



DREAL NORD-PAS-DE-CALAIS

Direction régionale de l'Environnement, de
l'Aménagement et du Logement



ELABORATION DE CARTE DE SURFACES
INONDABLES (MISE EN ŒUVRE DE LA PHASE
CARTOGRAPHIQUE DE LA DIRECTIVE
INONDATION) -EVENEMENT EXTREME-
TRI DE BETHUNE/ARMENTIERES

Etape 3 :

Détermination des débits pour
l'évènement extrême

HFG31222K

Septembre 2013



- Études générales
- Assistance au Maître d'Ouvrage
- Maîtrise d'œuvre conception
- Maîtrise d'œuvre travaux
- Formation

Siège social
78, allée John Napier
CS 89017
34965 - Montpellier Cedex 2

Tél. : 04 67 99 22 00
Fax : 04 67 65 03 18
montpellier.egis-eau@egis.fr
<http://www.egis-eau.fr>



FICHE D'IDENTIFICATION DU DOCUMENT

Rapport

Titre : Elaboration de carte de surfaces inondables (mise en œuvre de la phase cartographique de la Directive Inondation) - événement extrême – TRI de Béthune/Armentières
Détermination des débits pour l'évènement extrême

Numéro d'affaire : HFG 31222 K

Client

Coordonnées : DREAL Nord-Pas-de-Calais
44 Rue de Tournai
59 000 Lille
Téléphone : 03 20 40 54 54

Interlocuteur :
BERTAUX-VALERE Marie-Alexandrine (Chef de cellule) - DREAL Nord-PdC/SR/DRNHM/CPRN
BELLYNCK Geraldine.Bellynck

Contrôle qualité

Rédigé par
L.CHIARELLA

Vérfié par
C.BECKER

Statut du rapport : A valider
Date d'émission : Septembre 2013
Diffusion :

Sommaire

CHAPITRE 1	RAPPEL DES OBJECTIFS DE L'ETUDE ET PRESENTATION DU TRI BETHUNE-ARMENTIERES	11
1.1	Les objectifs de l'étude	11
1.1.1	Contexte de l'étude	11
1.1.2	Phasage et déroulement de l'étude	11
1.2	Le secteur du TRI Béthune-Armentières	13
CHAPITRE 2	HYDROLOGIE ET HYDRAULIQUE CALEE - ETUDES DE FAISABILITES ET D'INONDABILITE	15
2.1	Extrait du rapport de faisabilité pour les aménagements sur le bassin de la Bourre – Calage du modèle hydraulique et pluies de référence	17
2.1.1	Construction et calage du modèle hydraulique	17
2.2	Extrait du rapport de faisabilité pour les aménagements sur le bassin de la Lawe – Calage du modèle hydraulique et pluies de référence	32
2.2.1	Caractéristiques morphologiques des bassins versants	32
2.2.2	Hypothèse de calage du modèle hydraulique de la Lawe	33
2.3	Extrait du rapport de faisabilité pour les aménagements sur le bassin de la Loisine et du Surgeon - Calage du modèle hydraulique et pluies de référence	36
2.3.1	Structure hydraulique et évolution du modèle	36
2.4	Extrait du rapport de faisabilité pour les aménagements sur le bassin de la Lys amont et de la Laquette- Calage du modèle hydraulique et pluies de référence	43
2.4.1	Caractéristiques morphologiques des bassins versants	43
2.4.2	Hypothèse de calage du modèle hydraulique de la Lys amont et de la Laquette	44
2.5	Extrait du rapport de faisabilité pour les aménagements sur le bassin de la Météren Becque et la Grande Becque de St-Jans-Cappel - Calage du modèle hydraulique et pluies de référence	52
2.5.1	Caractéristiques des ruissellements sur le bassin de la Météren Becque et la Grande Becque de St-Jans-Cappel	52
2.5.2	Calage du modèle hydraulique	52
2.6	Extrait du rapport de faisabilité pour les aménagements sur le bassin de la Clarence et du Guarbecque - Calage du modèle hydraulique et pluies de référence	56
2.6.1	Structures hydrauliques, évolutions et choix des modèles	56
2.6.2	Calage des paramètres hydrologiques et hydrauliques	59

2.7	Extrait du rapport de faisabilité pour les aménagements sur le bassin de la Laquette - Calage du modèle hydraulique et pluies de référence	70
2.7.1	Structures hydrauliques, évolutions et choix des modèles	70
2.7.2	L'étude PGEEEC : modèles Infoworks RS	70
2.7.3	Calage des paramètres hydrologiques et hydrauliques	74
2.8	Extrait du rapport propre à l'Inondabilité – Fascicule 2 : l'hydrologie dans les modèles	97
2.8.1	Les modèles	97
2.8.2	Implémentations / Améliorations	100
2.8.3	Le module hydrologique	105

CHAPITRE 3 DISCUSSION AUTOUR DE LA METHODE POUR LA DETERMINATION DES DEBITS EXTREMES 107

3.1	Présentation de la méthode du Gradex	107
3.1.1	Principes généraux	107
3.1.2	Application de la méthode du Gradex	108
3.2	Présentation de la méthode Shyreg	109
3.2.1	Principes généraux	109
3.2.2	Décomposition de la méthode Shyreg	109
3.3	Discussion	111

CHAPITRE 4 DETERMINATION DES DEBITS EXTREMES 112

4.1	Les courbes IDF utilisées: Lille-Lesquin – période 1961-2008	112
4.2	Analyse des hydrogrammes de crues sur le TRI Béthune-Armentières	114
4.2.1	L'accélération et l'amplification des apports	114
4.2.2	Détermination de la durée de pluie la plus défavorable	115
4.2.3	Détermination de la période de retour « pivot »	116
4.3	Calcul du Gradex des pluies	116
4.4	Détermination des débits extrêmes GRADEX / SHYREG	118
4.4.1	Points de calculs pour la comparaison des débits extrêmes GRADEX/SHYREG	118
4.4.2	Caractérisation de la pluie hivernale centennale de référence	119
4.4.3	Extraction des débits de pointe pour T=100ans	125
4.4.4	Détermination des débits extrêmes à partir des débits T=100 ans issus des modèles	129
4.5	Comparaison avec les valeurs obtenus par la méthode Shyreg	130
4.6	Synthèse de la détermination des débits extrêmes	131

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Répartition mensuelle de la pluviométrie à Borre et au Doulieu (de l'annuaire 2006 – DIREN Nord-pas-de-Calais).....	21
Tableau 2 – Intensité-Durée-Fréquence à la station de Borre.....	21
Tableau 3 – Cumul de pluie par jour – Juillet 2007.....	22
Tableau 4 - Liste de postes de mesure pour chaque évènement météorologique	27
Tableau 5 – Cumul de pluie enregistré sur plusieurs stations pluviométriques pour l'évènement de calage	27
Tableau 6 – Coefficient de ruissellement du bassin de la Borre Becque et du Galge/Becque de Foëne	28
Tableau 7 – Coefficient de ruissellement du bassin versant de la Grande Steenbecque	30
Tableau 8 : table des coefficients de ruissellement utilisés (sols lourds).....	32
Tableau 9 : Caractéristiques des sous bassins versants étudiés	32
Tableau 10 : Tableau comparatif des laisses de crues et les simulations pour des pluies de temps de retour 20 et 50 ans.....	34
Tableau 11 : Coefficient de ruissellement moyen	37
Tableau 12 : Récapitulatif des surfaces de bassins versants modélisés – coefficients de ruissellement affectés.....	39
Tableau 13 : Intensité-Durée-Fréquence à la station de Lille-Lesquin.....	41
Tableau 14 : Table des coefficients de ruissellement utilisés (sols lourds).....	43
Tableau 15 : Table des coefficients de ruissellement utilisés dans les études PGGECC.....	43
Tableau 16 : Caractéristiques des 7 périodes de mesures utilisées pour la calibration du modèle	47
Tableau 17 : Premier calage – valeurs des paramètres	48
Tableau 18 : Valeurs des paramètres de modifications du modèle hydraulique de la Lys amont et de la Laquette....	50
Tableau 19 : Estimation des volumes écoulés et des ratios Volumes précipités / Volumes écoulés.....	53
Tableau 20 : Point de calages	54
Tableau 21 : Résultats du calage	55
Tableau 22 : Coefficients de ruissellement par occupation du sol.....	66
Tableau 23 : Coefficients de ruissellement moyen pour les macro-bassins versants.....	67
Tableau 24 : Structures des modèles RS de Haecon (amont / aval).....	70
Tableau 25 : Structures du modèle complet final Infoworks CS d'Egis Eau	72
Tableau 26 : Arrêtés de Catastrophe Naturelle sur le bassin versant de la Laquette	77
Tableau 27 : Caractérisation des 7 événements classés CatNat	77
Tableau 28 : Coefficients de restitution estimés pour les pluies estivales	81
Tableau 29 : Coefficients de restitution estimés pour les événements hivernaux.....	82
Tableau 30 : Résultats du calage à Witternesse de l'évènement de juillet 2005	86
Tableau 31 : Volumes débordés en situation actuelle modélisée – Crue de juillet 2005	89
Tableau 32 : Paramétrages des apports de drainage hypodermique	92
Tableau 33 : Paramétrages des apports de nappe.....	92
Tableau 34 : Résultats du calage de l'évènement de décembre 1994 – avril 1995.....	93
Tableau 35 – Les modèles hydraulique – hydrologie	98

Tableau 36 – Mesures enregistrées à la station de Lugy et Delettes – 24-27/12/1999	101
Tableau 37 – Calage décembre 1999 à Lugy – scénario simulé et réel	102
Tableau 38 – Calage décembre 1999 à Lugy avec module hydrologique– scénario simulé et réel	103
Tableau 39 – Calage décembre 1999 à Delettes avec module hydrologique– scénario simulé et réel.....	104
Tableau 40 : IDF à la station météorologique Lille-Lesquin – période 1961-2008.....	112
Tableau 41 : Détermination de l'intensité en mm/h pour T=1000ans sur une durée de 1 heure	117
Tableau 42 – Intensité-durée-Fréquence à la station de Fiefs.....	121
Tableau 43 – Intensité-durée-Fréquence à la station de Fiefs.....	121
Tableau 44 – Stations hydrométriques	122
Tableau 45 –Synthèse des débits maximaux instantanés et journaliers enregistrés et/ou estimés aux station principales sur le bassin versant de la Lys	124
Tableau 46 : Débits de pointe des bassins versants pour une pluie T=100ans de type hivernale.....	128
Tableau 47 : Débits extrêmes - (amont) TRI Béthune-Armentières.....	129
Tableau 48 : Comparaison des débits T = 100 ans entre les méthodes Gradex et Shyreg.....	130
Tableau 49 : Comparaison des débits extrêmes entre les méthodes Gradex et Shyreg	130

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Cartographie des communes localisées sur le territoire du TRI	14
Figure 2 : Découpage des modèles hydraulique sur le territoire du SYMSAGEL et réseau modélisé	16
Figure 3 : Hydrographie du bassin versant de la Bourre et ses canaux	18
Figure 4 : Occupation des sols – graphique à secteurs.....	19
Figure 5 : Précipitation mensuelle à la station de Borre et Doulieu	20
Figure 6 : Caractérisation de la pluie du 18 au 24 Juillet 2007 – IDF de la station Borre	22
Figure 7 : Hyétogramme à la station Borre de la DIREN – Novembre-Décembre 2008.....	23
Figure 8 : Caractérisation de pluie réelle de fin Novembre 2008- début Décembre – station de Borre	23
Figure 9 : Hyétogramme à la station de Borre – Novembre/Décembre 2009	24
Figure 10 : Caractérisation de la pluie réelle – novembre-décembre 2009	24
Figure 11 : Hyétogramme observé à la station de Steenbecque.....	25
Figure 12 : Comparaison des hyétogrammes enregistrés à la station de Steenbecque et Borre	26
Figure 13 : Localisation pluviomètres et stations de mesure sur le bassin versant de la Bourre.....	26
Figure 14 : Courbe de calage de la Borre Becque au lieu –dit « Le Peuplier » - Débit.....	29
Figure 15 : Courbe de calage de la Borre Becque au lieu –dit « Le Peuplier » - Hauteur d'eau.....	29
Figure 16 : Calage de la Grande Steenbecque – débit.....	30
Figure 17 : Calage de la Grande Steenbecque – zoom du 28/2/2010 au 1/03/2010 - débit	30
Figure 18 : Courbe de calage de la Bourre – hauteur d'eau.....	31
Figure 19 : Comparaison de la hauteur d'eau à Pont à Loup et à l'écluse de Merville	31
Figure 20 : Hydrogramme à la station de mesure de Nœux les Mines.....	38
Figure 21 : Calage en aval de Nœux les Mines.....	38
Figure 21: Profil de l'évènement hydrologique du 26 août 2002.....	40
Figure 23: Caractéristiques de la pluie réelle du 26 août 2002.....	41
Figure 23 : Surfaces agricoles sur les bassins de la Loïse et du Surgeon.....	42
Figure 25 : Résultat du calage du modèle de la Lys amont et de la Laquette sur les mesures décennales de débits à Witternesse.....	47
Figure 26 : Résultat du calage du modèle sur les mesures effectuées à Witternesse.....	48
Figure 27 : Résultat du calage du modèle sur les mesures effectuées à Serny	49
Figure 28 : Résultat du calage du modèle sur les mesures effectuées à Estrée-Blanche	49
Figure 29 : Comparaison des débits mesurés à Witternesse et calculés par PDM – été 2005	51
Figure 30 : Comparaison des débits calculés et de la pluviométrie enregistrée	55
Figure 31 : Synoptique des modèles actualisés	58
Figure 32 : Superficies des bassins versants modélisés	59

Figure 33 : Points hydrométriques de référence pour le calage	60
Figure 34 : Occupation des sols sur le bassin versant de la Clarence	62
Figure 35 : Répartition des pentes sur le bassin versant de la Clarence	63
Figure 36 : Calage du sous-modèle « Guarbecque » sur la pluie du 23/04/2005.....	64
Figure 37 : Validation du sous-modèle « Guarbecque » sur la pluie du 05/07/2005.....	65
Figure 38 : Débits mesurés comparés à ceux obtenus avec le modèle Clarence amont	68
Figure 39 : Campagne de mesures pour calage complémentaire – 2008	69
Figure 40 : Analyse des mesures au point PM1 et PM2 à Marles	69
Figure 41 : Zone de densification du modèle V3 – le Mardyck	73
Figure 42 : Occupation des sols sur les sous-bassins versants de la Laquette amont.....	75
Figure 43 : Répartition des pentes sur le bassin versant de la Laquette amont	76
Figure 44 : Graphique pluie / débit pour la crue de mai 1993.....	78
Figure 45 : Graphique pluie / débit pour la crue de février 2002 à mai 2002	78
Figure 46 : Graphique pluie / débit pour la crue de décembre 1993 à mai 1994	79
Figure 47 : Graphique pluie / débit pour la crue de décembre 1994 à juillet 1995.....	79
Figure 48 : Graphique pluie / débit pour la crue de décembre 1999.....	80
Figure 49 : Graphique pluie / débit pour la crue de mai 2000.....	80
Figure 50 : Graphique pluie / débit pour la crue de juillet 2005.....	81
Figure 51 : Coefficients de restitution détaillés pour la période déc.93 / avr.94.....	83
Figure 52 : Coefficients de restitution détaillés pour la période déc.94 / juil.95	83
Figure 53 : Coefficients de restitution détaillés pour la période déc.99 / janv.2000	84
Figure 54 : Coefficients de restitution détaillés pour la période fév. / mars. 2002.....	84
Figure 55 : Fonctionnement en charge de l'aqueduc de la Tirmande.....	86
Figure 56 : Calage du ruissellement pour l'événement de juillet 2005.....	87
Figure 57 : Zones de débordement amont pour l'événement de juillet 2005	89
Figure 58 : Calage pour l'événement de déc. 1994 à avr.1995 – ruissellement	90
Figure 59 : Calage pour l'événement de déc. 1994 à avr.1995 – ensemble des apports	91
Figure 60 : Hydrogrammes calé et mesuré pour l'événement de décembre 1994 à avril 1995.....	94
Figure 61 : Hydrogrammes calé et mesuré pour l'événement de décembre 1993 à février 1994.....	95
Figure 62 : Hydrogrammes calé et mesuré pour l'événement de décembre 1999 à janvier 2000	96
Figure 63 : Débit journalier moyen et débit mensuel mesuré à la station de Lugy et Delettes pendant l'année 1999	100
Figure 64 : Débits calculés, première approximation, à la station de Lugy	101
Figure 65 : Débits calculés, avec le module hydrologique - station de Lugy, crue 1999.....	103
Figure 66 : Débits calculés, avec le module hydrologique - station de Delettes, crue 1999	104
Figure 67 : Schéma de fonctionnement du système d'infiltration/restitution	105
Figure 68 : Principes généraux – Méthode du Gradex	107
Figure 69 : Principes généraux II – Méthode du gradex	108
Figure 70 : Principes généraux – Méthode SHYREG	110
Figure 71 : Courbes IDF Lille-Lesquin – Hauteurs de précipitations en mm.....	113
Figure 72 : Courbes IDF Lille-Lesquin – Intensités en mm/h.....	113

Figure 73 : Loi Gumbel applicable pour l'extrapolation des débits extrêmes	116
Figure 74 : Localisation des points de calcul des débits extrêmes GRADEX / SHYREG	118
Figure 75 : Hyétogramme de la pluie hivernale, du 24 au 27 Décembre 1999.....	120
Figure 76 : Caractérisation de la pluie hivernale, du 24 au 27 Décembre 1999	121
Figure 77 : Hydrogramme au droit de la Laquette pour T=100ans en situation hivernale	125
Figure 78 : Hydrogramme au droit de la Météren becque	125
Figure 79 : Hydrogramme au droit de la Bourre	126
Figure 80 : Hydrogramme au droit de la Grande Becque de Saint-Jans-Cappel.....	126
Figure 81 : Hydrogramme au droit de la Melde	127
Figure 82 : Hydrogramme au droit de la Lys rivière.....	127
Figure 83 : Hydrogramme au droit de la Clarence.....	128

Chapitre 1 Rappel des Objectifs de l'étude et présentation du TRI Béthune-Armentières

1.1 Les objectifs de l'étude

1.1.1 Contexte de l'étude

La présente étude se situe dans le contexte de la mise en œuvre de la directive européenne du 23 octobre 2007, relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondations (DI). Celle-ci a été transposée en droit français par l'article 221 de la LENE (loi portant engagement national pour l'environnement) du 12 juillet 2010 et par le décret n°2011-227 du 2 mars 2011, qui modifie le code de l'environnement.

En application de ce décret, la mise en œuvre comporte les étapes suivantes :

- Evaluation préliminaire des risques d'inondation (EPRI) : achevée le 22 décembre 2011 ;
- Identification des territoires à risques importants d'inondation (TRI) : achevée à l'automne 2012 par la signature d'un arrêté préfectoral ;
- Elaboration des cartes des surfaces inondables et des cartes des risques d'inondation dans les TRI pour trois probabilités de dépassement : pour le 22 décembre 2013 ;
- Elaboration des plans de gestion des risques d'inondation (PGRI) : à achever pour le 22 décembre 2015.

Un Territoire à Risque Important d'Inondation (TRI) est une zone où les enjeux potentiellement exposés aux inondations sont les plus importants, en comparaison avec la situation globale du district.

L'objectif de la présente étude est la réalisation des cartes des zones inondables représentant l'aléa extrême (T supérieur à 1000 ans) pour le TRI Béthune-Armentières, propre au débordement de la Lys et de ses principaux affluents (départements du Nord Pas-de-Calais).

1.1.2 Phasage et déroulement de l'étude

L'étude concernant l'élaboration des cartes des surfaces inondées pour l'évènement extrême se décompose en différentes étapes :

- **Etape 1 : Analyse de la documentation et du fonctionnement des bassins versants** (présent document) : Synthèse bibliographique critique à partir des études antérieures pour l'explication des phénomènes hydrologiques et hydrauliques en cause dans les inondations vécues ou à prévoir au droit du TRI ;
- **Etape 2 : Premiers éléments concernant les casiers et zones d'expansion de crues modélisées dans les études antérieures** : Elaboration de cartes comparatives mettant en évidence les casiers et « flood compartments » modélisés dans les études antérieures (Etude Inondabilité), face à la géologie, face à la topographie (LIDAR), face aux inondations T= 100 ans, pour une discussion sur la justification a priori, des zones d'expansion de crues modélisées.
- **Etape 3 : Détermination des débits pour l'évènement extrême** : calcul des débits extrêmes T > 1000 ans sur chacun des bassins élémentaires des 14 modèles hydrauliques ;
- **Etape 4 : Modélisation à partir des modèles existants des zones inondables pour l'évènement extrême / cartographie associée** ;

Remarque :

La méthodologie proposée dans une première approche par les services de l'état dans le cadre du marché initial prévoyait la confortation des résultats par le biais de deux méthodes menées en parallèle pour l'établissement des cartes d'inondation, à savoir une cartographie sur la base d'une étude géomorphologique et une cartographie d'une modélisation hydraulique.

