. Il n'en demeure pas moins qu'il reste possible de réaliser des modèles pluie débit sur des bassins à dominante crayeuse. C'est le cas par exemple de certains sous bassins de la Marne modélisés par ISL. Le modèle hydrologique doit être calé de manière satisfaisante sur les stations hydrométriques et ce pour différentes conditions hydrologiques. On comparera les évènements de crue et les valeurs statistiques de référence : débits classés, crues annuelle, biennale, décennale.

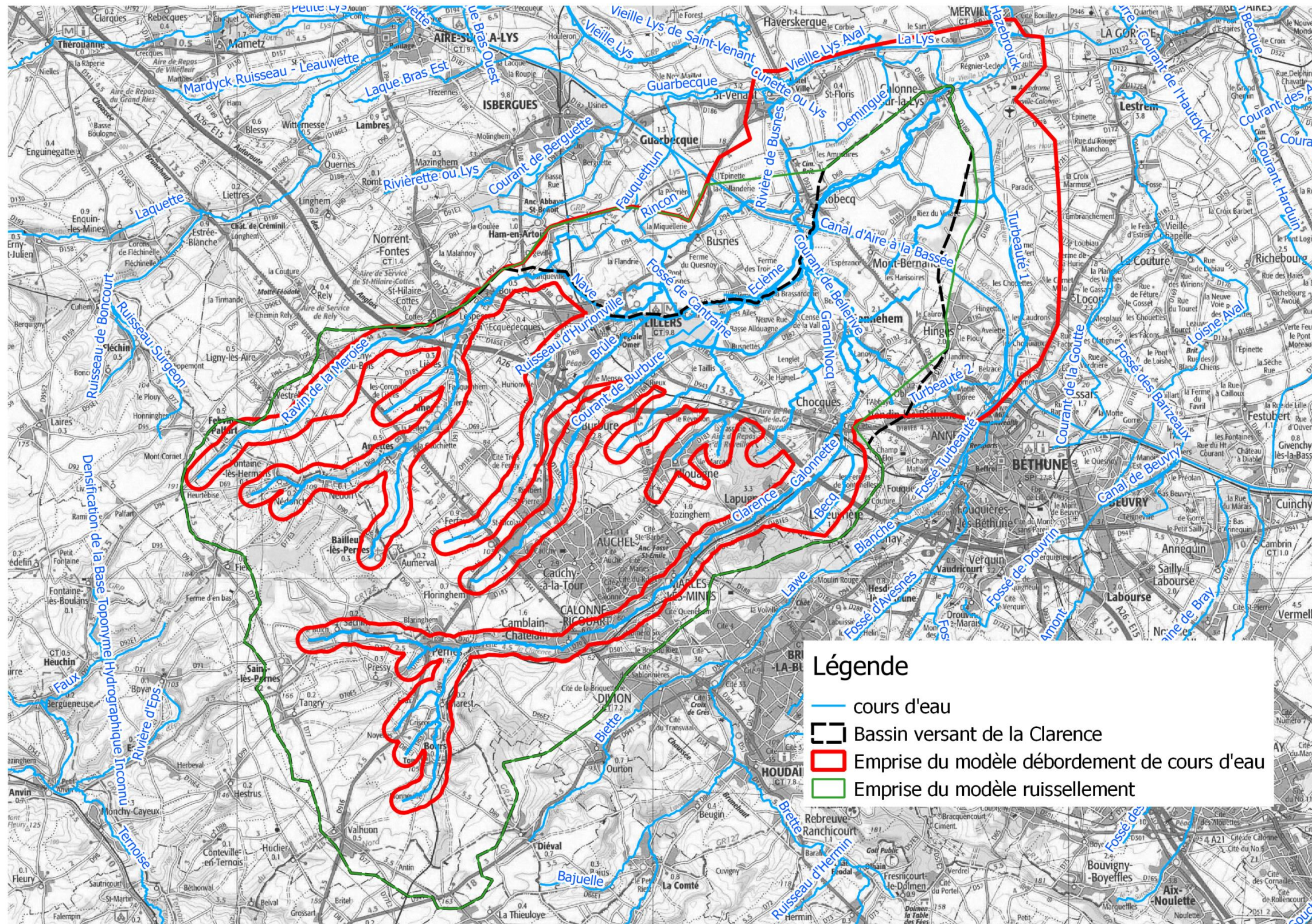
Ce calage doit également être vérifié sur des sous bassins versants à l'aide de repères de crues et du modèle hydraulique qui passe du débit à la hauteur d'eau. Le faible nombre de repères est une contrainte. Une autre vérification consiste à tirer des résultats des modèles hydrologiques l'évolution des débits de crue de référence avec la surface du bassin versant. Une relation en S^α avec α compris entre 0,6 et 0,9 doit pouvoir en résulter.