Compte tenu des délais impartis très courts, la méthodologie retenue sur le territoire du TRI s'est vu modifiée et simplifiée. A été validé par le maître d'ouvrage la cartographie des zones inondables par la seule méthode issue d'une modélisation hydraulique détaillée.

De plus la réunion de démarrage (9 juillet 2013) a permis de poser les éléments affinés en terme méthodologique. Le compte rendu soumis et validé par le COPIL fait état que le travail sur l'extension des casiers est réalisée en même temps que le travail sur le modèle hydraulique : la phase 2 constituera une première analyse (cartes comparatives) sur l'ajout de nouvelles zones, a priori, sur la base des zones d'expansion déjà construites, les casiers seront construits dans le modèle dans le cadre de la phase 5, en parallèle de l'implémentation du modèle hydraulique.

Concernant l'estimation des débits extrêmes, aucune méthode n'est imposée par le Maître d'Ouvrage.

La méthode du Gradex est privilégiée ; confirmée si possible avec les données fournies de la base de données Shyreg-débit.

Concernant les apports amont, en dehors du TRI, les débits extrêmes seront calculés sur la base d'un gradex des débits de crue résultant des bassins amont globaux, juste aux points d'entrée vers le périmètre TRI. A l'intérieur du TRI seulement, le gradex des débits sera fait sur chacun des bassins élémentaires.

Les cartes d'inondation concernent les débordements de la Lys mais également les débordements des affluents inscrits dans le TRI. Seules les zones de débordements au sein du TRI seront implémentées afin d'aboutir à une cartographie au plus juste. »

Le présent document concerne l'Etape 3 : Détermination des débits pour l'évènement extrême : calcul des débits extrêmes T > 1000 ans sur chacun des bassins élémentaires des 14 modèles hydrauliques ;

1.2 Le secteur du TRI Béthune-Armentières

La délimitation du territoire du TRI Béthune-Armentières est fonction des limites administratives d'une commune ou d'un regroupement de communes. De ce fait, les limites du TRI ne suivent pas les bassins hydrographiques des cours d'eau.

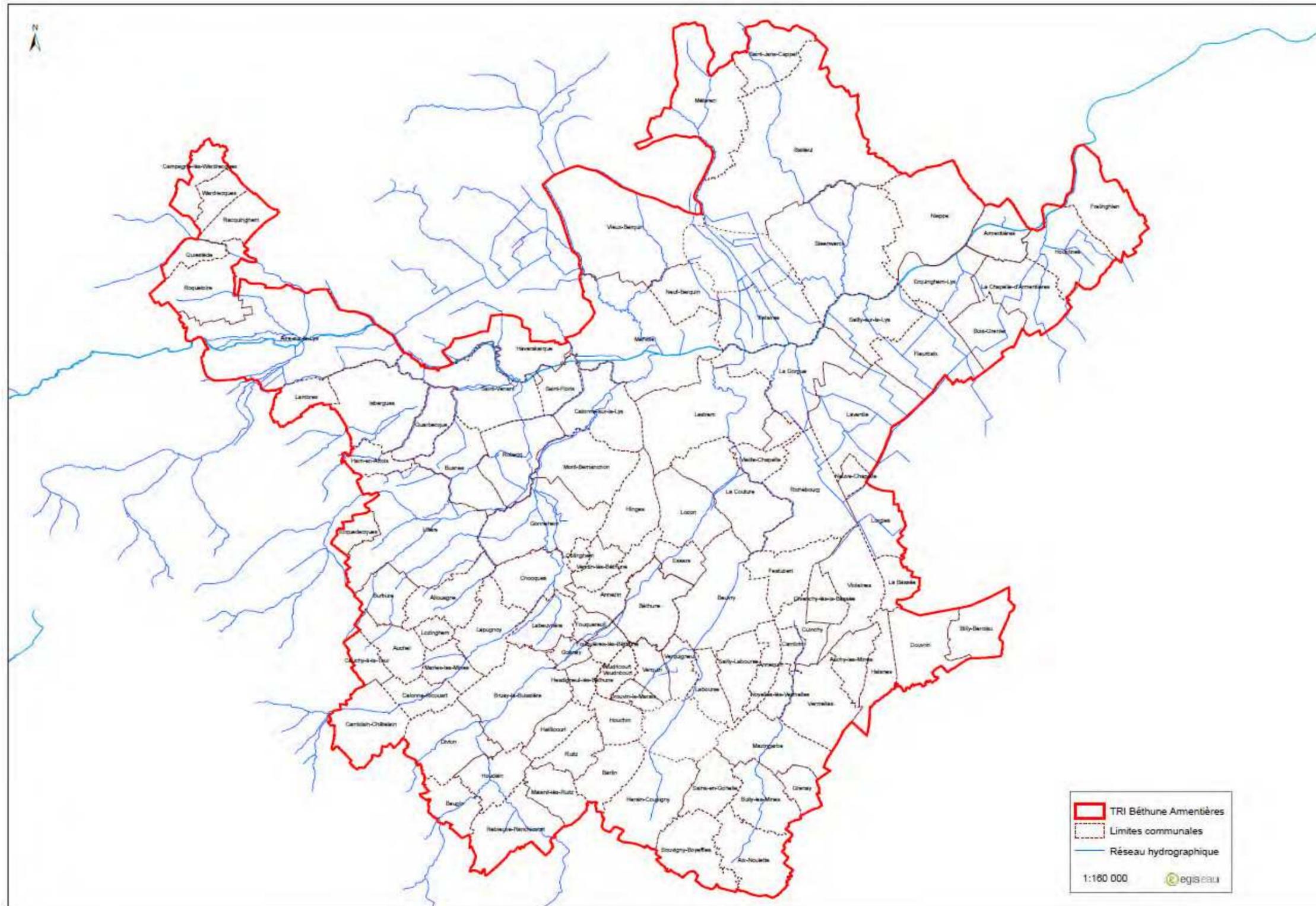
Le territoire du TRI Béthune-Armentières ne reprend pas l'ensemble du bassin versant de la Lys, mais regroupe 106 communes (dont 87 dans le département du Pas-de-Calais et 19 dans le Nord), sur un territoire d'environ 950 km².

Les unités hydrographiques concernées et localisées dans le périmètre du TRI Béthune-Armentières sont les suivantes:

- La Lys Rivière puis la Lys canalisée,
- La Bourre,
- La Becque de la Méteren,
- La Becque de St Jans Cappel,
- La Lawe amont et aval,
- La Loisne et Surgeon,
- La Clarence amont et aval,
- Le Guarbecque, la Busnes et la Demingue
- Le Grand Nocq,
- La Laquette,
- La Melde.

La carte suivante superpose la limite administrative du TRI Béthune – Armentières avec le réseau hydrographique principal.

Figure 1 : Cartographie des communes localisées sur le territoire du TRI



Chapitre 2 Hydrologie et hydraulique calée - Etudes de faisabilités et d'inondabilité

Pour le calcul des débits extrêmes puis pour la réalisation des cartes d'inondation, il a été retenu et validé le choix de réaliser de nouvelles simulations à partir des différents modèles hydrauliques calés réalisés dans le cadre des études antérieures.

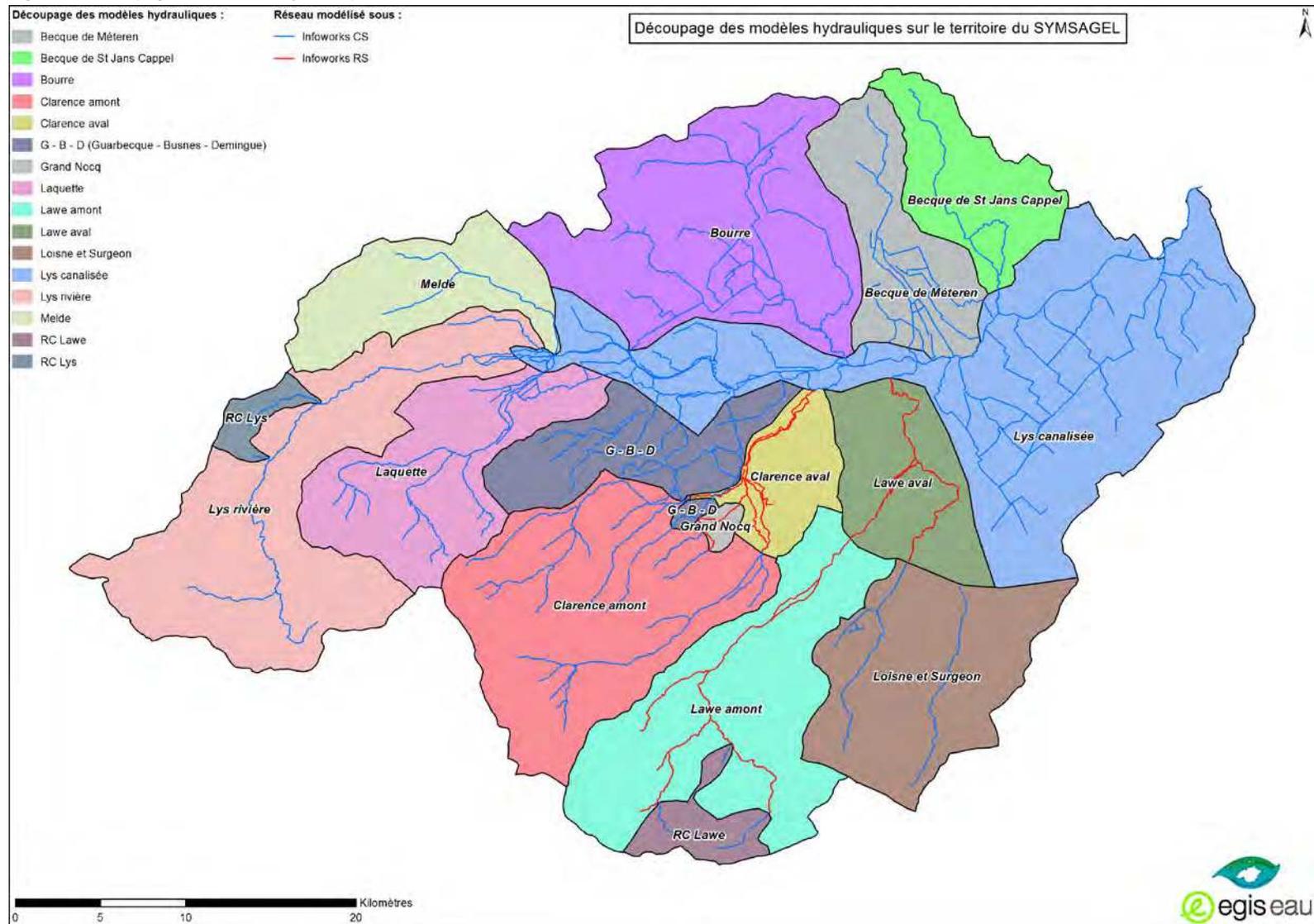
Le chapitre suivant présente les hypothèses de calage des modèles hydrauliques de chaque bassin versant sur le territoire du TRI Béthune-Armentières.

Remarque : Les modèles hydrauliques des différents bassins versants n'ont pas été réalisés par les mêmes prestataires. Il en ressort un degré de détail variable d'explication vis-à-vis des modèles hydrauliques. Par ailleurs, tous les modèles n'ont pas été élaborés dès le début avec le même logiciel de modélisation. Toutefois, ils ont été homogénéisés lors de l'étude d'inondabilité en 2012 par EGIS Eau.

Les paragraphes suivants présentent en détail les caractéristiques morphologiques des bassins versants prises en compte dans les différents modèles de façon spécifique, puis les hypothèses de calage du modèle hydraulique, pour les principaux cours d'eau qui alimentent la Lys :

- La Bourre ;
- La Lawe ;
- La Loisine et le Surgeon ;
- La Lys amont ;
- La Météren Becque et la Grande becque de St Jans Cappel ;
- La Clarence et le Guarbecque ;
- La Laquette ;
- La Lys rivière.

Figure 2 : Découpage des modèles hydraulique sur le territoire du SYMSAGEL et réseau modélisé



2.1 Extrait du rapport de faisabilité pour les aménagements sur le bassin de la Bourre – Calage du modèle hydraulique et pluies de référence

2.1.1 Construction et calage du modèle hydraulique

2.1.1.1 Choix du logiciel de modélisation

La modélisation de la Bourre et de ses canaux a été réalisée avec le logiciel INFOWORKS CS, parfaitement adapté aux cours d'eau artificialisés et/ou aux fossés de petit gabarit, aux contextes ruraux (prise en compte des effets de saturation / désaturation des sols agricoles).

Ce logiciel est capable de décrire et de quantifier les comportements d'un réseau hydrographique complexe présentant des défluences / confluences, des singularités hydrauliques, des sections complexes de lit majeur... Il permet de générer des hydrogrammes, de calculer des débits de pointe, des vitesses d'écoulements en lit mineur et majeur, des hauteurs d'eau, des taux de remplissage, des volumes de stockage,...

Le logiciel Infoworks, utilisé pour la modélisation, rend compte des conditions de transit en fonction du temps, après un calcul préalable de transformation pluie-débit.

La génération de ces hydrogrammes de temps de pluie retranscrit le temps de réponse du réseau face à une pluie donnée et permet ainsi de **positionner précisément, et de comprendre l'origine, des éventuels désordres hydrauliques** mis en évidence par la simulation (contrainte aval, insuffisance intrinsèque de la section d'écoulement...).

2.1.1.2 Caractéristiques générales du bassin de la Bourre

Le réseau hydrographique de la Bourre et de ses canaux est un système complexe où l'influence humaine joue un rôle important.

La Borre Becque reçoit les eaux de la Foëne Becque sur la commune de Hazebrouck. A l'aval, la Borre Becque traverse les communes de Wallon-Cappel et Hondenghem.

La Becque de Foëne (nommée Ruisseau du Galge, à partir de la commune de Caëstre) parcourt environ 5 km avant de confluer dans la Borre Becque.

Chaque becque reçoit les eaux de deux petits affluents, en particulier la Becque de Bréarde rejoint la Borre Becque en aval du franchissement de la RD916 et la Hondsteene Becque la Becque de Foëne en aval de la RD 161.

A l'aval de la confluence de la Becque de Foëne, la Borre Becque traverse la commune de Hazebrouck (à l'est de la ville) et reçoit les eaux d'une petite becque (la Noord Becque) en aval du lieu-dit « La Capellerie », puis franchit la RN 42 et une voie SNCF.

Le tracé à ce niveau se présente sous la forme d'un canal rectifié. Deux points de singularité (coudes) se suivent au droit du lieu-dit « Temple Acker ». A l'aval du deuxième coude, la Borre Becque est nommée la BOURRE.

La Bourre s'écoule en direction du sud vers Merville et traverse en premier lieu la RD 53, puis longe le Bois de Hazebouck de la Forêt Domaniale de Nieppe. Après avoir franchit la RD 188, elle reçoit les eaux du Bras de la Bourre au niveau du Bois d'Aval.

Dans le Bras de la Bourre confluent les eaux de la Papote Becque et du Morbecque via le siphon des Trois Planches, apport très irrégulier par « vague ». S'y jette également une partie des eaux du canal d'Hazebrouck (lorsque la vanne est ouverte).

Un kilomètre à l'aval de cette confluence, le Canal du Pré à Vin conflue dans la Bourre au droit de l'écluse du Grand Dam. Les apports provenant de ce canal sont très importants puisqu'ils concernent

le Canal d'Hazebrouck et le canal de la Nieppe (le Canal d'Hazebrouck et le canal de la Nieppe confluent dans le Canal du Pré à Vin au droit de l'écluse de la Motte au Bois).

A noter que le canal de Nieppe est alimenté, en partie par la Petite Steenbecque, la Grande Steenbecque, ainsi que la Melde du Nord (dont un autre exutoire est la Lys canalisée par pompage, par temps de crue).

A l'aval de la Forêt de Nieppe, la Bourre s'écoule sur 7.5 km, en suivant son tracé naturel, avant d'entrer dans la ville de Merville. A noter la contribution d'une becque supplémentaire, en rive gauche, la Plate Becque, en amont de Merville.

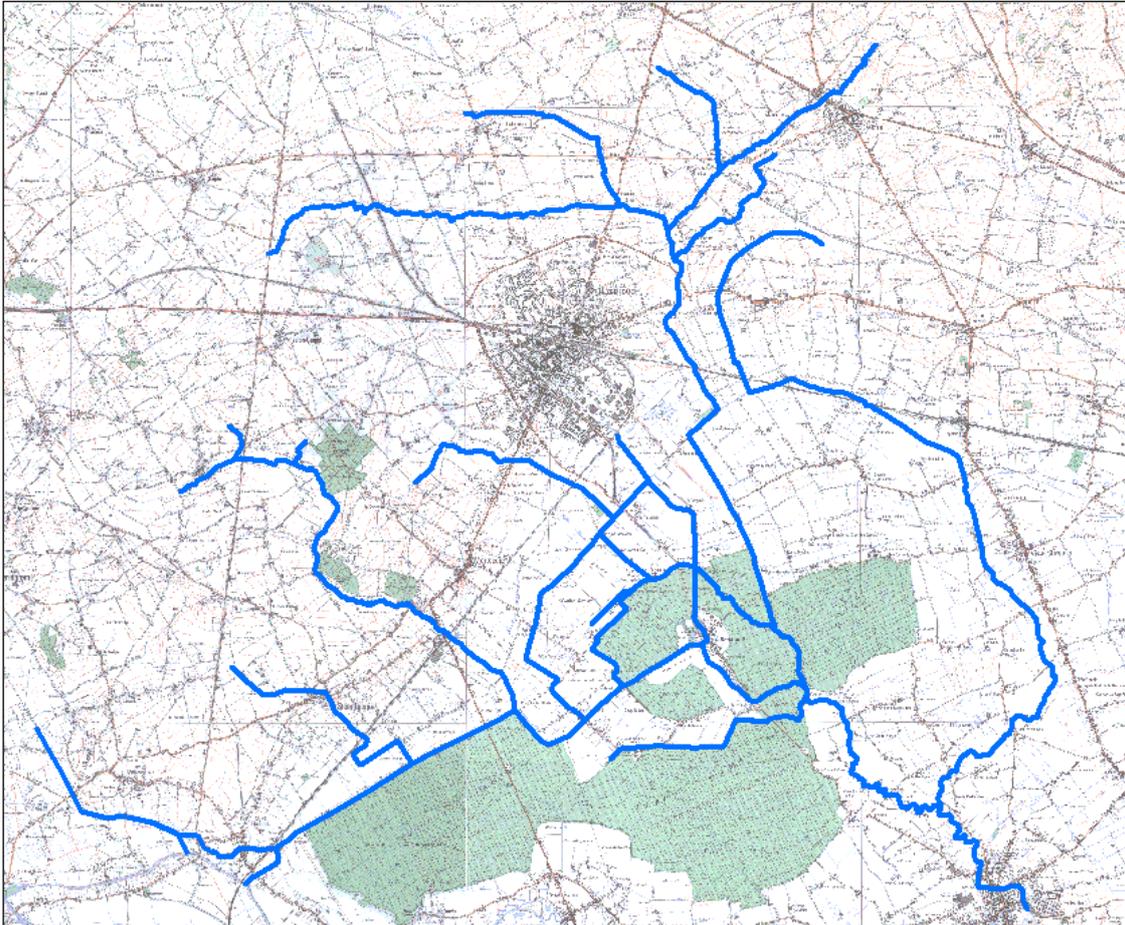


Figure 3 : Hydrographie du bassin versant de la Bourre et ses canaux

Le bassin versant de la Bourre, d'une superficie globale d'environ 20 000 ha, se scinde en trois zones différenciées de par les pentes :

- Les collines (jusqu'à la RN42)
- La plaine centrale (jusqu'à l'aval de la Forêt de Nieppe)
- La plaine de la Lys (jusqu'à Merville)

L'occupation des sols du bassin versant de la Bourre et de ses canaux a été extraite, dans une première approche globale, de CORINE Land Cover.

L'analyse de cette base de données géographiques, permet de distinguer plusieurs types d'occupation du sol, sur le bassin versant :

Dans le cadre de la modélisation, les classes d'occupation du sol ont été fusionnées en quatre catégories : zones artificialisées, cultures, prairies et forêts.

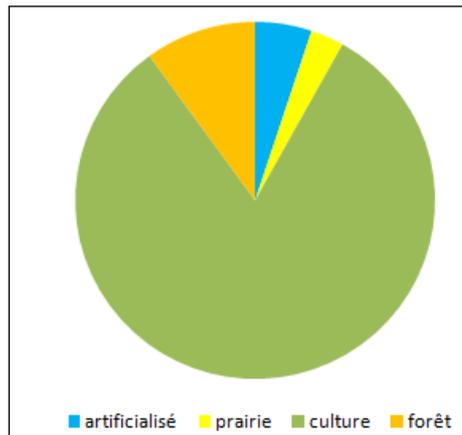


Figure 4 : Occupation des sols – graphique à secteurs

L'ensemble du bassin versant est exploité à hauteur de 80% par des pratiques agricoles. 10% est occupé par la forêt domaniale de la Nieppe, 5% par des zones artificialisées et 3% par des prairies.

2.1.1.3 Calage du modèle hydraulique de la Bourre

Principe de calage

Le calage d'un modèle de simulation consiste en l'ajustement des différents paramètres variables du modèle, afin de reproduire de manière satisfaisante, au moyen de ce modèle, des phénomènes mesurés. En l'occurrence, il s'agit, pour des précipitations identiques à celles mesurées, que le modèle restitue des volumes, des débits, et des conditions d'écoulements, quantitativement et qualitativement approchant des valeurs mesurées, au point de mesures considéré.

Les paramètres d'ajustement hydrologique sont :

- les coefficients de ruissellement (apports des surfaces peu ou pas imperméabilisées), qui dépend étroitement de l'occupation des sols et de leurs caractéristiques pédologiques,
- la fraction contributive réelle apparentée, produit d'un coefficient de ruissellement et d'une surface non mesurable (apports des surfaces imperméabilisées réellement connectées),
- le coefficient de routage lorsque le chevelu de collecte n'est pas modélisé (fossés de routes et agricoles, antennes des réseaux de collecte).

Les paramètres d'ajustement hydraulique sont :

- les pertes de charges linéaires (rugosités des lits mineur et majeur, coefficients de Strickler des conduites),
- les pertes de charges singulières (au niveau des coudes, des ouvrages hydrauliques,...)
- les coefficients de débit d'ouvrages de contrôle (ajutages, vannes, orifices, déversoirs...).

Pour être validés, les calages doivent être reproductibles entre deux évènements de nature similaire.

L'importance des conditions de saturation des sols sur ces bassins versants à dominante rurale, implique un calage saisonnier :

- Calage « été » : pour des évènements de type orageux, survenant sur des sols relativement peu (voir pas) saturés ;
- Calage « hiver » : pour des pluies longues, successives survenant sur des sols saturés ou en cours de saturation.

Pluviométrie

Les mesures pluviométriques dont nous disposons sont comprises entre 2007 et 2011. Les évènements remarquables en termes de cumul de pluie sont les suivants :

- Mars 2008
- Novembre 2008
- Novembre 2009
- Fin Février/Début Mars 2010

Afin de caractériser la pluviométrie du bassin versant, nous nous sommes focalisé sur les données enregistrées par les pluviomètres de Borre et Doulieu.

Ces deux postes (gérés par la DIREN du Nord-Pas-de-Calais), garantissent une fiabilité de la mesure enregistrée et une longue chronique pluviométrique, de plusieurs années.

La répartition mensuelle de la pluviométrie à Borre et à le Doulieu est fournie dans le Tableau 1, qui engendre les remarques suivantes:

- Les mois pluvieux, c'est-à-dire avec une pluviométrie supérieure à 60 mm/mois, s'étalent de Septembre à Décembre pour la station de Borre et de Juillet à Novembre pour la station du Doulieu ;
- Une pluviométrie estivale représentative de la moyenne, à l'exception du mois d'Août à la station du Doulieu se caractérisant par le mois le plus pluvieux de l'année.

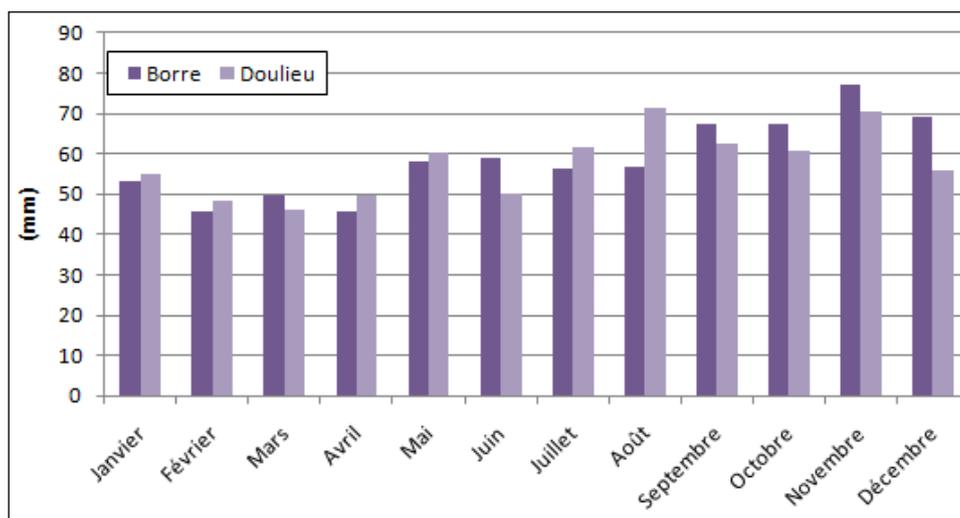


Figure 5 : Précipitation mensuelle à la station de Borre et Doulieu

Pluviomètre	Borre	Doulieu
Chronologie	1966-2006	1994-2006
Janvier	53.1	55
Février	45.6	48.5
Mars	49.5	46.1
Avril	45.7	49.5
Mai	58.3	60.3
Juin	59.1	49.9
Juillet	56.3	61.8
Août	56.6	71.2
Septembre	67.4	62.4
Octobre	67.2	60.9
Novembre	77.1	70.4
Décembre	69	55.9
total annuel	704.9	691.8

Tableau 1 – Répartition mensuelle de la pluviométrie à Borre et au Doulieu (de l'annuaire 2006 – DIREN Nord-pas-de-Calais)

Les évènements pluviométriques enregistrés seront issus du pluviomètre de Borre.

Afin de caractériser des pluies, le Tableau 2 présente la relation Intensité-Durée-Fréquence de la station de Borre pour des pluies de longue durée et de périodes de retour données.

Jours	Période de retour (ans)				
	5	10	20	50	100
1	39	45	50	58	63
2	53	61	68	78	86
3	59	68	75	86	93
4	65	74	82	92	100
6	75	84	93	105	113
10	95	107	119	134	145

Tableau 2 –Intensité-Durée-Fréquence à la station de Borre

Juillet 2007

Deux évènements pluviométriques ont fait l'objet d'un arrêté de catastrophes naturelles, en Juillet 2007 :

- le 20 Juillet 2007 sur la commune de Caëstre
- le 23 Juillet sur plusieurs communes (Caëstre, Hazebrouck, Pradelles et Vieux-Berquin) de la côté est du bassin versant de la Bourre.

Le cumul de pluie journalière enregistrée à la station de Borre est reportée sur le tableau suivant :

Jour/Mois/2007	18/7	19/7	20/7	21/7	22/7	23/7	24/7	25/7
mm de pluie précipités	0	27,4	11,4	5,1	0,2	44,6	0,1	0,1

Tableau 3 – Cumul de pluie par jour – Juillet 2007

En cinq jours de pluie (du 19/07 au 24/07) la précipitation totale s'élève à 88,7 mm dont :

- 38,8 sont les millimètres tombant pendant les trois heures entre le 19 et le 20 Juillet,
- 44,6 mm, cumulé durant la journée du 23 Juillet.

La caractérisation de la pluie de Juillet 2007 à partir des mesures horaires est représentée sur la Figure 4:

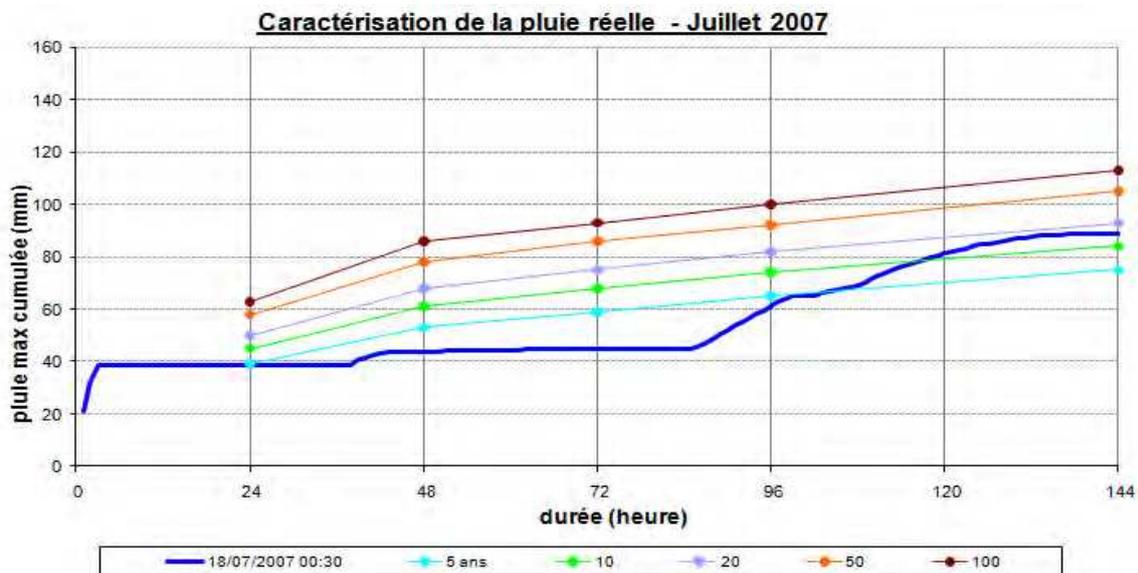


Figure 6 : Caractérisation de la pluie du 18 au 24 Juillet 2007 – IDF de la station Borre

La période de retour sur sa totalité (six jours) est estimée à 20 ans.

Novembre 2008

La figure ci-après illustre le hyétogramme enregistré entre Novembre et Décembre 2008 à la station de Borre avec un pas de temps d'une heure.

Remarque : Les données absentes ont été extrapolées et lissées à partir des données journalières (début Novembre).

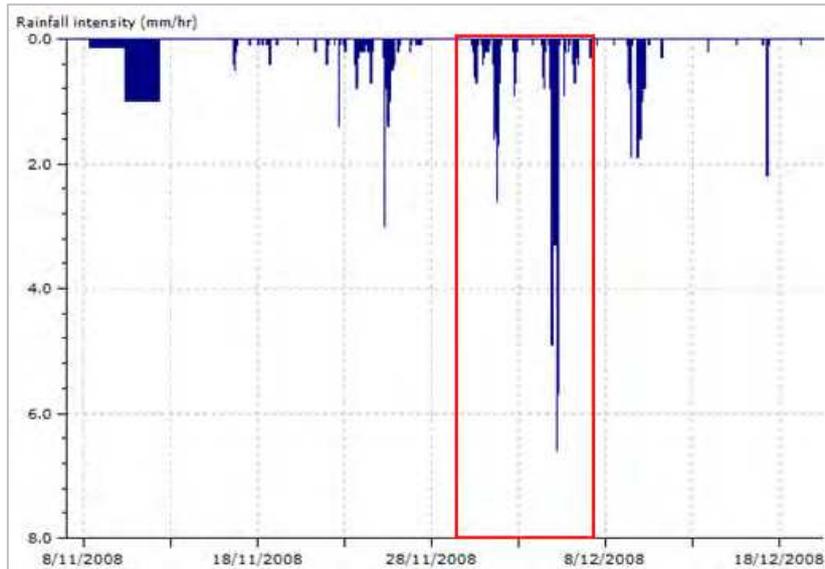


Figure 7 : Hyétogramme à la station Borre de la DIREN – Novembre-Décembre 2008

L'encadré met en évidence l'évènement pluviométrique le plus important sur une période de dix jours entre novembre et Décembre 2008.

Cette pluie a une période de retour inférieure à un évènement quinquennal, mais supérieure à un évènement annuel.

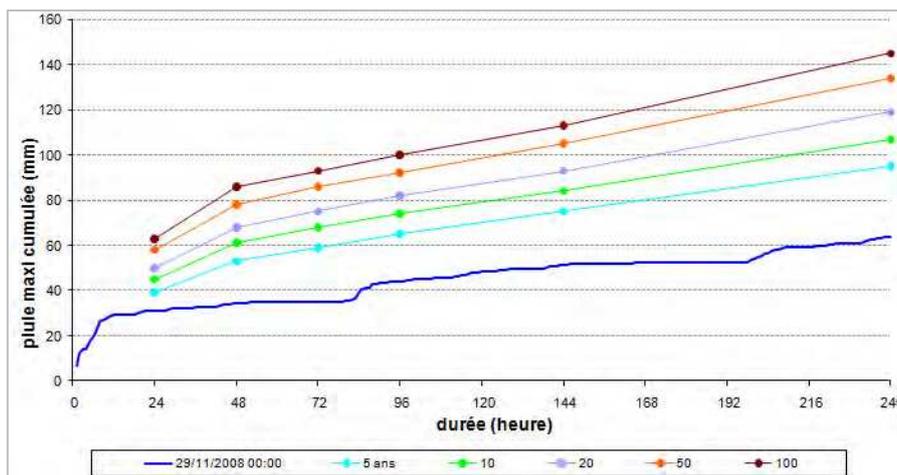


Figure 8 : Caractérisation de pluie réelle de fin Novembre 2008- début Décembre – station de Borre

Novembre 2009

La pluie cumulée durant le mois de Novembre 2009 (186,8 mm), dépasse largement la moyenne mensuelle qui s'élève à 77,1 mm.

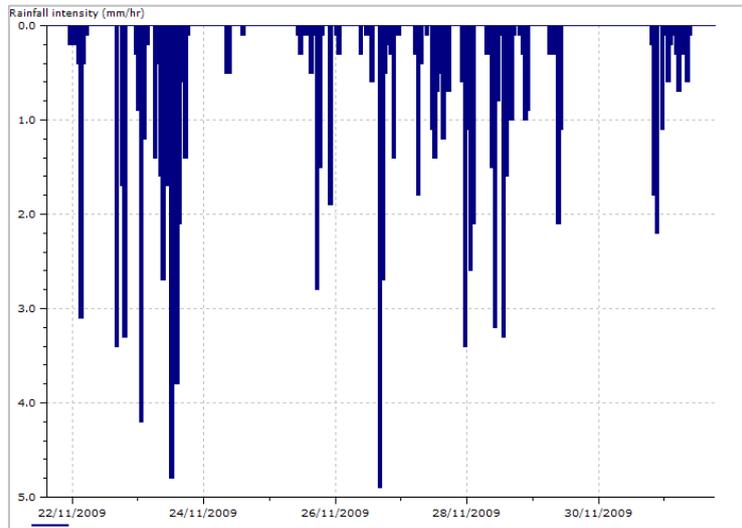


Figure 9 : Hyéogramme à la station de Borre – Novembre/Décembre 2009

La période de retour de la lame d'eau mensuelle, est estimée à 10 ans. A noter le cumul plus exceptionnel encore de 107,1 mm d'eau en 10 jours seulement.

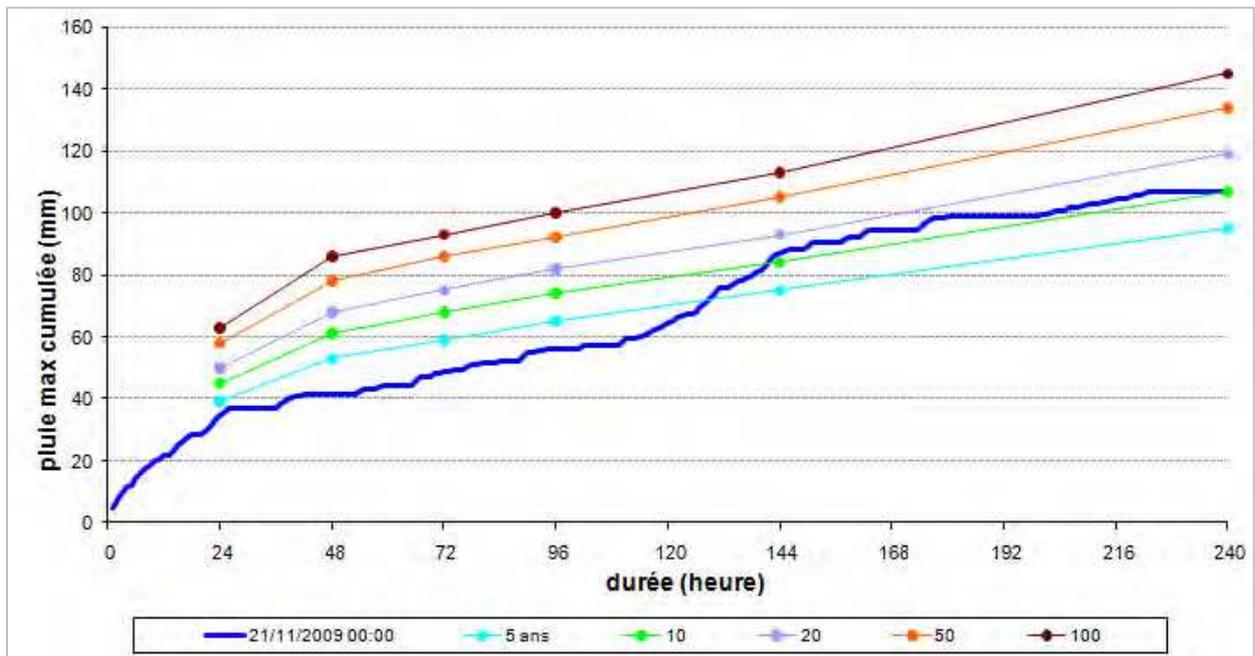


Figure 10 : Caractérisation de la pluie réelle – novembre-décembre 2009

Février/Mars 2010

Le poste pluviométrique sur la commune de Steenbecque a été installé lors d'une campagne pluviométrique réalisée par le SYMSAGEL.

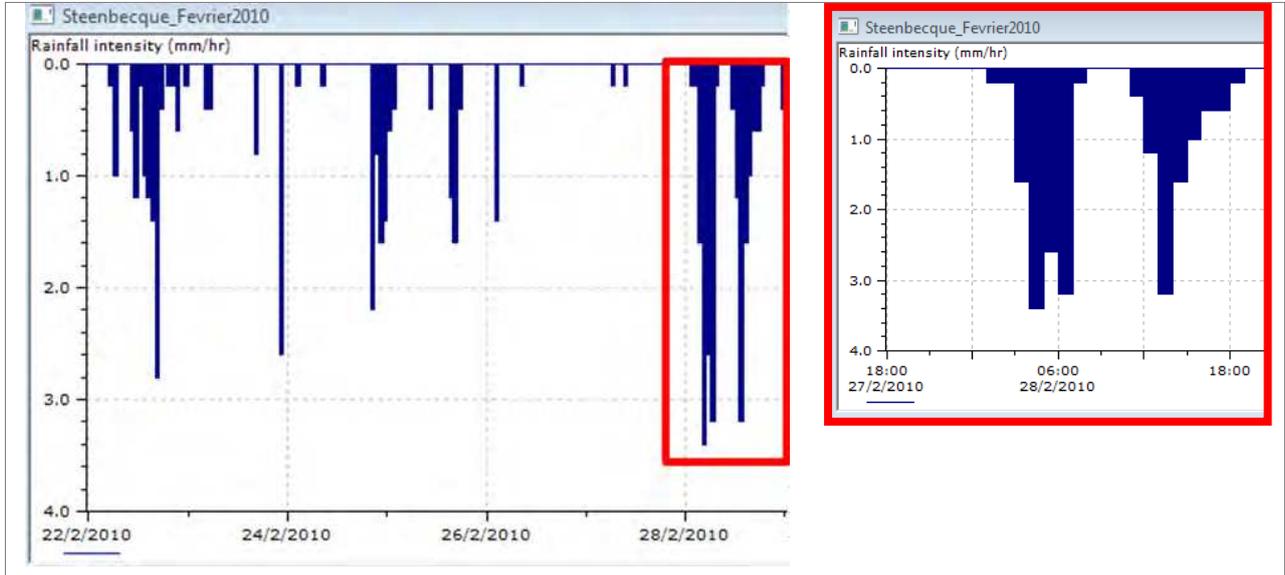


Figure 11 : Hyétoqramme observé à la station de Steenbecque

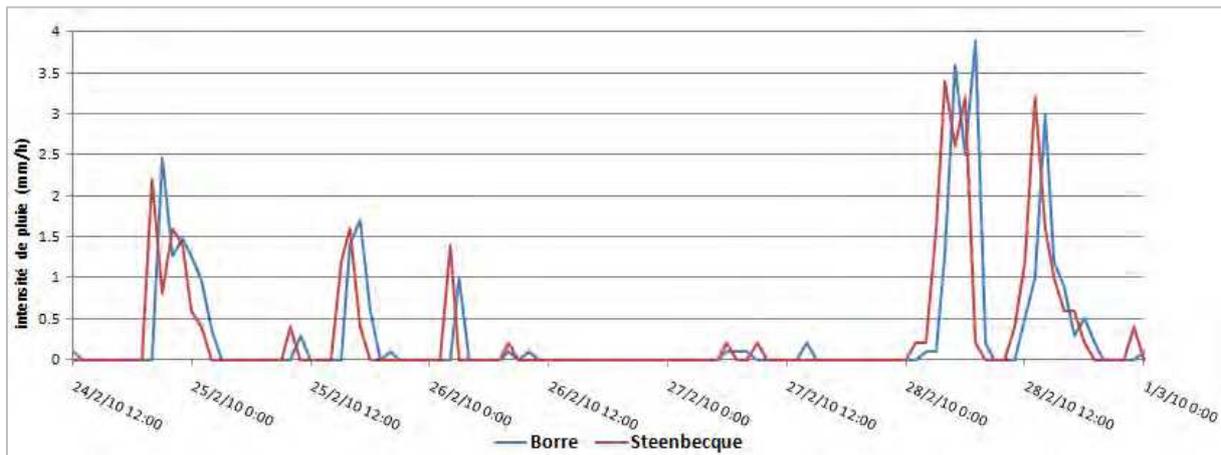
La figure ci-dessus illustre le hyétoqramme observé à la station de Steenbecque pendant les dix jours (du 22 Février au 2 Mars 2010) qui précède le pic de crue. La pluie cumulée en dix jours est de 49,6 mm.