Enfin, une analyse de sensibilité doit traduire la robustesse du modèle.

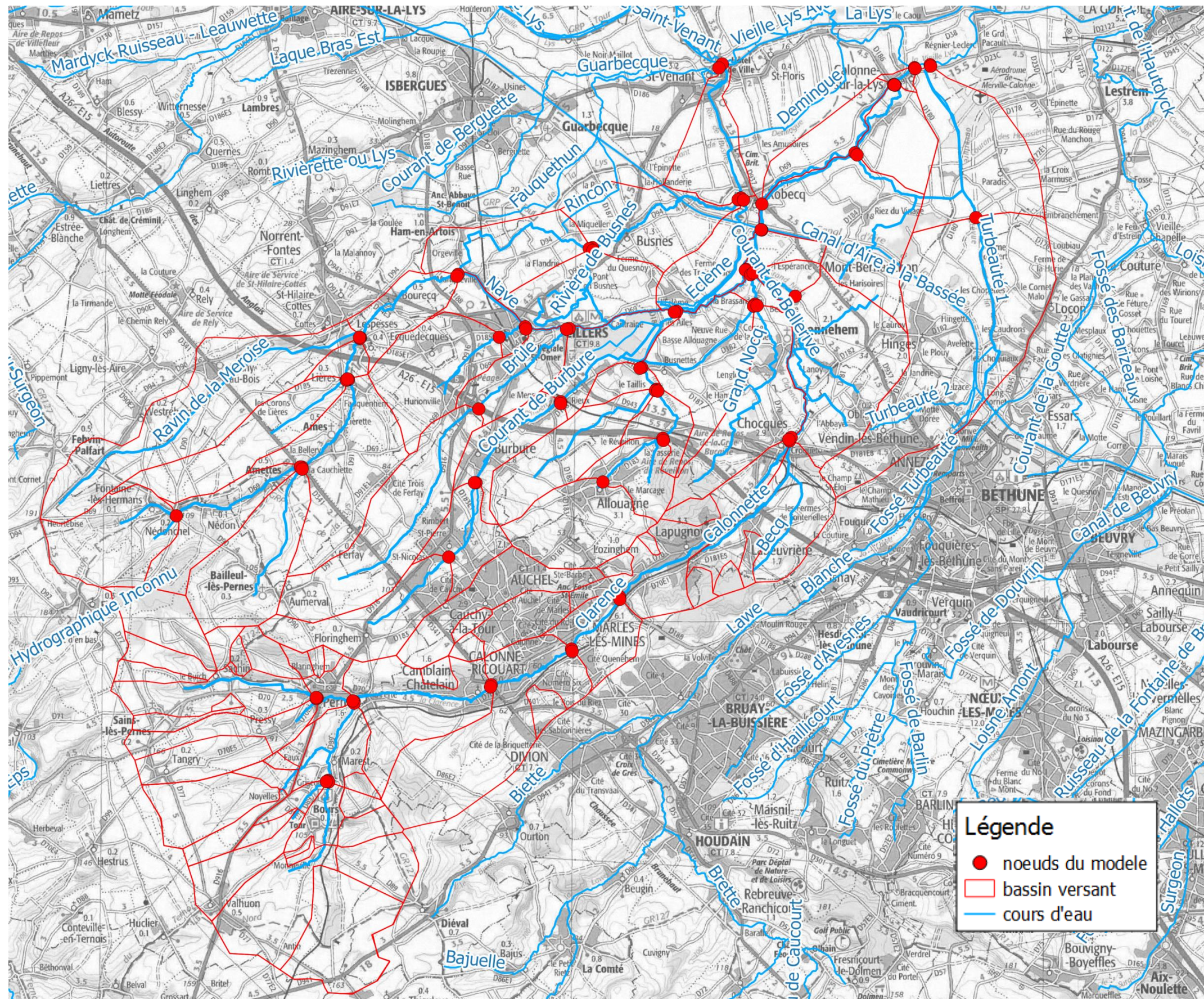
L'estimation de la pluie de référence constitue également une source d'incertitude car sa forme est toujours arbitraire. Il est nécessaire de réaliser des analyses de sensibilité pour apprécier l'influence de l'hypothèse relative à la répartition de la pluie dans le temps. Une comparaison avec des pluies réelles qui ont engendré des crues permet également de valider qualitativement le choix du hyétogramme de référence. ISL a développé un générateur de pluie qui permet de répondre à ce problème de définition du hyétogramme. Nous proposons de l'utiliser à des fins de comparaison.