Le pic de crue sur la Grande Steenbecque est engendré par la succession de deux pics de pluie (figure ci-après). Un premier de 11,4 mm, et un deuxième de 8,8 mm.

Afin de caractériser cette pluie en termes de période de retour, elle a été comparée à celle observée au pluviomètre de Borre.

Le graphique met en évidence que les mesures de Steenbecque sont comparables à celles de la station Borre. L'évènement météorologique se déplace en direction est-ouest et l'évolution des deux évènements pluviométriques est similaire. De ce fait, on peut affirmer la validité des observations à Steenbecque.

Le cumul de pluie sur dix jours (du 19/2/2010 au 01/03/2010) est de 53,7 mm.



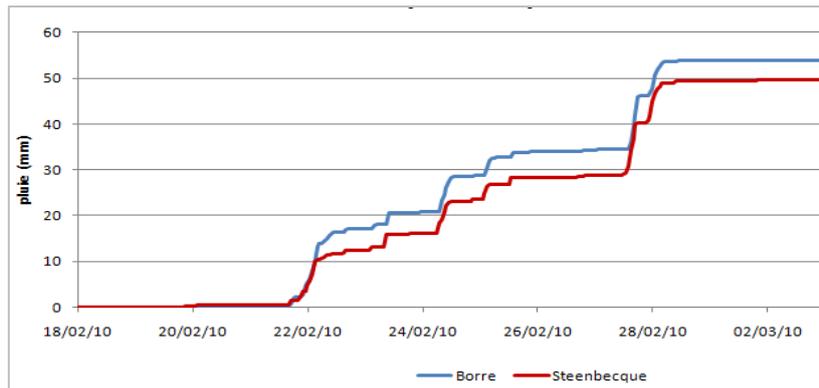


Figure 12 : Comparaison des hyétogrammes enregistrés à la station de Steenbecque et Borre

Mesures de débit

Plusieurs points de mesure ont été installés sur le réseau hydrographique du bassin versant de la Bourre. On compte :

- quatre capteurs HV qui mesurent indirectement le débit
 1. Le long de la Borre Becque, au droit du Pont de la Creule, en amont de la confluence de la Foène Becque
 2. Le long de la Borre Becque au lieu dit « la Capellerie »
 3. Le long de la Grande Steenbecque
 4. Le long de la Petite Steenbecque à l'aval de la voie ferrée
- un capteur limnimétrique sur la Bourre en amont de la confluence de la Plate Becque au droit du Pont à Loup qui ne donne aucune information sur le débit écoulé et donc sur le volume. Leur localisation est visible sur la figure ci-après.

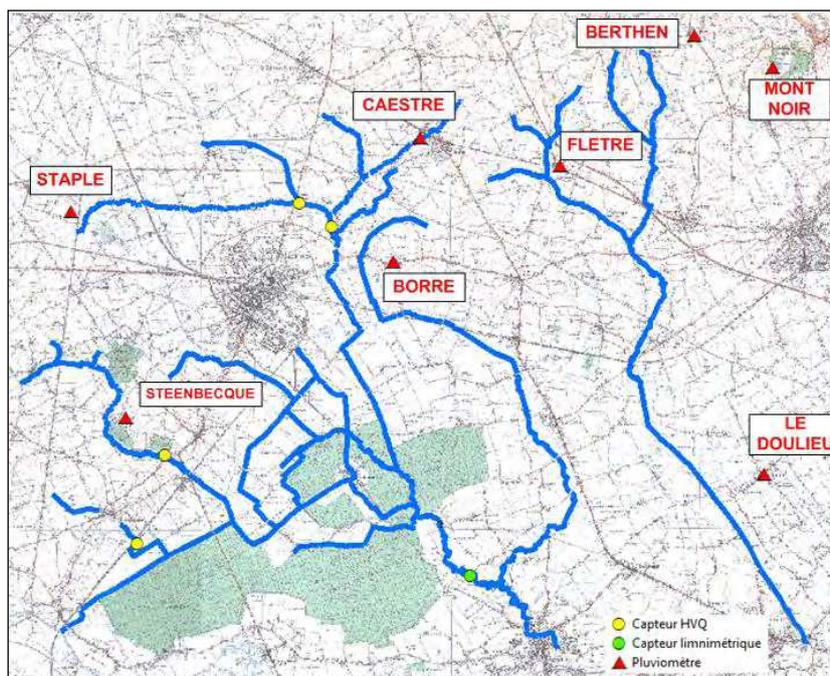


Figure 13 : Localisation pluviomètres et stations de mesure sur le bassin versant de la Bourre

Pluie de calage

Le choix de la pluie de calage a été réalisé sur la base de l'intensité pluviométrique et de la réaction en termes de volumes et de débits, au niveau du cours d'eau pour chaque évènement.

Le Tableau 4 synthétise toutes les informations disponibles.

EVENEMENTS	PLUVIOMETRES	STATION DE MESURE
mars-08	Staple Caestre Borre	Borre Steenbecque Merville (H)
nov-08	Berthen Mont noir Doulieu Borre	Hazebrouck (H/V/Q) Merville (H)
déc-09	Borre Doulieu	Merville (H)
Fin Février/début Mars 2010	Doulieu Borre Caestre Steenbecque	Foene Grande Steenbecque Petite Steenbecque

Tableau 4 - Liste de postes de mesure pour chaque évènement météorologique

L'évènement météorologique de Novembre/Décembre 2008 s'avère le plus indiqué pour le calage, notamment grâce aux suivis de la réaction des cours d'eau :

- la station d'Hazebrouck, sur la Borre Becque, permet le calage des apports des bassins versants de la Borre Becque et du Ruisseau du Galge-Foëne Becque. Les valeurs mesurées concernent la hauteur d'eau, mais également la vitesse et le débit.
- la station limnimétrique de Merville, installée sur la Bourre, permettra le calage, en parallèle, de la totalité du bassin versant. A noter que seule la hauteur d'eau est enregistrée. Pour cette raison, l'évènement de décembre 2009 a été écarté dans le choix de la pluie de calage.

Le calage du bassin versant a été affiné sur la Grande et Petite Steenbecque grâce aux données de février/Mars 2010.

Les postes pluviométriques qui ont observés l'évènement de pluie du 2008 sont ceux de Berthen, Borre, Doulieu et Mont Noir.

Le tableau ci-après résume le cumul de pluie maximal tombé lors du pic de crue du 5 Décembre.

Cumule de pluie (mm)				
Pluviomètre	BERTHEN	BORRE	LE DOULIEU	MONT NOIR
Du 30/11/2008 au 09/12/2008	0.8	63.7	22.9	57.6

La pluviométrie retenue pour la phase de calage est celle enregistrée au niveau du pluviomètre de Borre (station pluviométrique DIREN).

Tableau 5 – Cumul de pluie enregistré sur plusieurs stations pluviométriques pour l'évènement de calage

Les postes pluviométriques qui ont observés l'évènement pluviométrique de **fin février/ début mars 2010** sont ceux de Borre, Caëstre, le Doulieu et Steenbecque.

Cette pluie sera utilisée pour le calage de la Grande Steenbecque. De ce fait, le pluviomètre le plus représentatif sera celui de Steenbecque.

En conclusion, pour chaque point de mesures, le calage a été différencié en termes de pluies de calage.

- Calage de la Borre becque et Galge/Foëne Becque (Q et H) face à l'évènement Décembre 2008 ;
- Calage de la Grande Steenbecque (Q et H) face à l'évènement de février / mars 2010 ;
- Calage global du bassin versant de la Bourre en fonction des données limnimétriques face à l'évènement pluvieux de Novembre 2009.

Courbes de calage

Calage de la Borre Becque et de la Becque de Foëne

Le coefficient de restitution des sols correspond au ratio du volume mesuré à Hazebrouck sur le volume d'eau s'abattant sur les versants.

Les orages (d'été) surviennent pendant des périodes où les sols sont peu saturés (pas ou peu de phénomène de ressuyage) et le niveau des nappes est relativement bas : l'occupation des sols peut en revanche être très variées durant la saison orageuse qui s'étend presque de mars à novembre.

En été, le coefficient de ruissellement peut être proche du coefficient de ruissellement.

En revanche, hors période estivale, les coefficients de restitutions traduisent des apports de nappes très importants, qui se rajoutent aux apports de ruissellement.

Borre Becque et Galge				
	Pluie tombée	Volume précipité	Volume écoulé au droit du point de mesure	Cr
	(mm)	(m ³)	(m ³)	
28/11/2008-7/12/2008	52.3	5 389 515	1 611 156	0.29
21/11/2008-12/12/2008	83.6	8 614 980	2 714 234	0.31

Tableau 6 – Coefficient de ruissellement du bassin de la Borre Becque et du Galge/Becque de Foëne

En hiver 2008, Les coefficients de restitution globaux apparaissent comme relativement élevés avec une moyenne de 0.31. Toutefois, en affranchir des apports de nappe, les coefficients de ruissellement calculés apparaissent nettement plus faibles.

Afin d'obtenir une courbe de calage très représentative de l'évènement du Novembre 2008, les coefficients de ruissellement agricoles ont été pris entre 15% et 23% en fonction de la pente des bassins élémentaires.

Le calage s'avère très satisfaisant avec un écart volumique (entre le volume observé et simulé) de l'ordre de 10% et une forme de l'hydrogramme tout à fait similaire.

De la même façon, le calage des hauteurs d'eau est tout à fait satisfaisant.

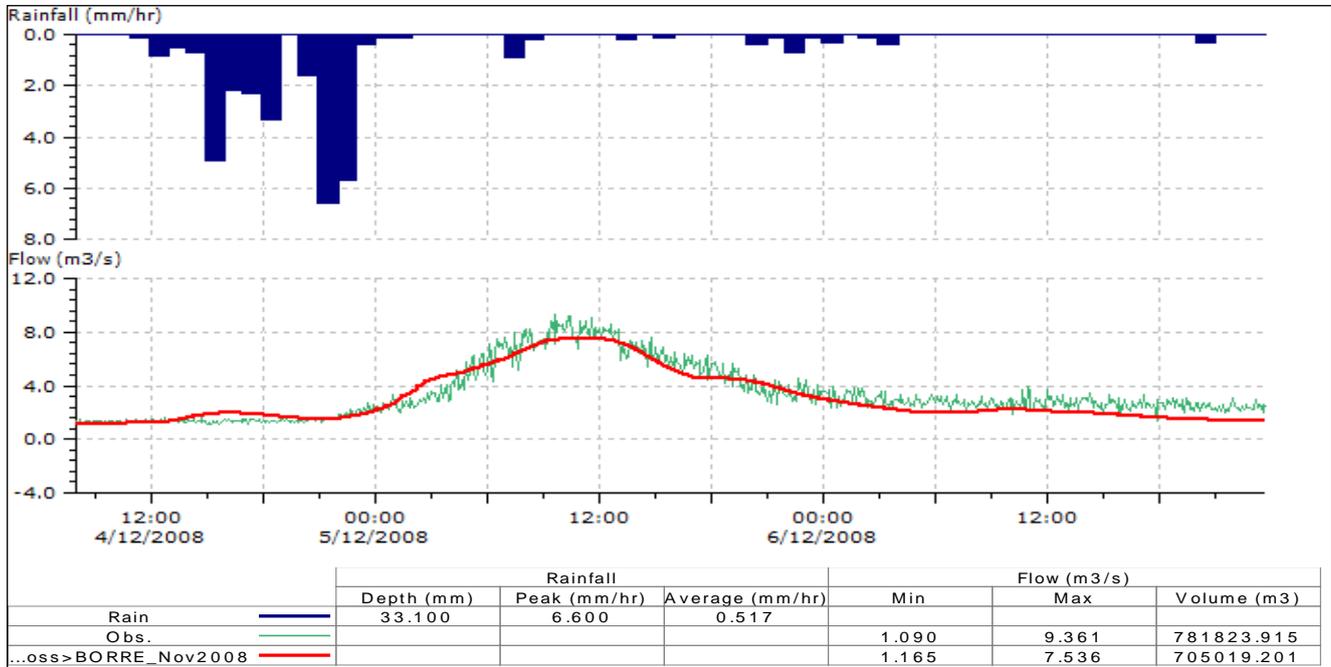


Figure 14 : Courbe de calage de la Borre Becque au lieu –dit « Le Peuplier » - Débit

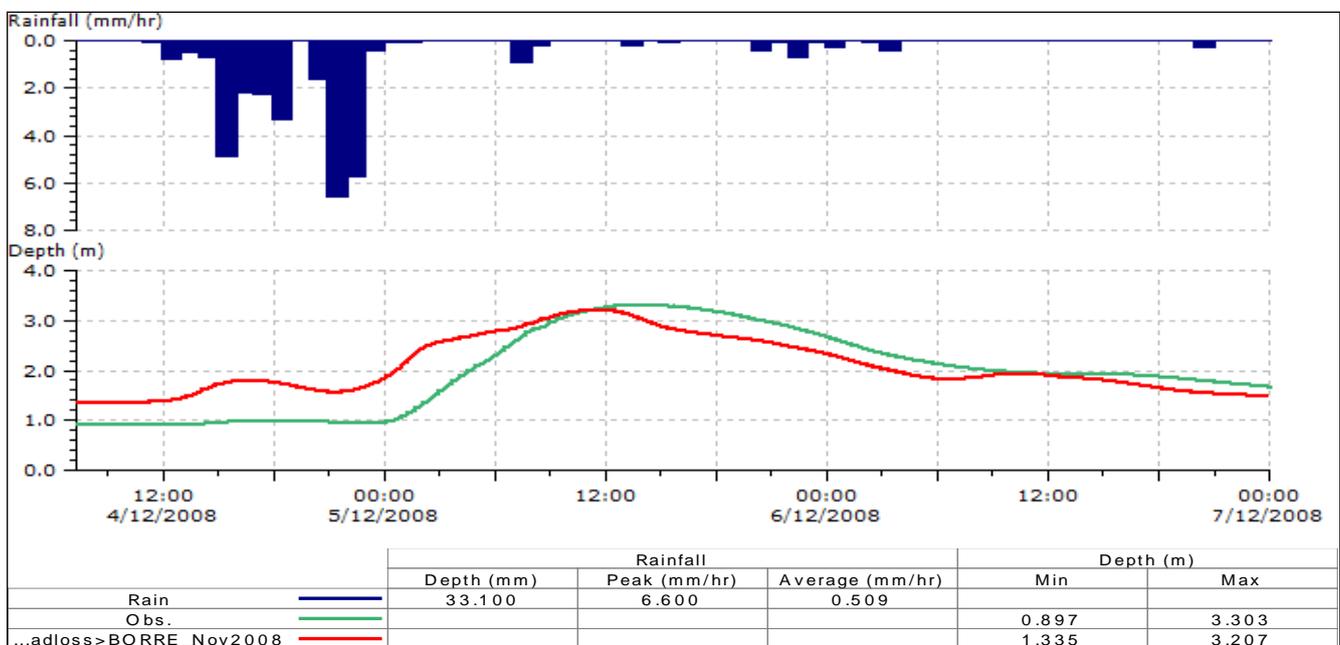


Figure 15 : Courbe de calage de la Borre Becque au lieu –dit « Le Peuplier » - Hauteur d'eau

Calage de la Grande Steenbecque

Le calage est réalisé avec la pluie de Mars 2010.

Le coefficient de ruissellement moyen, donné dans le tableau suivant, ne prend pas en compte les apports de nappe, qui ont été ajoutés en parallèle.

	Grande Steenbecque		
	Volume précipité (m3)	Volume écoulé au droit du point de mesure (m3)	Cr (affranchi de l'apport de la nappe)
28/2/2010-3/3/2010	350 000	70 000	0.20

Tableau 7 – Coefficient de ruissellement du bassin versant de la Grande Steenbecque

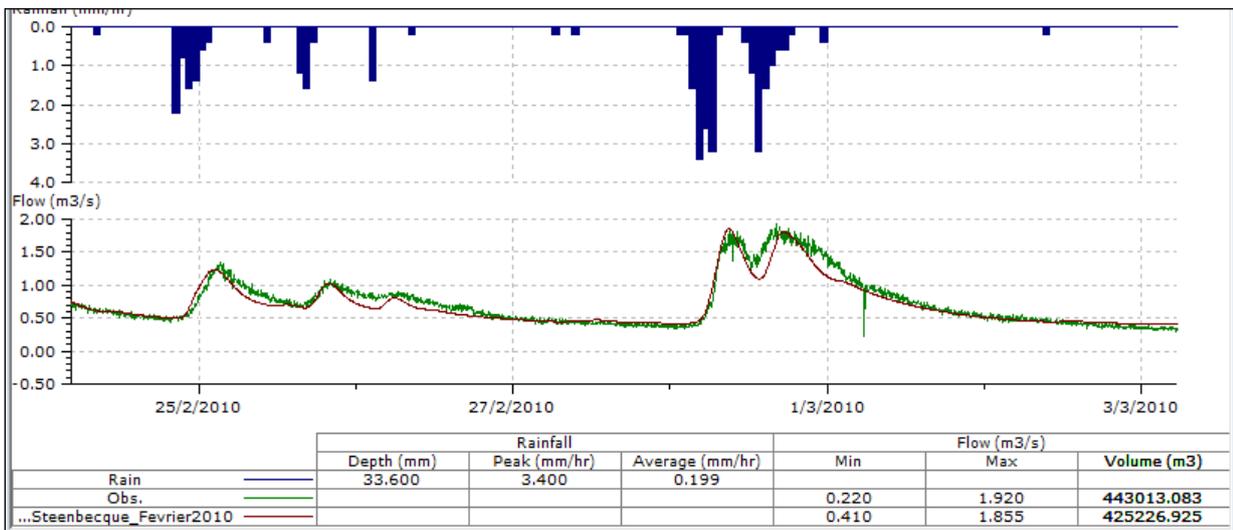


Figure 16 : Calage de la Grande Steenbecque – débit

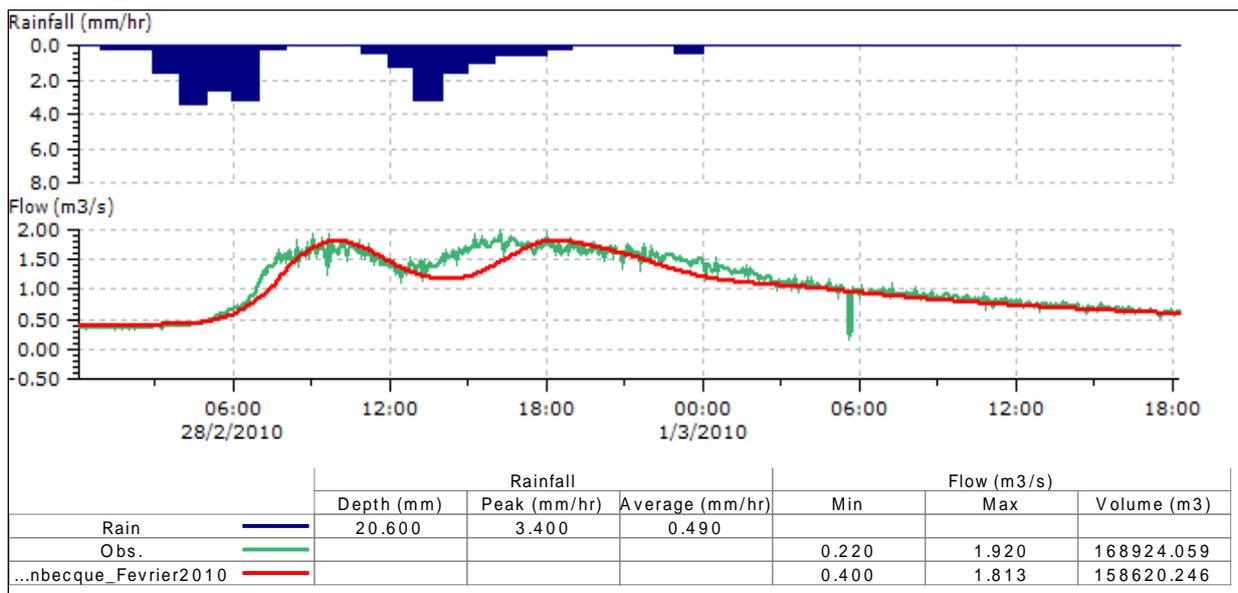


Figure 17 : Calage de la Grande Steenbecque – zoom du 28/2/2010 au 1/03/2010 - débit

La figure ci-dessus rend compte de la courbe de calage de la Grande Steenbecque à l'amont de la gare.

De la même façon, les écarts volumiques restent faibles entre les mesures et les calculs. La forme de l'hydrogramme est très bien rendue par le modèle.

Calage du bassin versant de la Bourre

L'évènement de calage est celui de Novembre 2009 pour lequel nous ne disposons que de mesures limnimétriques observées à Merville, à l'amont de la confluence avec la Plate Becque.

La Lys canalisée y représente une forte contrainte aval, compte tenu de la topographie très plate du territoire.

Le calage est réalisé sur le seul paramètre Hauteur d'eau.

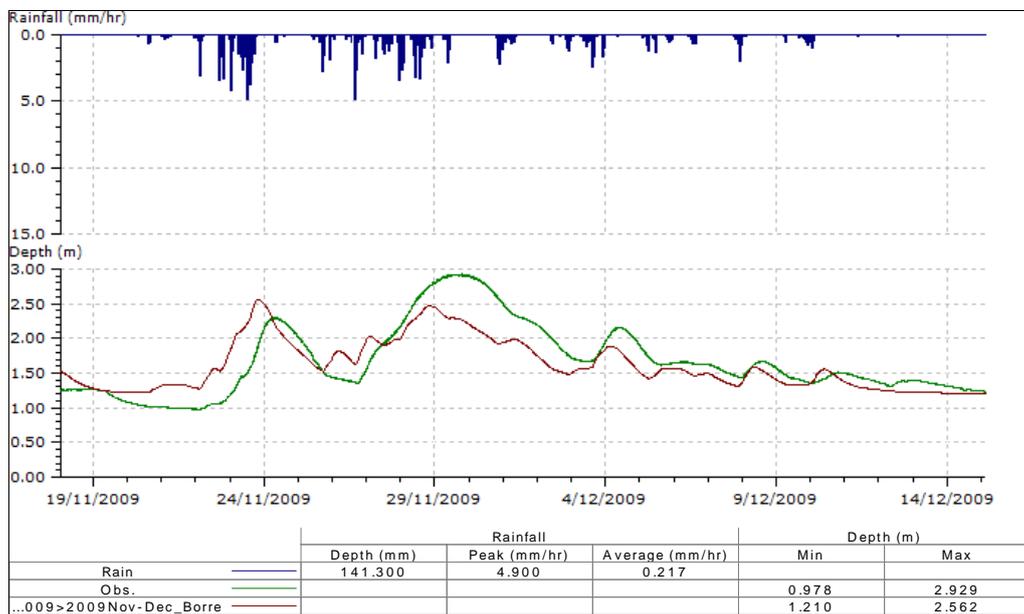


Figure 18 : Courbe de calage de la Bourre – hauteur d'eau

Afin d'apprécier l'impact de la contrainte aval, la suivante représente l'évolution des hauteurs d'eau enregistrées sur la Bourre au droit du Pont à Loup et à l'aval de l'écluse de Merville. Les deux courbes sont similaires.

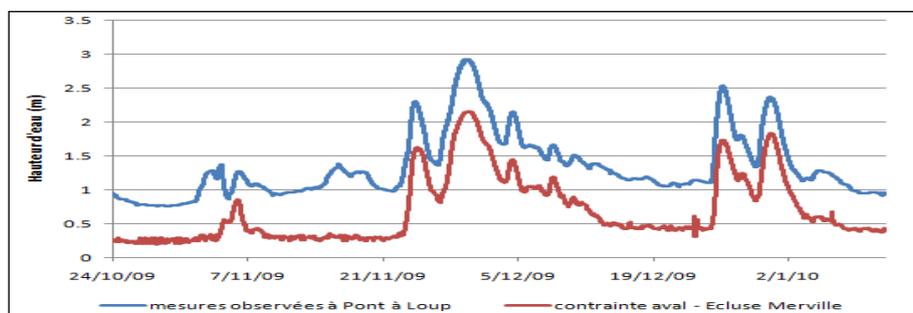


Figure 19 : Comparaison de la hauteur d'eau à Pont à Loup et à l'écluse de Merville

2.2 Extrait du rapport de faisabilité pour les aménagements sur le bassin de la Lawe – Calage du modèle hydraulique et pluies de référence

2.2.1 Caractéristiques morphologiques des bassins versants

Les bassins versants concernés par les sites d'étude possèdent une forte dominante rurale. En moyenne sur l'ensemble des sites, l'occupation des sols compte **près de 95% de terres arables et de prairies**.

Les pentes peuvent varier de manière importante entre l'amont des bassins versants (avec des pentes autour de 30%) et des pentes très faibles sur les parties aval, proches de l'exutoire.

D'après l'étude du PGEEC, les terrains sont essentiellement composés de :

- Limons sur versants pouvant contenir des formations à silex : ce type de sol est assez favorable au développement des ruissellements. Situés sur les versants, la pente aura une grande incidence sur les ruissellements
- Limons épais bien drainés : essentiellement présent au niveau des plateaux du bassin versant de la Lawe. La valeur agronomique de ces sols est importante. Ils sont propices au développement des phénomènes de ruissellement et leur confère une sensibilité à l'érosion.

Ainsi, globalement, les sols en place sur le bassin versant de la Lawe amont ont une tendance à la pénalisation des coefficients de ruissellement. D'autant plus que ce type de sol, lorsqu'il est à nu, développe facilement des phénomènes de battance, qui aggravent encore les phénomènes de ruissellement

Le tableau utilisé pour associer à chaque classe de pentes et type d'occupation du sol un coefficient de ruissellement est le suivant :

Pente %	Occupation du sol					
	Culture	Prairie	Bois	Bati isole	Bati dense	ZI
i<2%	0.12	0.03	0.02	0.20	0.30	0.65
2%<i<5%	0.20	0.08	0.05	0.20	0.30	0.65
5%<i<7%	0.27	0.11	0.07	0.25	0.30	0.70
7%<i<10%	0.33	0.14	0.09	0.25	0.35	0.70
10%<i	0.42	0.17	0.12	0.25	0.35	0.70

Tableau 8 : table des coefficients de ruissellement utilisés (sols lourds)

N° Bassin	Surface (ha)	Longueur d'écoult (m)	Longueur de ruisselltt (m)	Cote interm. (m)	Cote Aval (m)	Cote amont (m)	Cr	Pente moy. (%)
BRA01	348.00	0	4638	183	136	183	0.17	1
BRA02	148.20	0	4047	152	117	152	0.17	0.9
BRA05	383.80	0	3453	162	112	162	0.19	1.4
BRA13	116.18	0	3435	189	85	189	0.20	3
BRA11	244.63	0	4158	189	74	189	0.20	2.8
BRA14	59.90	0	2289	176	138	176	0.20	1.7

Tableau 9 : Caractéristiques des sous bassins versants étudiés

Remarque : les longueurs de ruissellement mesurées sur carte ont été majorées de 50% afin de prendre en compte la sinuosité réelle du trajet de l'eau en ruissellement sur des surfaces agricoles.

2.2.2 Hypothèse de calage du modèle hydraulique de la Lawe

2.2.2.1 Logiciel de modélisation

Les écoulements de la Lawe et de ses affluents ont été modélisés grâce au logiciel Mike 11 développé par le Danish Hydraulic Institute. Ce logiciel permet de créer un modèle unidimensionnel à casiers (modélisations d'écoulements unidimensionnels dans des biefs distincts reliés entre eux par des structures de déversement).

2.2.2.2 Calage du modèle hydraulique

Le calage sur Mike 11, consiste à régler les différents paramètres du modèle de telle sorte que ce dernier reproduise le plus fidèlement possible un ou plusieurs événements observés. Le calage du modèle hydraulique doit être recherché selon trois « dimensions » :

- Calage en débit : le débit restitué en tout point du modèle doit être le plus proche possible des débits observés durant les épisodes de calage. On portera une attention particulière aux débits de pointe.
- Calage en cote : les cotes restituées en tout point du modèle – et notamment les cotes de plus hautes eaux - doivent être les plus proches possibles des cotes observées durant les épisodes de calage.
- Calage temporel : cette dernière dimension renvoie à la propagation de la crue et aux concomitances entre les affluents et les cours d'eau principaux. Le modèle doit restituer convenablement les vitesses de crue observées.

Concrètement, les « paramètres » de calage sont les suivants :

- Les coefficients de Strickler du lit mineur et du lit majeur : ces coefficients représentent la capacité de frottement des différentes parties du lit. Ils dépendent, pour le lit mineur, essentiellement de la nature du fond, pour le lit moyen et le lit majeur, du couvert végétal et de l'occupation des sols (présence de bosquets ou de bois, nature des cultures, zones de pâturages...).
- Les coefficients de perte de charge des ouvrages : ils traduisent les conditions d'entonnement en amont d'un ouvrage. Ils permettent d'ajuster localement la ligne d'eau en amont d'un ouvrage donné.
- Les hydrogrammes d'apport correspondant à des surfaces non jaugées (affluents entiers, ruissellement diffus) constituent également des « paramètres » sur lesquels on peut intervenir. Il convient de recalibrer ces apports en intensité, en volume et dans le temps, en restant cohérent avec la chronologie de la crue et les surfaces correspondantes.

Gammes de coefficients de Strickler

Les coefficients de Strickler traduisent le frottement global sur la plaine inondable et dans le lit mineur. Le calage nous a conduits à retenir la gamme des coefficients de Strickler suivants :

- Sur l'amont: de 15 en lit mineur et de 8 en lit majeur,
- Sur l'aval : 20 en lit mineur et 5 en lit majeur (zone urbanisée).

La gamme de coefficients retenue est globalement plutôt basse. Etant donné l'impossibilité de caler le modèle, il a été préféré opter pour des valeurs plutôt sécuritaires. On peut cependant tout à fait justifier le choix effectué par les éléments suivants :

- La végétation rivulaire est très présente et très fournie en bordure de lit mineur, ce qui induit là encore des frottements supplémentaires. Les lits mineurs sont assez souvent encombrés de végétation sur leur berge,
- Les valeurs retenues pour les plaines inondables (8 correspondent à un lit majeur en prairie et/ou cultures, avec présence d'obstacles (clôtures, haies, bosquets...)).

Coefficients de perte de charge des ouvrages hydrauliques

En fonction des données disponibles pour le calage, on a utilisé les coefficients de pertes de charge « classiques » à l'entonnement et à la restitution, proposés par défaut par MIKE11 (soit 0,5 dans les deux cas). Ces coefficients ne prennent pas en compte des phénomènes d'embâcles qui peuvent survenir au droit des ouvrages.

Calage des apports hydrologiques

Le calage des apports hydrologiques est le facteur sur lequel on dispose de la plus grande marge d'incertitude. Nous avons cependant veillé à retrouver dans les points nodaux du modèle les valeurs de références calculées au cours de la phase précédente. Les débits de pointe et volumes ont été ramenés au prorata des surfaces pour les sous-bassins de la Lawe amont, Biette et Brette et comparés avec les données du modèle.

Qualité globale du calage

Le modèle a été calé à partir de la crue de 1999 : crue historique la plus récente pour laquelle nous disposons de laisses de crue d'une assez bonne fiabilité. Les laisses de crue utilisées correspondent à celles référencées dans le PPRI (Plan de Prévention des Risques d'Inondation) de la Lawe. Toutefois des incertitudes subsistent sur ce calage à cause d'une part des erreurs inhérentes à l'obtention de témoignages (oubli des événements...) mais surtout du fait de l'absence d'information sur les débits de pointe et les volumes de crues lors des différents épisodes. L'imprécision réside de plus dans l'incertitude sur l'occurrence de l'événement de 1999, le temps de retour de la pluie est très faible sur une journée mais il est de 25 ans sur trois jours. Nous avons donc comparé les laisses de crue avec les lignes d'eau obtenues pour les pluies d'hiver d'occurrence 20 et 50 ans.

Le tableau ci-dessous compare les laisses de crue pour l'événement de décembre 1999 et les simulations de pluie d'hiver de 20 et 50 ans.

rivière	pk	laisse pour 1999	crue 20 ans hiver	crue 20 ans hiver	commentaires
brette	1220	91.15	90.95	91.2	
brette	3960	78.48	75.2	75.5	hauteur aberrante par rapport au désordre signalé
brette	5750	66.87	67.82	68.07	laisse 120 m en aval du profil
brette	6100	64.58	64.1	64.41	
brette	8480	52	51.99	52.27	
Lawe	30	98.46	99	99.2	
Lawe	1130	91.76	93.62	93.78	laisse 150 m en aval du profil
Lawe	6345	61.82	62.03	62.23	
Lawe	6576	61.24	60.91	61.24	
Lawe	7910	52.34	53.08	53.51	
Lawe	8533	51.45	51.13	51.57	
Lawe	10630	41.16	40.85	41.33	
bajuel	0	79.4	79.78	79.86	
biette	3218	64.04	63.7	63.89	
biette	4080	55.55	55	55.33	

Tableau 10 : Tableau comparatif des laisses de crues et les simulations pour des pluies de temps de retour 20 et 50 ans

Réajustement du modèle lors de l'étude d'inondabilité

Le modèle de la Lawe a été retravaillé dans l'étude d'inondabilité réalisé par EGIS Eau en 2012 via le logiciel InfoWorks RS. Les coefficients de ruissellement ont été réajustés après une analyse fine des zones de débordements recensés et des débits mesurés lors de la crue de juillet 2005. Le calage du modèle de la Lawe ne pose donc plus d'incertitude à l'heure actuelle.

2.3 Extrait du rapport de faisabilité pour les aménagements sur le bassin de la Loisne et du Surgeon - Calage du modèle hydraulique et pluies de référence

2.3.1 Structure hydraulique et évolution du modèle

2.3.1.1 Choix du logiciel de modélisation

La modélisation de la Loisne et du Surgeon a été réalisée avec le logiciel INFOWORKS CS, parfaitement adapté aux cours d'eau artificialisés et/ou aux fossés de petit gabarit, aux contextes mixtes péri-urbains (modélisation des conduites d'assainissement) et ruraux (prise en compte des effets de saturation / désaturation des sols agricoles).

Ce logiciel est capable de décrire et de quantifier les comportements d'un réseau hydrographique complexe présentant des défluences / confluences, des singularités hydrauliques, des sections complexes de lit majeur... Il permet de générer des hydrogrammes, de calculer des débits de pointe, des vitesses d'écoulements en lit mineur et majeur, des hauteurs d'eau, des taux de remplissage, des volumes de stockage,...

Le logiciel Infoworks, utilisé pour la modélisation, rend compte des conditions de transit en fonction du temps, après un calcul préalable de transformation pluie-débit.

La génération de ces hydrogrammes de temps de pluie retranscrit le temps de réponse du réseau face à une pluie donnée et permet ainsi de positionner précisément, et de comprendre l'origine, des éventuels désordres hydrauliques mis en évidence par la simulation (contrainte aval, insuffisance intrinsèque de la section d'écoulement...).

2.3.1.2 Choix des pluies simulées et des conditions hydrologiques associées

L'évènement réel d'août 2002 tel qu'enregistré au niveau du pluviomètre de Lillers reste très représentatif des évènements dommageables estivaux, sans toutefois cumuler les lames d'eau les plus excessives qui se sont abattues sur une partie du bassin versant : sa période de retour sur la totalité de la durée est estimée à **50 ans**, sur la base des IDF de Lille-Lesquin tandis que la période de retour en termes d'intensités de pointe n'a jamais dépassé **20 ans**.

Cet évènement a servi de calage lors du diagnostic, il sera également utilisé dans le cadre de la recherche de solution et des dimensionnements.

Pour tout évènement pluviométrique théorique simulé, il est indispensable de faire des hypothèses sur les conditions de sols à lui associer (type et taux de couverture, ...) afin de générer un évènement hydrologique complet.

Dans le cas de notre étude, nous avons tenu à simuler un orage estival exceptionnel survenant sur des sols dont la couverture et l'état de saturation sont proches de ceux de **sols d'août** pour les zones occupées par des terres arables (pour le reste des surfaces : zones imperméabilisées, forêts, prairie, ... les conditions de sol varient moins).

Les **coefficients de ruissellement retenus** seront identiques à ceux présentés lors du diagnostic face à l'orage du 26 août 2002.

2.3.1.3 Représentativité du modèle construit – courbes de calage

Le calage du modèle Infoworks, affiné dans le cadre de cette étude de faisabilité, a été réalisé sur la base des mesures réalisées par Royal Haskoning en 2004. Il n'a pas été jugé nécessaire, en concertation avec le maître d'ouvrage, de relancer une nouvelle campagne de mesure, qui aurait vraisemblablement été redondante, afin d'estimer les débits et volumes induits par temps de pluie.

L'évènement pluviométrique choisi pour le paramétrage du modèle est l'orage du 21 Avril 2004, d'une récurrence d'environ 6 mois (cumul de précipitation de 9mm en 45 minutes).

Rappel de l'implantation des points de mesure - Royal Haskoning 2004

Sur le bassin versant de la Loisme les données débitométriques et limnimétriques proviennent de deux points de mesure :

- Le premier point de mesure avait été installé en aval de la station d'épuration de Nœux-les-Mines et a permis le calage de plus de la moitié (56%) de la superficie totale.
- Le deuxième point de mesure avait été installé au droit des vis d'Archimède à Beuvry. Ces mesures, en termes de volumes écoulés, sont exploitables en tenant compte de l'incertitude liée au fonctionnement des vis lors de l'orage. Toutefois, l'évolution de la hauteur de la ligne d'eau, ainsi que le débit de pointe reste inconnue du fait de la station de relevage.
- un pluviomètre avait été implanté sur la commune de Nœux-les-Mines.

Royal Haskoning mettait en évidence la prédominance de la réponse des apports urbains, lors de cet évènement. Les sols agricoles, du fait de leur bonne perméabilité et de la couverture végétale d'avril, n'étaient pas saturés et n'ont que peu réagit.

Cette hypothèse est justifiée par les observations de terrain et par les témoignages des agriculteurs qui n'ont pas constaté de zones de ruissellement en secteur agricole (d'après l'étude Haskoning).

Calage de la Loisme des sources jusqu'à Nœux-les-Mines.

Le coefficient de ruissellement moyen calculé (rapport entre le volume mesurés et le volume global précipité dans l'hypothèse de précipitation homogène sur tout le bassin) s'élève à 0,20.

Nœux-les-Mines			
	V précipité en zone urbaine (m ³)	V écoulé (m ³)	Cr urbain
21 avril 2004	47 157	9 550	0,20

Tableau 11 : Coefficient de ruissellement moyen

Toutefois, l'application de ce coefficient moyen à tous les sous-bassins versant n'engendre pas un hydrogramme compatible avec la réalité mesurée.

D'après les mesures, l'hydrogramme à Nœux-les-Mines présente un premier pic représentatif des afflux des sous-bassins versant plus proche (zone urbaine de Nœux-les-Mines), alors que la décrue n'est pas régulière et est caractérisée par un deuxième pic de débit correspondant à l'arrivée des afflux de la ville de Hersin-Coupigny.

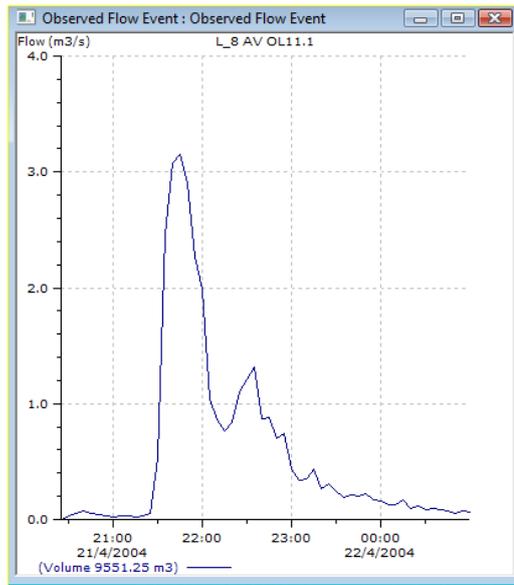


Figure 20 : Hydrogramme à la station de mesure de Nœux les Mines

Le coefficient de chaque sous-bassin versant a été calé indépendamment, de façon à obtenir un volume d'écoulement et un débit de pointe, proche de la mesure. Le résultat du calage jusqu'à Nœux-les-Mines est représenté sur les courbes suivantes.

La courbe de calage ainsi obtenue est un compromis entre un volume d'écoulement surestimé et un débit de pointe légèrement sous-estimé (environ 7%) en aval de Nœux-les-Mines.