Il a déjà été question de la rareté des points de calage disponibles. Nous utiliserons toutes les données en notre possession. Une analyse de sensibilité au coefficient de strickler sera menée. Une fourchette de valeurs restant dans la gamme usuelle sera testée et interprétée en termes d'évolution de l'aléa.

ANNEXE 1 : EMPRISE DES MODELES HYDRAULIQUES



ANNEXE 2 : DECOUPAGE PRELIMINAIRE DU MODELE HYDROLOGIQUE

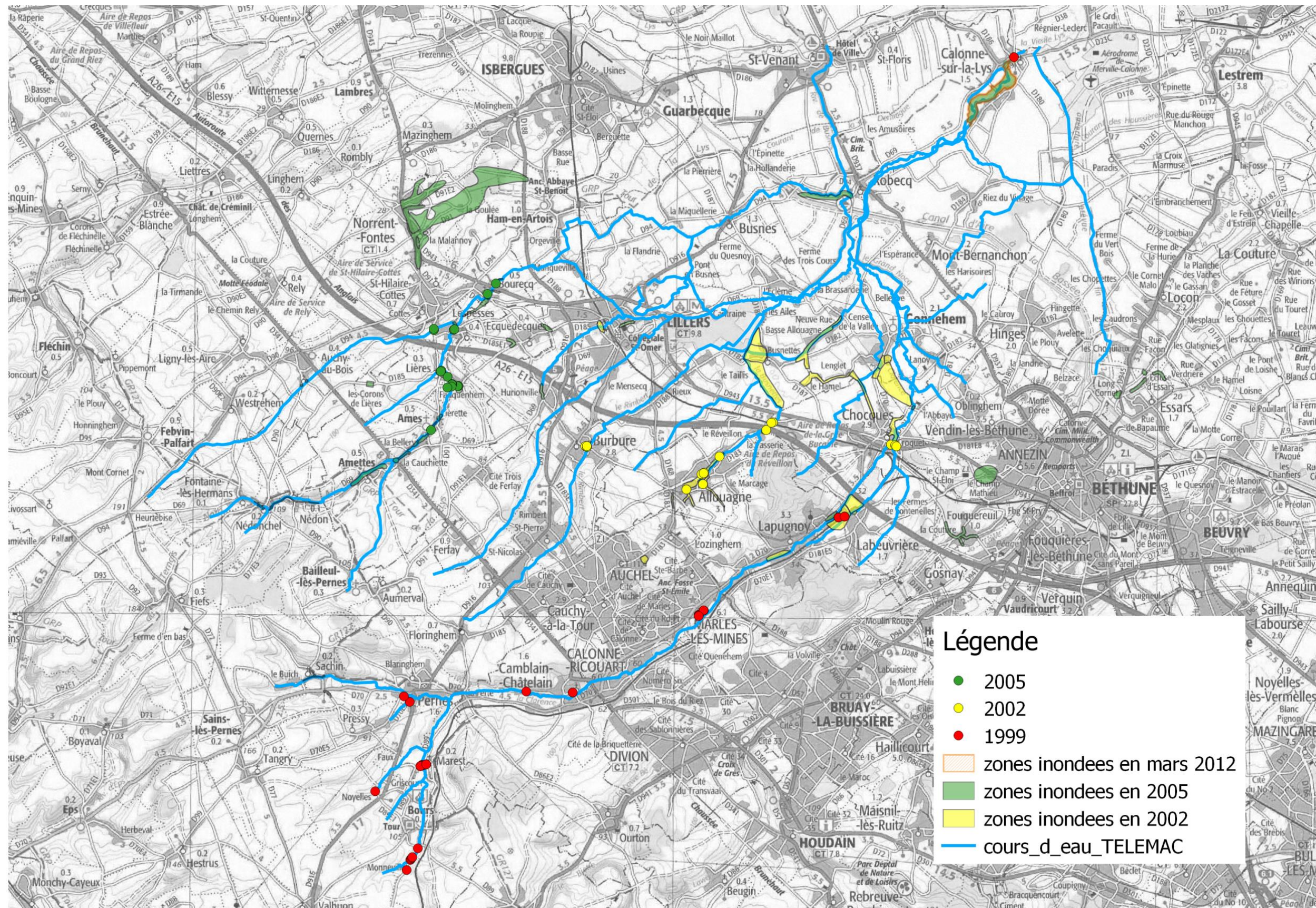


ANNEXE 3 REPERES DE CRUE

Commune	Rue	Année	Date	Hauteur	Photo	Commentaire	Source
Marles-les-Mines	Place Carette	1999		90 cm	2015-04-08_12-26-00-372.jpg		photo
Marles-les-Mines	Place Carette	1999		4 m	2015-04-08_12-22-34-808.jpg		oral
Marles-les-Mines	Rue de l'Eglise	1999		1,6 m	DSC_0038.jpg		photo
Labeuvrière	Rue Verte	1999 ; 2002		20 -30 cm	2015-04-09_11-04-02-687.jpg		oral
Labeuvrière	Rue Verte	1999 ; 2002		60 cm	2015-04-09_11-21-46-055.jpg		oral
Labeuvrière	Rue Verte	2002		75 cm			oral
Gonnehem	Pont Lepillet	janvier 1995				Aval du pont	
Gonnehem	Pont Lepillet	janvier 1995				Amont du pont	
Labeuvrière	Avenue du chateau	2002		55 cm			oral - hauteur mesurée mais pas de photo de la mire
Pernes	avenue Corbier	1999					photo
Pernes	rue de Pressy	1999					photo
Ames	rue principale	2005		60 cm	2015-04-23_20-34-56-899.jpg		oral
Allouagne	Rue de la Longue raie	2002		20 cm	2015-04-17_11-22-37-041.jpg		photo
Allouagne	Rue de la Longue raie	2002		20 cm	2015-04-17_11-21-34-071.jpg		photo
Allouagne	Rue du général de Gaulle	2002			2015-04-17_10-42-53-731.jpg		photo
Allouagne	Ruelle Flament	2002		15 cm	2015-04-17_10-52-41-372.jpg		photo
Allouagne	Ruelle Flament	2002		15 cm	2015-04-17_10-53-13-645.jpg		photo
Allouagne	Rue du général de Gaulle	2002		90 cm	2015-04-16_14-55-27-232.jpg		oral
Allouagne	La Vasserie	2002		1,50 m	2015-04-16_15-21-32-853.jpg		oral
Allouagne	Rue du Réveillon	2002		1 m	2015-04-16_15-05-49-991.jpg		oral
Allouagne	Rue du Réveillon	2002		1,10 m	2015-04-16_15-04-32-425.jpg		oral
Allouagne	Rue du Presbytère	2002		jusqu'à la marche	2015-04-16_15-55-39-094.jpg		oral
Allouagne	D183	2002					photo
Bourecq	Mairie	2005		15 cm	2015-04-16_18-06-23-430.jpg		oral
Lespesses	Rue de la Chapelle	2005			2015-04-23_18-26-21-672.jpg		photo
Lespesses	Rue de Lillers	2005		2,10 m par	2015-04-23_18-41-05-419.jpg		photo