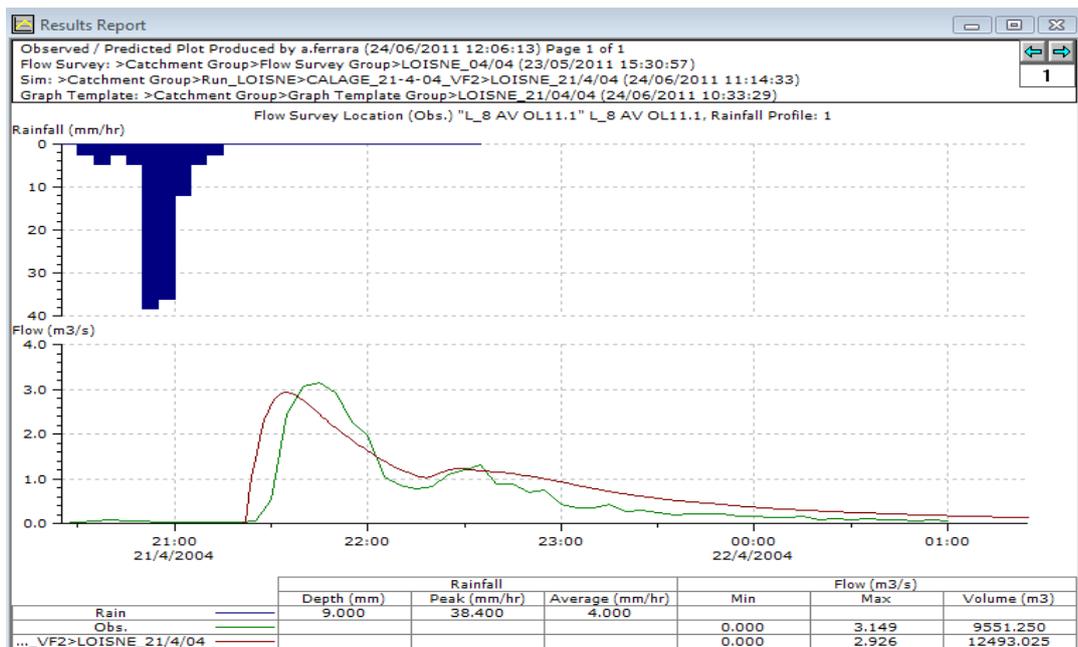


Figure 21 : Calage en aval de Nœux les Mines

Calage de la Loisne de Nœux-les-Mines à Beuvry

Le calcul des coefficients de ruissellement urbain à Beuvry s'est avéré imprécis en raison du fonctionnement des vis de relevage qui ne permet pas de quantifier précisément le volume écoulé. En effet, la mesure du débit n'est pas fiable en raison de la forte influence aval que les vis induisent sur la mesure.

De ce fait, le calcul du coefficient de ruissellement urbain moyen de tout le bassin versant jusqu'à Beuvry perd tout intérêt.

En absence d'autres points de mesure pour effectuer le paramétrage du modèle, **le choix des coefficients de ruissellement urbains s'est fait en cohérence avec les résultats du calage du point amont.**

Calage du Surgeon

Le 21 Avril 2004, jour de l'orage sur le bassin versant de la Loisne, le pluviomètre installé à Bully-les-Mines, sur le bassin versant du Surgeon, n'a enregistré aucun orage. Le seul événement qui s'est vérifié pendant la campagne de mesure en 2004 sur le bassin versant du Surgeon et qui pourrait être employé pour le paramétrage d'été du modèle a eu lieu le 20 Mars 2004. Toutefois cet événement n'est pas assez important pour être pris comme référence (récurrence inférieure à 1 mois et un cumul de précipitation de 5.4mm en 3.5 heures).

Les coefficients de ruissellement seront choisis en cohérence avec ceux du bassin versant de la Loisne.

Loisne			Surgeon		
	Surface (ha)	Cr moyen		Surface (ha)	Cr moyen
BVL1	127.2	0.09	BVS1	260.16	0.08
BVL2	131.9	0.21	BVS2	322.98	0.14
BVL3	119.6	0.13	BVS3	96.61	0.17
BVL4	144.6	0.00	BVS4	141.21	0.13
BVL5	141.3	0.14	BVS5	166.22	0.19
BVL6	215.6	0.14	BVS6	34.40	0.15
BVL7	240.7	0.15	BVS7	186.86	0.16
BVL8	477.5	0.19	BVS8	104.27	0.16
BVL9	141.7	0.19	BVS9	293.13	0.17
BVL10	99.1	0.20	BVS10	143.96	0.20
BVL11	61.6	0.26	BVS11	36.16	0.16
BVL12	87.4	0.15	BVS12	120.37	0.10
BVL13	332.9	0.09	BVS13	95.27	0.13
BVL14	96.7	0.14	BVS14	524.08	0.15
BVL15	282.4	0.15	BVS15	93.17	0.15
BVL16	150.9	0.17	BVS16	124.77	0.12
BVL17	202.1	0.20	BVS17	83.66	0.16
BVL18	134.0	0.20	BVS18	340.62	0.10
BVL19	30.2	0.20	BVS19	131.00	0.14
BVL20	72.5	0.20	BVS20	270.31	0.14
BVL21	19.1	0.20	BVS21	107.72	0.08
BVL22	63.5	0.20	BVS22	279.99	0.13
			BVS23	76.37	0.14

Tableau 12 : Récapitulatif des surfaces de bassin s versants modélisés – coefficients de ruissellement affectés

2.3.1.4 Choix des pluies simulées et des conditions hydrologiques associées pour le diagnostic

L'évènement hydrologique dommageable, sur le secteur d'études, du 6 juin 1998 s'avère être un évènement très exceptionnel, qui ne pourra **en aucun cas servir de référence en terme de diagnostic** (multitudes de causes simultanées), de par sa violence (et concomitance de grêle).

D'autre part, **les évènements hivernaux de fin décembre 1998, ne sont pas représentatifs des évènements dommageables dans le cadre des enjeux étudiés** dans le cadre de cette étude. En effet, l'étude globale de Royal Haskoning mettait en évidence que 5 des 6 évènements dégradants ont eu lieu principalement en période estivale à la suite d'orage cumulant des précipitations d'au moins 35 mm.

L'évènement hydrologique qui servira de référence dans le diagnostic sera l'orage du 26 août 2002. En effet, **l'orage du 26 août 2002** tant dans son amplitude (entre 45 et 60 mm) que dans sa durée (6h) caractérise parfaitement l'orage estival dégradant.

Cet orage fut exceptionnel sur 3 stations (entre 45 et 60 mm) alors qu'il fut très faible dans la plaine de la Lys (Richebourg). Il fut principalement dégradant à Verquin, Verquigneul et Noyelles-les-Vermelles.

Sa période de retour sur la totalité de la durée est estimée à **50 ans**, sur la base des IDF de Lille-Lesquin tandis que la période de retour en termes d'intensités de pointe n'a jamais dépassé **20 ans**.

La violence des volumes et débits pluviaux induits par cet orage, reste **la concomitance des composantes de ruissellement, de drainage hypodermique et de gonflement des apports de nappe**, sur des sols nus (post-récolte).

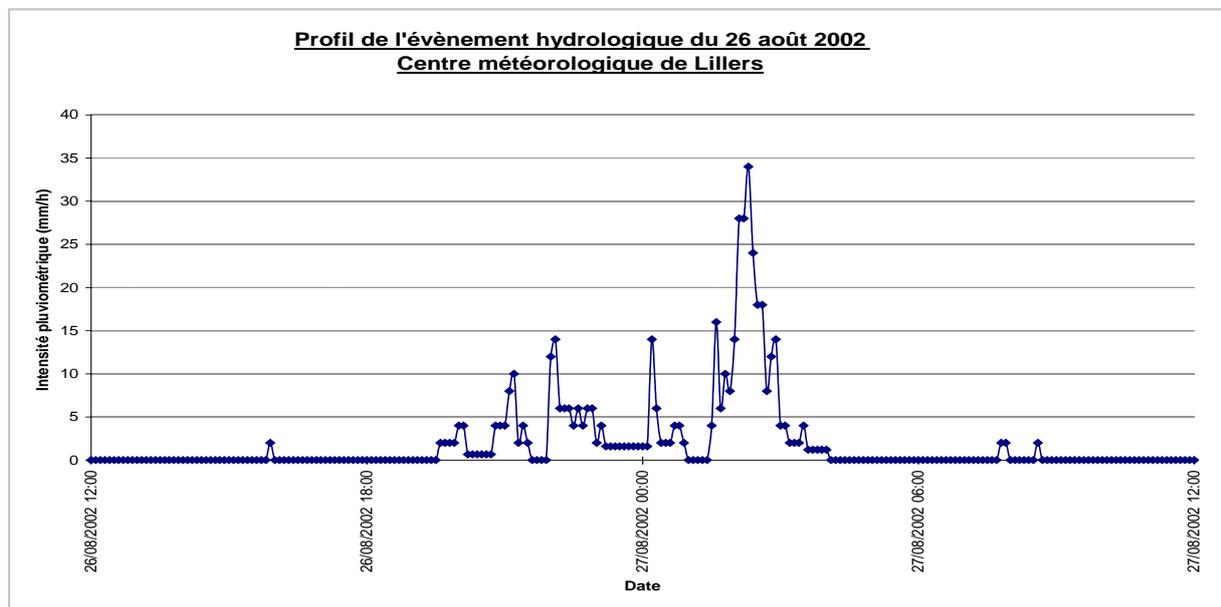


Figure 22: Profil de l'évènement hydrologique du 26 août 2002

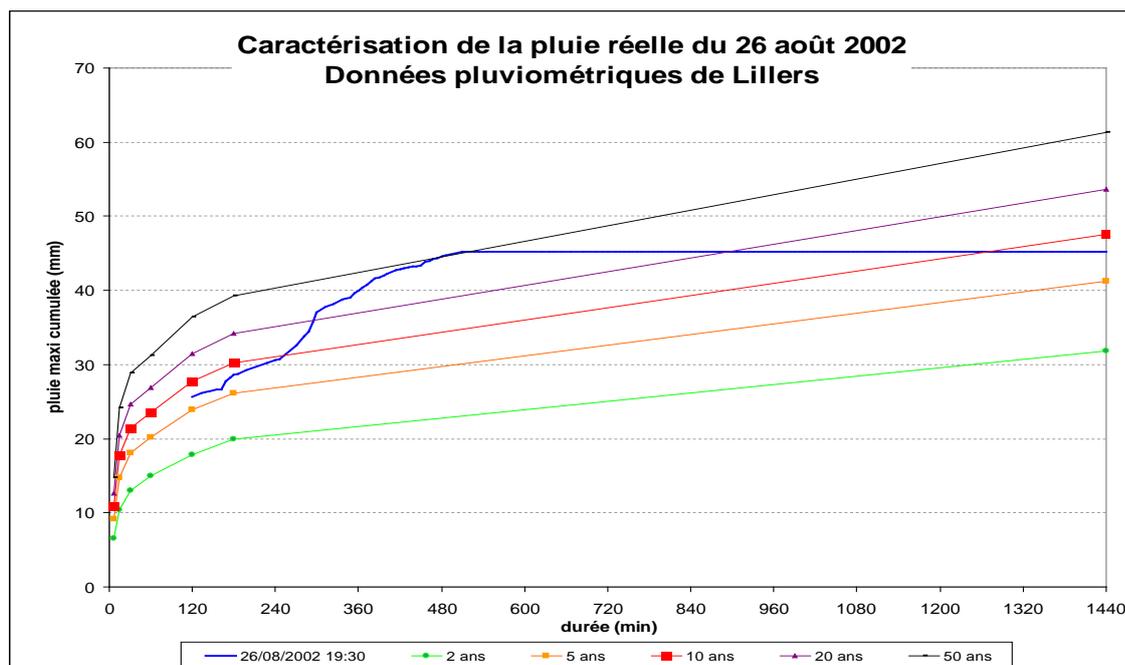


Figure 23: Caractéristiques de la pluie réelle du 26 août 2002

Valeurs extrêmes de précipitations à la station de Lille-Lesquin (en mm)					
DUREE DE RETOUR					
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50ans
6 minutes	6.6	9.2	10.9	12.6	14.7
15 minutes	10.4	14.8	17.7	20.5	24.1
30 minutes	13	18.1	21.4	24.7	28.9
1 heure	15	20.2	23.6	26.9	31.2
2 heures	17.9	23.9	27.8	31.5	36.4
3 heures	19.9	26.1	30.2	34.2	39.3
6 heures	22.3	29.1	33.8	38.5	44.8

Tableau 13 : Intensité-Durée-Fréquence à la station de Lille-Lesquin

Calage des paramètres hydrologiques et hydrauliques

L'orage du 26 août 2002 est très représentatif des orages dommageables qui combinent à la fois des lames d'eau importantes (plus de 35 mm) et des sols nus très favorables au phénomène de ruissellement.

Le calage de l'orage du 21 avril 2004 (campagne de mesure de débit réalisée dans le cadre de l'étude globale de Royal Haskoning) a mis en évidence un apport des surfaces agricoles très faible, dû en partie à la présence d'un couvert végétal printanier (avant récolte).

De ce fait, la simulation de l'évènement de projet (Aout 2002) avec un modèle ainsi calé sous-estimerait les effets.

De ce fait, dans le cadre du diagnostic suivant, seront alliées :

- Les lames d'eau enregistrées lors de l'orage du 26 août 2002 ;
- Les conditions hydrologiques estivales avec une contribution des surfaces agricoles telles que définies dans le tableau suivant.

Loisne					Surgeon				
	Surface (ha)	% Surface Agricole	Surface agricole (ha)	Cr agricole		Surface (ha)	% Surface Agricole	Surface agricole (ha)	Cr agricole
BVL1	127,2	0,45	57,9	0,20	BVS1	260,2	0,50	128,9	0,13
BVL2	131,9	0,18	23,6	0,18	BVS2	323,0	0,54	175,5	0,16
BVL3	119,6	0,99	118,1	0,13	BVS3	96,6	0,20	19,6	0,07
BVL4	144,6	0,00	0,6		BVS4	141,2	0,43	60,8	0,11
BVL5	141,3	0,81	114,8	0,17	BVS5	166,2	0,09	15,5	0,07
BVL6	215,6	0,69	149,7	0,19	BVS6	34,4	0,16	5,4	0,08
BVL7	240,7	0,97	234,1	0,15	BVS7	186,9	0,39	72,8	0,18
BVL8	477,5	0,15	70,4	0,19	BVS8	104,3	0,88	91,7	0,18
BVL9	141,7	0,99	140,2	0,19	BVS9	293,1	0,89	262,0	0,18
BVL10	99,1	1,00	99,1	0,20	BVS10	144,0	0,11	15,3	0,19
BVL11	61,6	0,22	13,2	0,20	BVS11	36,2	0,04	1,4	0,13
BVL12	87,4	0,73	63,8	0,19	BVS12	120,4	0,82	98,2	0,11
BVL13	332,9	0,87	288,8	0,10	BVS13	95,3	0,95	90,9	0,13
BVL14	96,7	0,26	25,5	0,11	BVS14	524,1	0,12	62,1	0,07
BVL15	282,4	0,47	133,7	0,20	BVS15	93,2	0,10	9,1	0,11
BVL16	150,9	0,46	69,7	0,19	BVS16	124,8	0,10	13,0	0,07
BVL17	202,1	0,71	143,0	0,20	BVS17	83,7	0,18	14,7	0,08
BVL18	134,0	0,93	124,3	0,20	BVS18	340,6	0,44	149,5	0,07
BVL19	30,2	0,10	2,9	0,20	BVS19	131,0	0,35	46,4	0,07
BVL20	72,5	0,89	64,5	0,20	BVS20	270,3	0,40	108,8	0,07
BVL21	19,1	0,19	3,7	0,20	BVS21	107,7	0,89	95,5	0,08
BVL22	63,5	0,76	48,1	0,20	BVS22	280,0	0,77	215,1	0,14
					BVS23	76,4	0,44	33,4	0,13

Figure 24 : Surfaces agricoles sur les bassins de la Loisne et du Surgeon

2.4 Extrait du rapport de faisabilité pour les aménagements sur le bassin de la Lys amont et de la Laquette- Calage du modèle hydraulique et pluies de référence

2.4.1 Caractéristiques morphologiques des bassins versants

Le bassin versant de la Lys amont et de la Laquette possèdent une forte dominante rurale. En moyenne sur l'ensemble des sites, l'occupation des sols compte **plus de 95% de terres arables et de prairies**.

Les pentes peuvent varier de manière importante entre l'amont des bassins versants (avec des pentes autour de 30%) et des pentes très faibles sur les parties aval, proches de l'exutoire.

Les terrains sont essentiellement composés de limons relativement battants et d'argile lourde, soit des sols assez pénalisants en termes de ruissellement.

Le tableau utilisé pour associer à chaque classe de pentes et type d'occupation du sol un coefficient de ruissellement est le suivant :

Pente %	Occupation du sol					
	Culture	Prairie	Bois	Bati isole	Bati dense	ZI
i<2%	0.12	0.03	0.02	0.20	0.30	0.65
2%<i<5%	0.20	0.08	0.05	0.20	0.30	0.65
5%<i<7%	0.27	0.11	0.07	0.25	0.30	0.70
7%<i<10%	0.33	0.14	0.09	0.25	0.35	0.70
10%<i	0.42	0.17	0.12	0.25	0.35	0.70

Tableau 14 : Table des coefficients de ruissellement utilisés (sols lourds)

Les coefficients de ruissellement retenus sont assez nettement inférieurs à ceux utilisés dans les études PGGEEC Lys et Laquette et paraissent plus réaliste et plus en phase avec la littérature.

Utilisation/ Couverture des sols	Pente (%)	Type de sol						
		Sable	Sable limoneux	Limon sableux	Limon légerem. sableux	Limon	Argile	Argile lourde
Terre cultivée	< 0.5	0.21	0.24	0.27	0.33	0.36	0.45	0.54
	0.5 – 5	0.25	0.28	0.31	0.37	0.40	0.49	0.58
	5 – 10	0.30	0.33	0.36	0.42	0.45	0.54	0.63
	> 10	0.41	0.44	0.47	0.53	0.56	0.65	0.74
Prés/zones toujours en herbe	< 0.5	0.03	0.06	0.09	0.15	0.18	0.27	0.36
	0.5 – 5	0.06	0.08	0.11	0.16	0.19	0.29	0.41
	5 – 10	0.13	0.14	0.14	0.18	0.21	0.32	0.50
	> 10	0.18	0.19	0.20	0.24	0.26	0.38	0.54
Zone boisée	< 0.5	0.03	0.06	0.09	0.15	0.18	0.27	0.36
	0.5 – 5	0.11	0.12	0.14	0.17	0.20	0.29	0.41
	5 – 10	0.25	0.23	0.23	0.23	0.24	0.32	0.45
	> 10	0.21	0.24	0.27	0.33	0.36	0.45	0.54
Terrain dénudé/fraîc hement labouré	< 0.5	0.30	0.33	0.36	0.42	0.45	0.54	0.63
	0.5 – 5	0.34	0.37	0.40	0.46	0.49	0.58	0.67
	5 – 10	0.39	0.42	0.45	0.51	0.54	0.63	0.72
	> 10	0.50	0.53	0.56	0.62	0.65	0.74	0.83
Zone urbanisée	< 0.5	0.32	0.34	0.36	0.41	0.43	0.49	0.55
	0.5 – 5	0.34	0.36	0.38	0.41	0.43	0.50	0.58
	5 – 10	0.39	0.39	0.40	0.43	0.44	0.53	0.65
	> 10	0.43	0.43	0.44	0.47	0.48	0.56	0.68
Eau		1	1	1	1	1	1	1

Tableau 15 : Table des coefficients de ruissellement utilisés dans les études PGGEEC

2.4.2 Hypothèse de calage du modèle hydraulique de la Lys amont et de la Laquette

2.4.2.1 Logiciel de modélisation

Les écoulements de la Lys amont et de la Laquette ont été modélisés grâce au logiciel InfoWorks RS en version 5.0 dans lequel le logiciel PDM (Probability Distributed Model) a été intégré.

C'est un modèle conceptuel pluviométrie / hydrogramme dans lequel la pluviométrie et l'évaporation seront utilisés pour calculer une série temporelle de débits à l'exutoire d'un bassin versant. Sur la base de séries temporelles de pluviométrie et d'évapotranspiration et sur la base d'une combinaison de paramètres qui peuvent être adaptés, le modèle PDM dispose de la possibilité de calculer les débits à l'exutoire et de les caler vis-à-vis d'une série de données existantes.

Présentation des paramètres

Afin de calibrer le modèle, PDM dispose d'un certain nombre de paramètres.

Pluviométrie et évaporation

be : Exposant utilisé dans la fonction du calcul d'évapotranspiration. La valeur de base est $be = 2,5$. Une valeur supérieure correspond à une évapotranspiration plus importante.

fc : Facteur de pluviométrie. Ce paramètre est généralement égal à 1.