				rapport au lit de la rivière		
Lespesses	Rue du Mont	2005			2015-04-23_18-52-14-652.jpg	photo
Lespesses	Rue du Mont	2005			2015-04-23_18-51-21-467.jpg	photo
Marest	Rue de la mairie	1999		90 cm	2015-04-21_18-16-17-960.jpg	photo
Marest	Rue de la mairie	1999		50 cm	2015-04-21_18-19-15-812.jpg	photo
Marest	Rue de la mairie	1999		45 cm	2015-04-21_18-13-05-345.jpg	photo
Marest	Rue de la mairie	1999		40 cm	2015-04-21_18-12-18-517.jpg	photo
Marest	Rue de la mairie	1999		40 cm	2015-04-21_18-21-27-423.jpg	photo
Marest	chemin du Tabor	juin 1998		2 m	2015-04-21_19-05-21-642.jpg	oral
Burbure	Rue du Cavin	2002	27 aout 2002 - 4h30	60-70 cm	2015-04-24_11-21-26-147.jpg	photo
Burbure	Rue du Cavin	2002	27 aout 2002 - 7h	20 cm	2015-04-24_11-19-57-653.jpg	photo
Burbure	Rue du Cavin	2002		dizaine de centimètre	2015-04-24_11-22-02-921.jpg	photo
Chocques	Maréchal Juin	2002		50 cm	2015-04-08_11-30-40-978.jpg	photo
Chocques	Maréchal Juin	2002		70 cm	2015-04-08_11-36-14-143.jpg	photo
Chocques	Maréchal Juin	2002		jusqu'à la voiture	2015-04-08_11-37-25-661.jpg	oral
Calonne-sur-la-Lys		déc 1993 ;1999		15 cm	2015-04-23_15-05-05-288.jpg	oral
Calonne-sur-la-Lys		déc 1993		30-40 cm	2015-04-23_15-16-50-737.jpg	oral
Calonne-Ricouart	rue André Mancey	1999		70 cm d'eau dans la banque		Photos archives départementales
Calonne-Ricouart	rue André Mancey	1999				Photos archives départementales
Calonne-Ricouart	rue du 11 novembre	1999		10-20 cm		Photos archives départementales
Calonne-Ricouart	allée des Violettes	1999		40 cm environ		Photos archives départementales
Camblain-Chatelain	Rue du Stade	1999				page 2 1ère photo
Camblain-Chatelain	Rue Jules Guesde	1999				page 5
Camblain-Chatelain	Rue de la Bourgogne	1999		eau		page 6 1ère photo

				jusqu'ici		photo	
Camblain-Chatelain	Rue Casimir Beugnet	1999				page 4 en bas à gauche	photo
Camblain-Chatelain	Rue Casimir Beugnet	1999				page 4 en bas à droite	photo
Bourecq	rue de l'Eglise	2005			2015-04-16_17-38-17-360.jpg		oral
Lespesses	rue d'Aire	2005			2015-04-23_18-34-02-976.jpg		oral
Lespesses	rue d'Aire	2005			2015-04-23_18-35-39-666.jpg		oral
Lespesses	rue de l'Ecole	2005			2015-04-23_19-06-27-428.jpg		oral
Lespesses	rue de l'Ecole	2005			2015-04-23_19-07-29-557.jpg		oral
Lespesses	rue de l'Ecole	2005			2015-04-23_19-09-08-557.jpg		oral
Lespesses	rue du Paradis	2005			2015-04-23_19-12-43-510.jpg		oral
Lières	rue Lierettes	2005			2015-04-23_20-15-58-907.jpg		oral
Lières	rue Lierettes	2005			2015-04-23_20-16-24-141.jpg		oral
Lières	rue d'Aire	2005			2015-04-23_20-23-39-241.jpg		oral
Lières	rue d'Aire	2005			2015-04-23_20-24-31-062.jpg		oral
Lières	rue d'Aire	2005			2015-04-23_20-25-18-615.jpg		oral
Bours	Monneville	1999		jusqu'aux parpaings	2015-04-22_14-09-23-148.jpg		oral
Bours	Monneville	1999			2015-04-22_14-06-17-126.jpg		oral
Bours	Monneville	1999			2015-04-22_14-07-20-966.jpg		oral
Bours	Monneville	1999			2015-04-22_14-07-56-792.jpg		oral
Bours	Monneville	1999			2015-04-22_14-08-21-982.jpg		oral
Bours	Monneville	1999			2015-04-22_14-08-34-409.jpg		oral
Camblain-Chatelain	rue Casimir Beugnet	1999				photo 2	photo
Camblain-Chatelain	rue Casimir Beugnet	1999				photo 7	photo
Lillers	Chemin des Dignes Manqueville	2005	4 juillet entre 10h et 12h				
Lillers	Chemin des Dignes Manqueville	2005	4 juillet entre 10h et 12h				