Distribution des espaces d'emmagasinement

cmin : Capacité d'emmagasinement minimale exprimée en mm

cmax : Capacité d'emmagasinement maximale exprimée en mm

b : Paramètre qui définit la distribution spatiale des réservoirs d'emmagasinement. Quand B augmente la proportion des réservoirs d'emmagasinement les moins profonds est plus grande et le ruissellement est plus rapide.

Ruissellement et alimentation de la nappe phréatique

kg : Constante de temps (heures) qui détermine la vitesse d'alimentation de la nappe phréatique

St : Paramètre qui définit le taux minimum d'humidité dans chacun des réservoirs d'emmagasinement. Ce paramètre permet d'éviter que la saturation du sol ne diminue trop vite

bg : Exposant dans la fonction de l'alimentation des nappes phréatiques.

Ce paramètre est généralement constant et égal à 1.

Écoulement de surface - Temps de concentration

k1 et k2: Constantes de temps (heures) qui déterminent la vitesse avec laquelle l'écoulement de surface va réagir (assimilées au temps de concentration).

Deux réservoirs linéaires sont utilisés avec chacun leur valeur de k.

k1 : Le premier réservoir provoque la transformation de la pluviométrie vers un courant de ruissellement.

k2 : Le deuxième réservoir est alimenté par le débit de ruissellement et permet de déterminer l'influence de la rivière.

Plus le coefficient k est faible, plus le temps de concentration est court.

Débit de base

kb : Constante de temps qui détermine la vitesse avec laquelle le débit de base réagit.

Temps et débit

qconst : débit ajouté (+) ou soustrait (-) du modèle

Autres paramètres

ki : constante de temps pour l'écoulement sous terrain

fi : coefficient pour l'écoulement sous terrain

kinf : constante de temps pour l'infiltration

Il n'existe pas de séries continues avec les informations de l'évapotranspiration potentielle dans le bassin versant. Ceci n'est pas un problème majeur car il existe des méthodes pour définir des valeurs acceptables. A partir d'études effectuées pour des administrations en Flandres (Belgique), il est apparu que les valeurs d'évapotranspiration effectives peuvent être approchées par une courbe sinusoïdale ayant une amplitude d'environ 1,9 mm/jour. Les valeurs de pointe (3.8 mm) surviennent aux alentours du 1er juillet et les valeurs minimales (0.0 mm/jour) sont obtenues aux environs du 1er janvier. Ceci va causer un amortissement des fluctuations temporaires mais permet par contre d'avoir une bonne approximation du volume d'eau qui sera évacué vers l'atmosphère par évapotranspiration. Le bassin versant utilisé en Flandres n'est situé qu'à une cinquantaine de kilomètres du bassin versant de la Laquette et peut donc être considéré comme étant représentatif pour ce même bassin.

Ajustement des paramètres à chaque sous bassin versant

Le modèle prend également en compte l'aire du bassin versant considéré. En effet certains coefficients sont corrélés à cette surface. Il s'agit en particulier des coefficients k1 (temps de concentration) et q const.

Les valeurs des coefficients sont déterminées d'après le calage du modèle PDM sur les valeurs de Witternesse.

Les super régions hydrologiques de la Laquette amont (LAQ), du Surgeon (SUR), du Fond de bassin (FDL) et de la Laquette aval (WIT) sont ensuite à leur tour calibrés : on entre les coefficients trouvés pour Witternesse et on ajuste au mieux les coefficients k1, ki, kinf, fi et qconst.

Les autres paramètres sont considérés comme constants à l'échelle du bassin versant de la Laquette.

Puis on considère que pour chacun des quatre grands ensembles, les paramètres ki, kinf et fi sont désormais constants.

Seul les paramètres k1 et qconst vont être modifiés en fonction de la surface de chaque petit sous bassin versant en suivant une relation linéaire du type :

$$k1 = K1 * s / S + 2.5 ; qconst = Qconst * s / S$$

avec :

k1 : k1 du petit sous bassin versant,

K1 : k1 du grand ensemble correspondant,

qconst : qconst du petit sous bassin versant

Qconst : qconst du grand ensemble correspondant

s : superficie du petit sous bassin,

S : superficie du grand ensemble correspondant.

Le chiffre 2,5 correspond à la valeur minimale que peut prendre le k1 ; pour la super-région hydrologique le plus aval (WIT) cette valeur est de 2.

2.4.2.2 Calage du modèle hydraulique

Choix des hydrogrammes de calage

A partir des données décennales, on détermine des débits de crues indépendants, supérieurs à la valeur inférieure des débits annuels maximales.

On isole ainsi, sur les 10 années, 7 périodes a priori fiables. Elles doivent regrouper à la fois un débit de base mais aussi des débits élevés.

Les dates de ces 7 périodes sont listées dans le tableau ci-dessous.

	Date début	Date fin	Durée (jours)	Qmax (m ³ /s)	Qmin (m ³ /s)
1	15/12/93	15/02/94	62	5.4	0.7
2	15/01/95	15/03/95	59	6.2	1.2
3	21/01/99	21/04/99	90	2.3	0.9
4	18/12/99	22/02/00	66	8.1	1.0
5	03/01/01	03/05/01	120	7.3	1.8
6	20/02/02	20/04/02	59	10.2	0.9
7	26/12/02	28/02/03	64	7.4	0.6

Tableau 16 : Caractéristiques des 7 périodes de mesures utilisées pour la calibration du modèle

Calage sur la série décennale de Witternesse

Le graphique ci-dessous permet de comparer, sur les 10 années, la courbe des débits mesurés à Witternesse (en blanc) et la courbe des débits calculés par PDM (en rouge). La pluviométrie apparaît en bleu.

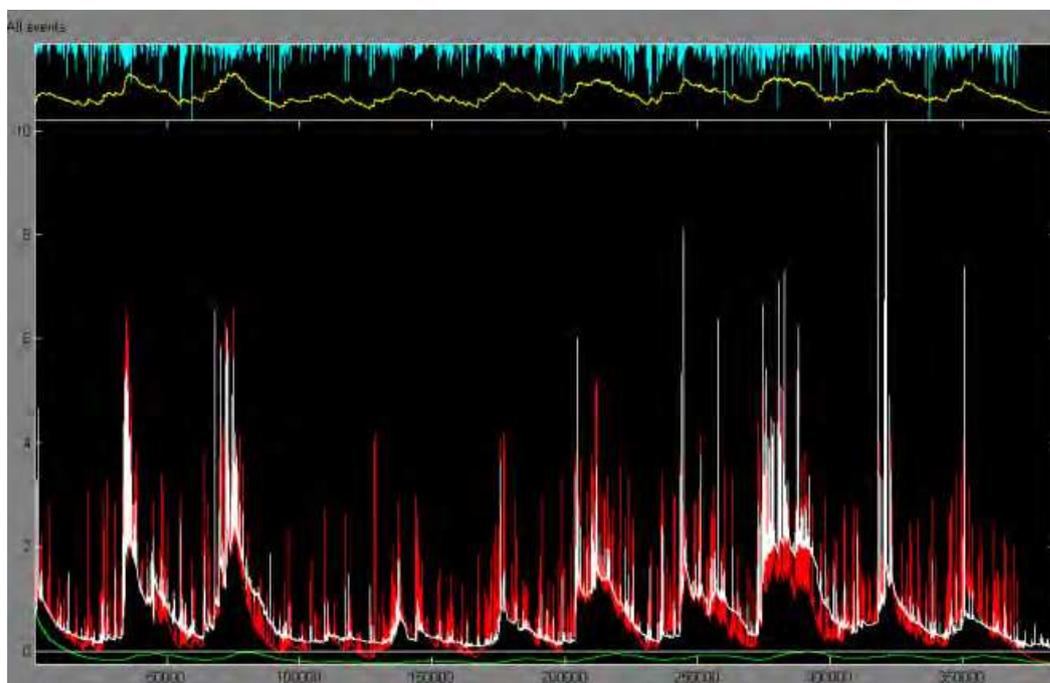


Figure 25 : Résultat du calage du modèle de la Lys amont et de la Laquette sur les mesures décennales de débits à Witternesse

Si l'on omet l'année 2001, déjà signalée comme peu fiable, on constate que les deux courbes sont assez bien superposées.

Le R² de cette calibration est de 53,97%.

Le tableau ci-dessous présente les coefficients retenus pour la station de Witternesse :

Paramètres	Valeurs	Paramètres	Valeurs
cmin	25.5	kb	499.68
cmax	1108.5	kg	14 738
b	0.5	St	139.91
be	2.9	qconst	-0.33
k1	11.36	fi	0.029
k2	4.06	ki	40
		kinf	3000

Tableau 17 : Premier calage – valeurs des paramètres

Ajustement des paramètres aux sous bassin versants

Ce premier calage est complété par un ajustement des coefficients k1, k2, ki, fi, kinf et qconst aux 4 super régions hydrologiques de la Laquette Amont, du Surgeon, du Fond de Longhem et de la Laquette Aval. Pour la Laquette Aval, il n'y a pas de relevés de débits autres que ceux mesurés à Witternesse ; en particulier, aucune mesure n'est effectuée sur la Laque et le Mardyck. On fera l'hypothèse que les paramètres seront les même que ceux établis précédemment, à l'exception de qconst et k1 qui sont ajustés en fonction de l'aire des sous bassin versants.

Pour les trois autres ensembles, on réalise le calage en comparant graphiquement les débits mesurés aux trois exutoires (Serny, EstréeBlanche et Quernes) et les débits calculés par le modèle comme illustré par les graphiques ci-dessous.

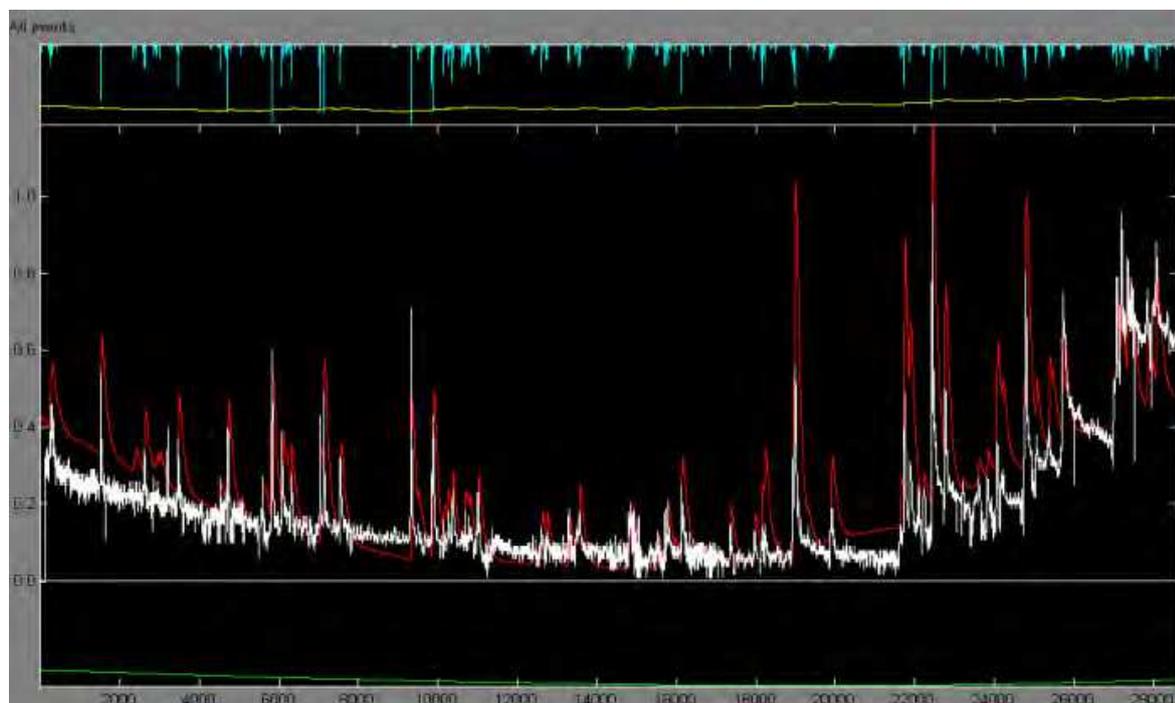


Figure 26 : Résultat du calage du modèle sur les mesures effectuées à Witternesse

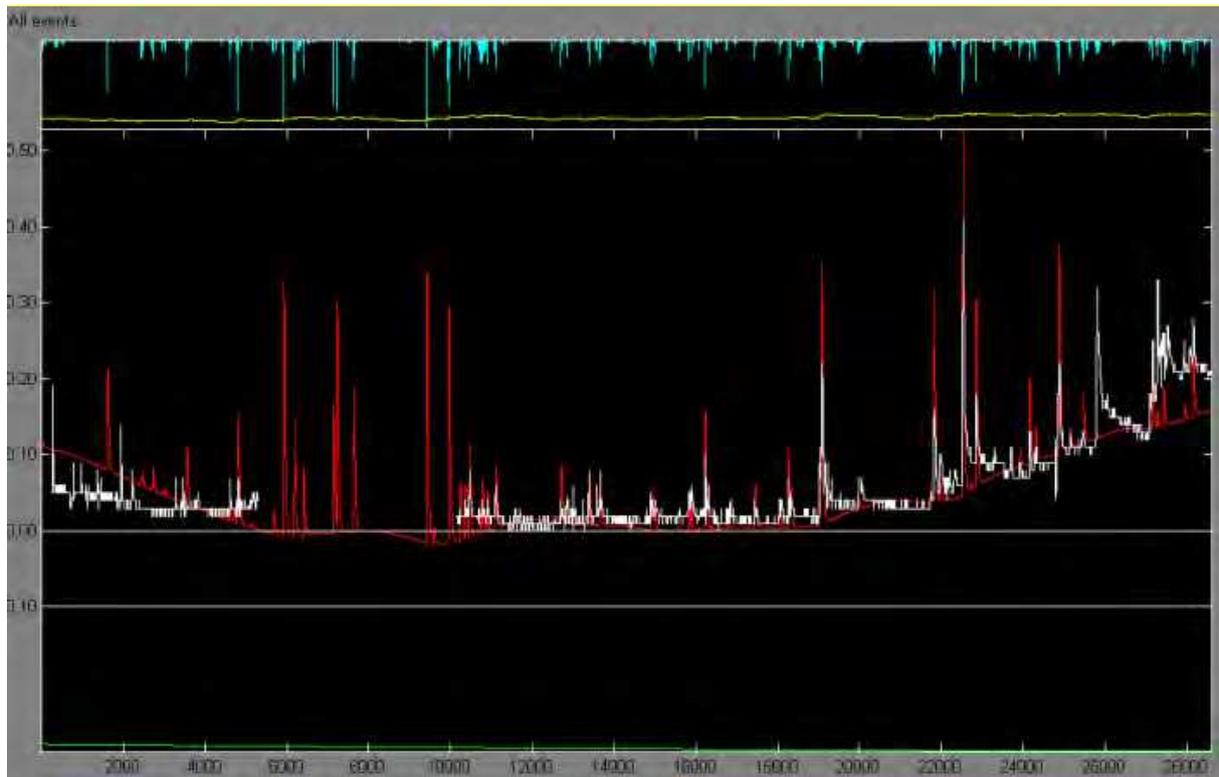


Figure 27 : Résultat du calage du modèle sur les mesures effectuées à Serny

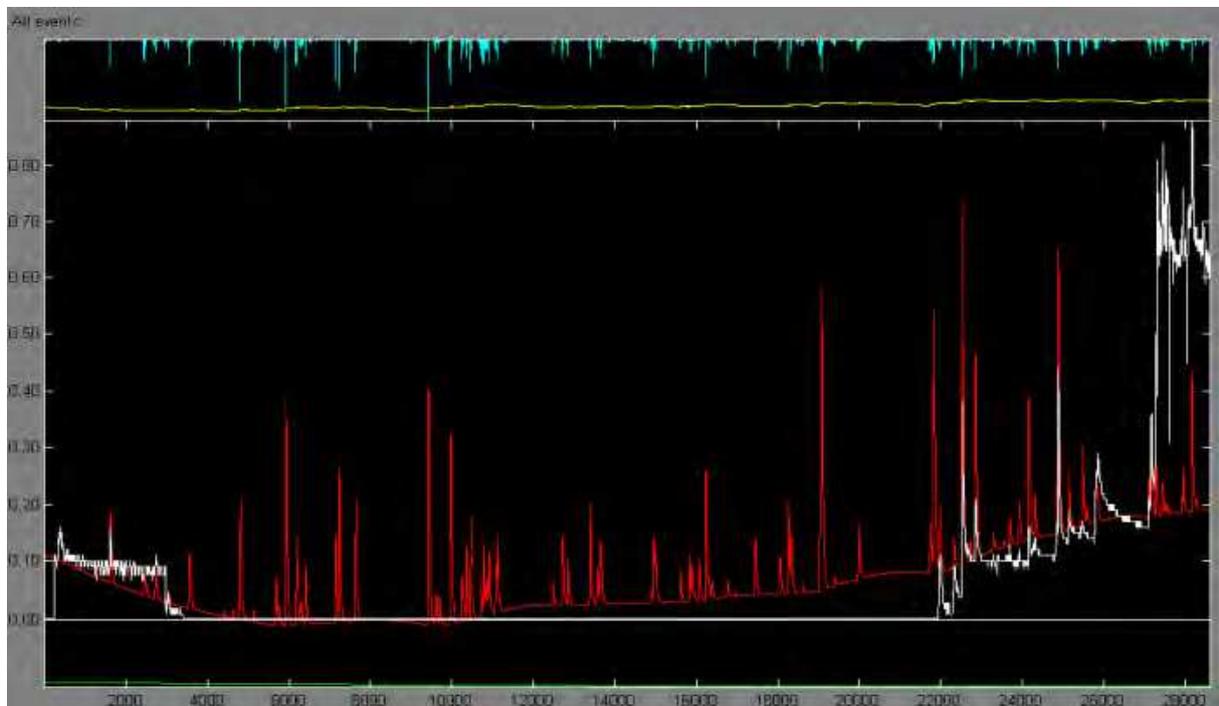


Figure 28 : Résultat du calage du modèle sur les mesures effectuées à Estrée-Blanche

Au vu de ces courbes, on choisit de limiter la période qui servira au calage du modèle hydraulique à la période s'étendant du 17 août 2004 au 10 février 2005, soit 6 mois de mesures consécutives.

Les paramètres k1 et qconst doivent encore être ajustés en fonction de la superficie du sous bassin versant.

Finalement, pour chaque sous bassin versant, on appliquera les paramètres listés dans le tableau ci-dessous.

FDM										Paramètres dépendants de la surface de chaque sous-b.v.		Point d'injection dans le modèle hydraulique							
Valeurs des paramètres de modélisation										k1			qconst						
Bassin versant de la Laquette										k1		qconst							
Paramètres constants à l'échelle du bassin versant de la Laquette										k1		qconst							
code	cmax	h	ha	hb	hg	ht	hl	hly	Ensemble	surface (km²)	fi	li	klaf	lc2		nom du sous bassin versant	surface (km²)	k1	qconst
LAQUETTE 115,76 km²	25,5	1108,5	0,5	2,0	400,68	14738	130,01	0	LAQ	35,7	0,036	1000	3000	1,486	Groeppe	11,22	3,09	-0,055	DUS_GROEPE
									"Laquette Amont"					St Julien	7,33	3,48	-0,0359	BUS_STJULIEN	
														Strée	6,17	3,32	-0,0302	BUS_ESTREE	
														Rupigny	4,56	3,11	-0,0229	BUS_RUPIGNY	
														Petigny	3,86	3,01	-0,0189	BUS_PETIGNY	
														Erzy	2,56	2,84	-0,0125	BUS_ERNY	
									SUR	22,67	0,15	850	4300	1,486	Flechin	7,34	3,93	-0,0426	BUS_FLECHIN
									"Surpen"					Honinghem	5,73	3,62	-0,0332	BUS_HONINGHEM	
														Cuhem	4,91	3,46	-0,0285	BUS_CUHEM	
														FlechSud	1,9	2,87	-0,011	BUS_FLECHSUD	
														FlechNord	1,46	2,78	-0,0085	BUS_FLECHNORD	
														Avant es	1,33	2,76	-0,0077	BUS_AVESNES	
FDL	20,19	0,044	1673	2897	1,383	Tirmande	19,22	10,17	-0,0481	BUS_TIRMANDE									
"Fond de Longhem"					Liétres	0,97	2,80	-0,0024	BUS_LIETRES										
YWT	37,2	0,029	40	3000	4,06	Mardyck	10,01	3,09	0	BUS_MARDYCK									
"Laquette Aval"					Blessy	9,59	3,04	0	BUS_BLESSY										
					LambreEst	9,54	2,40	0	BUS_LAMBRESEST										
					LambreOuest	4,5	3,04	0	BUS_LAMBREOUEST										
					Bourcy	3,56	2,30	0	BUS_BEAUVOY										

Tableau 18 : Valeurs des paramètres de modifications du modèle hydraulique de la Lys amont et de la Laquette

Validation du modèle hydrologique

L'évènement exceptionnel survenu en juillet 2005 va nous permettre ici de valider le modèle hydrologique.