ANNEXE 5 EXEMPLES DE CARTES D'ALEAS

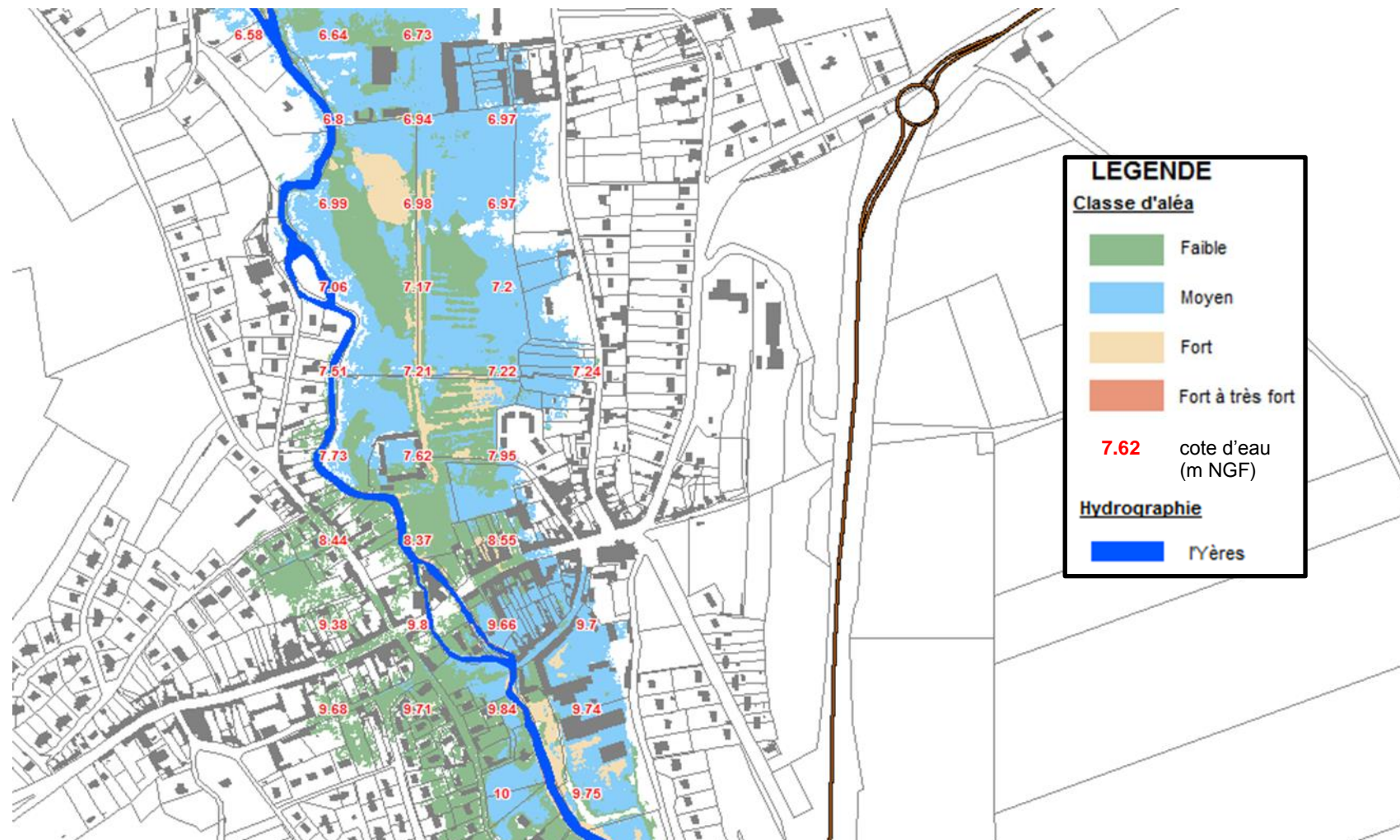


Figure 20 : exemple de carte d'aléa débordement de cours d'eau

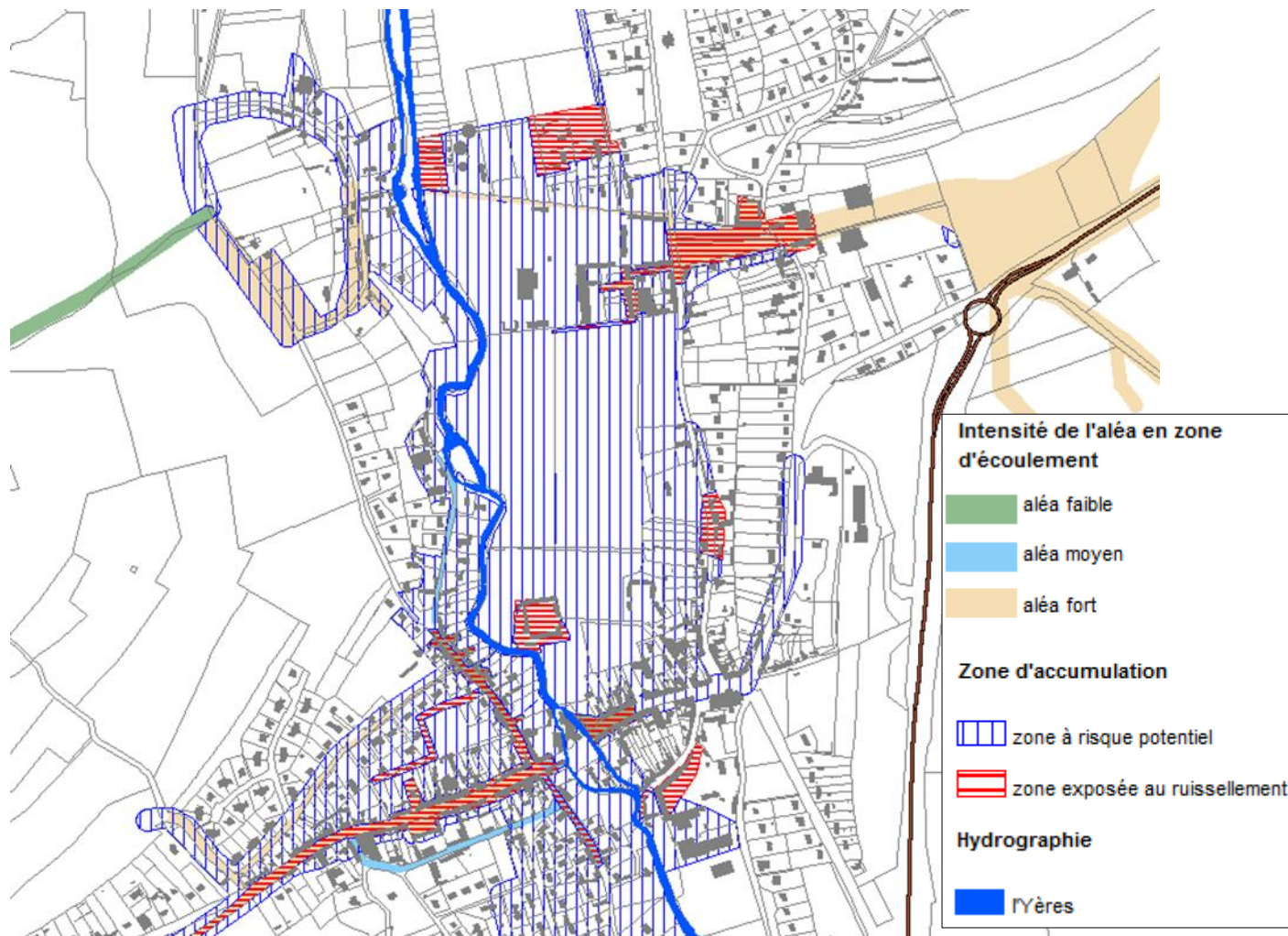


Figure 21 : exemple de carte d'aléa ruissellement

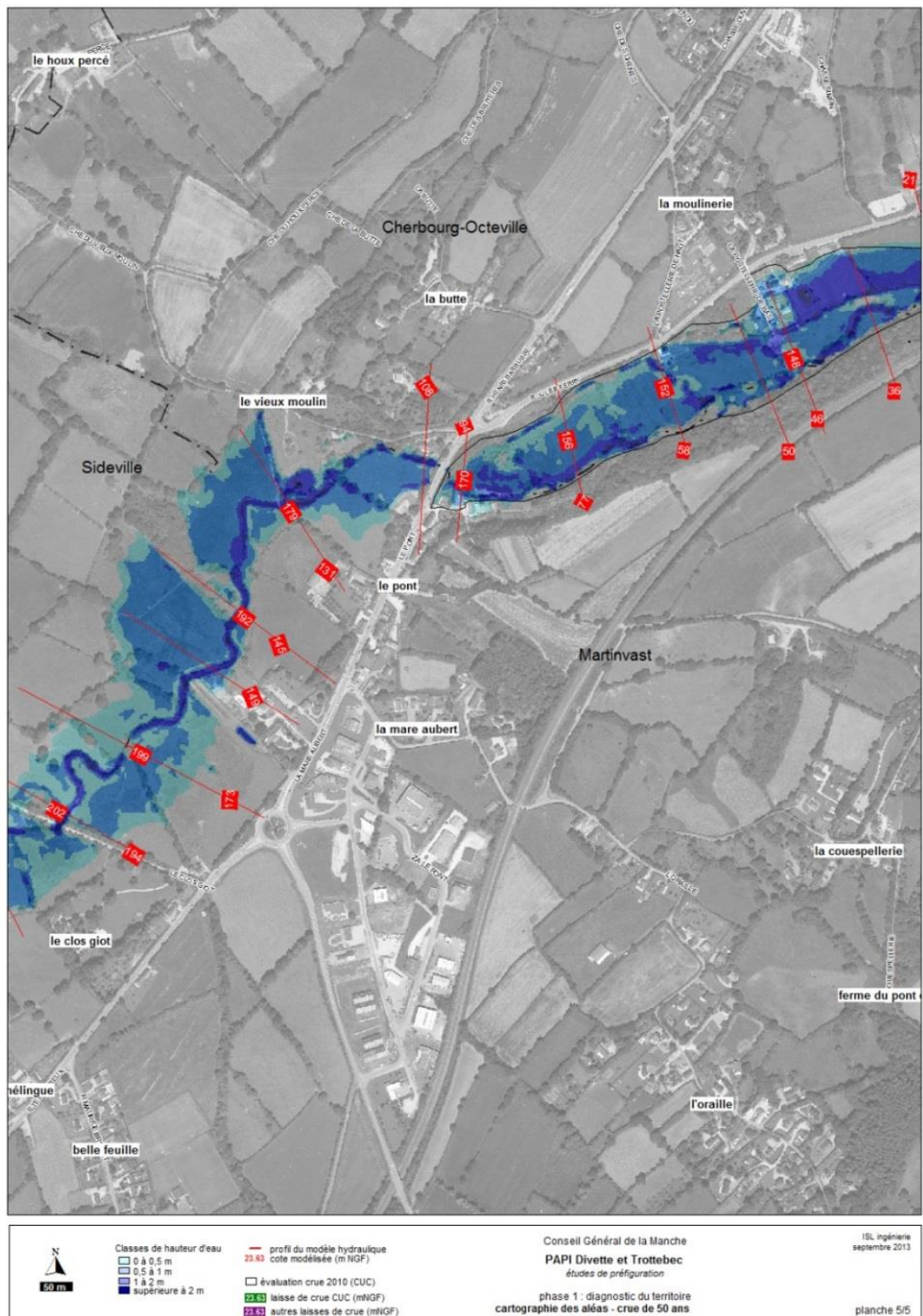


Figure 22 : exemple de carte de représentation des hauteurs d'eau

ANNEXE 6 CARTOGRAPHIE DE L'EMPRISE DES ZONES DE PRODUCTION POTENTIELLES