On entre dans le logiciel les données de pluies recueillies entre le 1er juin et le 31 juillet 2005. Les paramètres de calcul appliqués sont les même que pour la calibration sur les mesures décennales à Witternesse. Le débit ainsi calculé est alors comparé au débit mesuré :

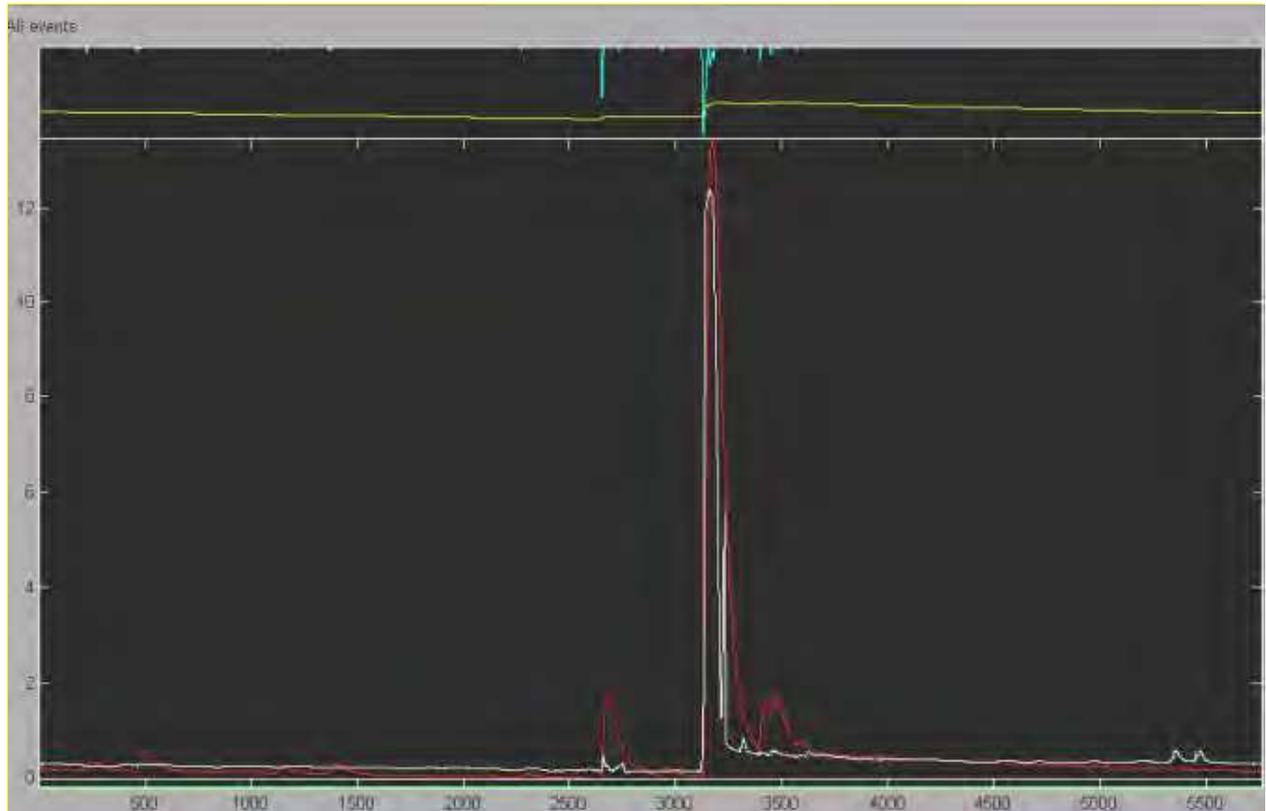


Figure 29 : Comparaison des débits mesurés à Witternesse et calculés par PDM – été 2005

Les débits calculés (en rouge) sont proches des débits mesurés (en blanc).

La figure représente la période du 1er juin 2005 au 31 juillet 2005. L'axe horizontal donne le temps en périodes de 15 minutes à partir de 1 juin 9 heures. L'axe vertical donne les débits en m³/s. La valeur maximale est obtenue le 4 juillet 2005. On ne sera pas surpris que la valeur de débit maximal calculée par le modèle est supérieure à celle mesurée puisqu'il ne tient pas compte des pertes engendrées par les débordements de la Laquette à Witternesse.

Ce graphique démontre que le modèle est fiable puisque, pour une série de données très différentes de celles utilisées lors de la calibration, la réalité est tout de même bien reproduite.

!

2.5 Extrait du rapport de faisabilité pour les aménagements sur le bassin de la Météren Becque et la Grande Becque de St-Jans-Cappel - Calage du modèle hydraulique et pluies de référence

2.5.1 Caractéristiques des ruissellements sur le bassin de la Météren Becque et la Grande Becque de St-Jans-Cappel

L'intensification des phénomènes liés au ruissellement sur le bassin de la Météren Becque et de la Grande Becque de Saint-Jans-Cappel s'explique par plusieurs raisons parmi lesquelles on peut citer :

- l'augmentation de la superficie des parcelles (cf. les statistiques présentées plus haut),
- la suppression d'obstacles à l'écoulement des eaux comme les haies, les fossés et les talus, (phénomène à relativiser en ce qui concerne les haies d'après ce qui a été exposé précédemment),
- la réduction du type de cultures entraînant une homogénéité des pratiques culturales,
- la régression des cultures pérennes au profit de cultures annuelles moins couvrantes ou couvrant le sol trop tardivement (betteraves, maïs, pomme de terre),
- des modifications des méthodes de travail du sol aboutissant souvent à un ameublissement plus poussé du sol, les engins lourds, accroissant les risques de tassement du sol qui réduit l'infiltration.

2.5.2 Calage du modèle hydraulique

2.5.2.1 Logiciel de modélisation hydraulique

La modélisation des écoulements est réalisée à l'aide du logiciel ISIS.

ISIS est un logiciel de simulation hydraulique des écoulements maillés et ramifiés en rivières ou canaux du type unidimensionnel à casiers (pseudo bi-dimensionnel), développé par HALCROW et WALLINGFORD (GB). Basé sur la résolution des équations de Barré de St Venant, il est particulièrement bien adapté à l'étude des réseaux complexes maillés ou ramifiés et à la simulation des champs d'inondation en régime permanent et transitoire.

2.5.2.2 Résultats de la campagne de mesure

Cette campagne a permis d'enregistrer un événement pluvieux significatif autour du 12 janvier 2004.

Plus précisément la pluie maximale recueillie s'élève à 40 mm en 4 jours (du 11 au 14/01/04). L'intensité maximale enregistrée est de 4 mm en 30 min et 6,6 mm en une heure, le 12 janvier à midi.

Les cotes de la Lys durant cette période, ont été communiquées par le service navigation et prises en compte comme influence aval du modèle.

2.5.2.3 Utilisation des résultats de la campagne de mesure pour le calage du modèle hydrologique

Cette analyse est conduite pour les trois points où a été faite une mesure directe de débits : points de mesure 1, 3 et 5.

NB concernant le point 5 : ce point, situé en aval de la déflueuse avec le Kirlem, ne reçoit pas tout l'écoulement du bassin amont. Il est donc difficile de lui associer un impluvium.

On a estimé, sur la base du modèle hydraulique, que, à l'aval de la déflueuse, 41% de l'écoulement se faisait dans la Grande Becque et 59% dans le Kirlem.

Partant de ce calcul, les bassins associés aux points de mesure sont les suivants :

Point	BV associés	Surface totale (km ²)
1 - amont St Jans	A+B+C+E+F	8,00
3 - Bailleul	(A+B+C+E+F) + (D+G+H+I+J)	17,97
5 - Steenwerck	41 % x (A+B+C+E+F+ D+G+H+I+J+K+L+M+N+O+P) + (Q+R+S+T+U+W)	38,58

Tableau 19 : Estimation des volumes écoulés et des ratios Volumes précipités / Volumes écoulés

En chacun de ces points, on détermine les éléments suivants présentés dans le tableau ci-après :

- (p) le volume de pluie précipité pendant la période de pluie la plus significative : du 12 janvier à 8h00 au 13 janvier à 10h00 (succession de deux pics de pluie),
- (1) le volume ruisselé (volume écoulé en surface) : il s'agit d'une estimation approximative basée sur une analyse graphique des hydrogrammes observés (recherche du pic correspondant au ruissellement),
- (2) le volume total écoulé (sur la période incluant la plus grande part du ressuyage : précisément jusqu'au 14 janvier à 10h00, date à laquelle survient un nouvel épisode pluvieux et où les hydrogrammes redeviennent plats) : ce volume est calculé à partir des résultats de mesures de débit,
- le ratio (1)/(p),
- le coefficient C théorique correspondant au bassin versant du point de mesure (pour une pluie de temps de retour 5 ans), calculé sur la base des coefficients de ruissellement présentés plus haut. Ce coefficient est utilisé pour le calcul des apports dans la méthode rationnelle et correspond en théorie, pour un épisode pluvieux modélisé, au rapport du volume ruisselé sur le volume précipité. Ce coefficient prend en compte les seuls écoulements superficiels et ne prend donc pas en compte l'ensemble des écoulements. Dans le mode de calcul des hydrogrammes de projet retenu (exposé plus haut), ce coefficient détermine en fait essentiellement la valeur du débit de pointe.
C peut être comparé à (1)/(p).
- le ratio (2)/(p).

du 12/01 - 08h00 au 13/01 - 10h00 pluie : 17 mm + 5.8 mm soit 22.8 mm	Volume précipité à l'amont du point	Estimation de la part du ruissellement dans le volume écoulé au droit du point	Volume écoulé au droit du point y compris ressuyage mais sans le débit avant pluie	Ratio ruissellement observé	C : Ratio ruissellement théorique	Ratio écoulement observé
	(1000m ³)	(1000m ³)	(1000m ³)			
	(p)	(1)	(2)	(1) / (p)		(2) / p
Point 1	136 + 46.4 = 182.4	47	74	0.26	0.29	0.40
Point 3	306 + 104.5 = 410.5	152	189	0.37	0.30	0.46
Point 5	656 + 223.8 = 879.8	(*)	180	(*)	0.17	0.20

(*) l'estimation du volume écoulé en surface ne peut pas être faite à ce point en raison de la forme trop amortie de l'hydrogramme.

Tableau 20 : Point de calages

Le tableau met bien en évidence que les coefficients de ruissellement considérés dans la formule rationnelle correspondent au seul ruissellement. Les ordres de grandeur entre les coefficients observés (estimation) et les coefficients théoriques considérés sont vérifiés.

En prenant en compte les phénomènes de ressuyage, on atteint des restitutions de l'ordre de 40 à 50% sur la partie amont du bassin versant (points de mesure 1 et 3).

Sur l'aval (point de mesure 5), le coefficient de restitution est plus faible, dans la mesure où l'hydrogramme est très amorti et où les phénomènes de ressuyage sont plus longs. La survenue d'un nouvel épisode pluvieux empêche de prolonger la période d'analyse pour estimer le volume effectivement écoulé.

Comparaison débits calculés / débits observés

Nous avons prolongé l'analyse des résultats de la campagne de mesure par une comparaison des débits observés avec les débits obtenus par l'injection, dans le modèle pluie-débit, des pluies observées.

Ce travail a été conduit sur les points de mesure 1 et 3 pour la période du 12 janvier à 10h00 au 14 janvier à 12h00 (période de deux pics de débit correspondant aux deux averses entre le 12 janvier à 8h00 et le 13 janvier à 8h00).

Ces évènements sont représentés au pas de temps horaires sur les graphes suivants :

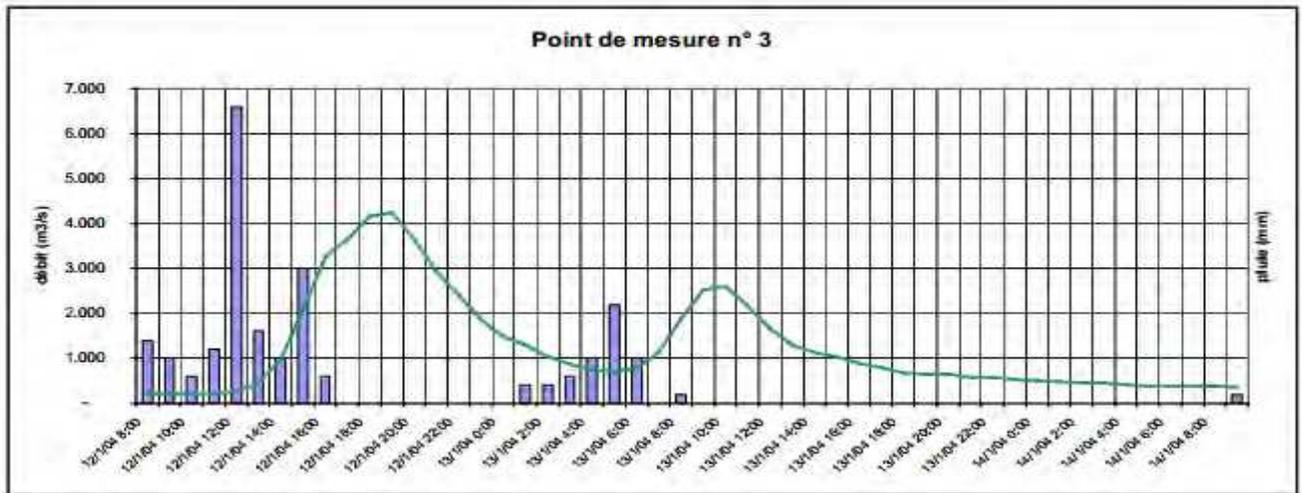
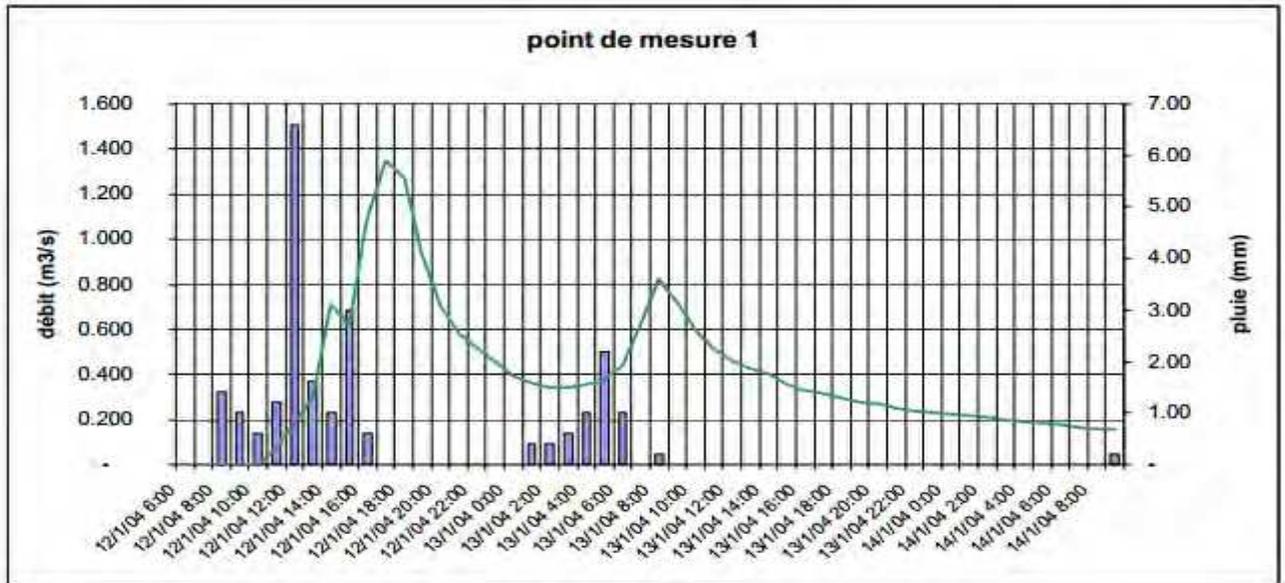


Figure 30 : Comparaison des débits calculés et de la pluviométrie enregistrée

Les calculs ont conduit à retenir les valeurs suivantes pour alpha avec $Q_0 = Q$ pointe et t en heures : 0.15 pour le point de mesure 1 et 0.10 pour le point de mesure 3.

Les résultats obtenus sont les suivants :

Calage en débit de pointe			
	Observé (m ³ /s)	Calculé (m ³ /s)	Différence
Point de mesure 1			
Pic1 (12/01/04)	1.36	1.55	14 %
Pic2 (13/01/04)	0.82	0.82	0 %
Point de mesure 3			
Pic1 (12/01/04)	4.2	3.6	- 14%
Pic2 (13/01/04)	2.6	2.3	- 11 %
Calage en volume			
	Observé (milliers de m ³)	Calculé (milliers de m ³)	Différence
Point de mesure 1			
ensemble de l'épisode	74	75	1 %
Point de mesure 3			
ensemble de l'épisode	227	233	3 %

Tableau 21 : Résultats du calage

2.6 Extrait du rapport de faisabilité pour les aménagements sur le bassin de la Clarence et du Guarbecque - Calage du modèle hydraulique et pluies de référence

2.6.1 Structures hydrauliques, évolutions et choix des modèles

2.6.1.1 Les modèles existants

Les modélisations, déjà réalisées lors de l'étude de synthèse hydraulique de 2006, sur les cours d'eau de la Clarence, du Guarbecque, de la Busnes, de la Nave et de leurs affluents principaux ont été réalisées par Guigues Environnement (Aujourd'hui EGIS Eau), selon la typologie des cours d'eau et bassins versants, au moyen de deux logiciels de simulation :

■ **Infoworks RS 1D à casiers**

Logiciel d'hydraulique fluviale plutôt conçus pour les cours d'eau à débits de base importants, aux crues lentes (temps de montée supérieur à 24h), et comportant peu de singularités apparentées à des éléments d'hydrauliques urbaines (aqueducs ou brutales restrictions de sections, passages canalisés enterrés), ce modèle a été au départ appliqué sur les cours d'eau les moins artificialisés à l'amont et aux parcours dans la plaine :

- modèle complet de la Clarence,
- modèle du Guarbecque et ses affluents, de la Busnes et de la Demingue,
- modèle du réseau hydrographique du Grand Nocq (en aval de la RD943) et du courant de Bellerive, issu du modèle construit par BRLi en 2002, sous le logiciel ISIS (logiciel précurseur de Infoworks RS).

■ **Infoworks CS 1D à casiers**

Logiciel d'hydraulique urbaine initialement, le logiciel Infoworks CS a été développé au fil du temps pour des usages mixtes et s'avère plus adapté à la modélisation de petits cours d'eau réactifs, péri-urbains ou ruraux mais fortement anthropisés :

- → modèle complet de la Nave (morphologie du cours d'eau, anthropisée sur la majeure partie de son linéaire dès l'amont à Fontaine-les-Hermans) et de ses affluents (dont ravines et creuses ne présentant pas d'écoulements pérennes, non modélisables),
- → modèle du Rimbart jusqu'à sa confluence avec la Busnes,
- → modèle amont du Grand Nocq (ou courant d'Allouagne, ou Riviérette) et du fossé Justin, déjà modélisés en 2002 sous Hydroworks par BRLi.

Les modèles « aval » étaient alimentés par les hydrogrammes issus des modèles « amont », aux points d'injection non tributaires de contraintes aval, ou par couplage CS-RS sous passerelle développée sous Open MI, lorsque la configuration hydraulique l'imposait.

2.6.1.2 Evolution structurelle des modèles mis en œuvre

Compte tenu des difficultés rencontrées en 2006 dans la modélisation sous Infoworks RS de la Clarence et du Guarbecque, et sur d'autres petits cours d'eau avec de nombreux facteurs d'anthropisation hydraulique, nous en avons conclu que la modélisation de ces cours d'eau et de leurs affluents dans la totalité de leur linéaire impliquait, au vu de la diversité de la typologie des versants (et donc des apports pluviaux) et de la morphologie des cours d'eau, d'élargir la mise en œuvre de modèles sous Infoworks CS, notamment :

- les secteurs amont, caractérisés majoritairement par des versants pentus, une occupation des sols à forte tendance agricole (donc des réactions assez brutales lors des montées de crues, de l'ordre de quelques heures au maximum) et des cours d'eau ou axes d'écoulements présentant à certaines époques de l'année des débits et niveaux d'eau faibles voire non permanents ;

- des secteurs aval très artificialisés (tronçons canalisés, tronçons majoritairement endigués, réseaux de fossés de drainage de zones marécageuses tels que celui du Marais Pourri).

En effet, l'objet de la présente étude étant notamment de construire et de restituer au Symsagel un modèle hydrologique et hydraulique complet sur la globalité de l'aire d'étude, réutilisable, nous avons privilégié l'utilisation de Infoworks CS qui garantit des modèles opérationnels et donc robustes, c'est-à-dire fonctionnant dans toutes les conditions hydrologiques sans instabilités et tolérant toutes les modifications ultérieures de type aménagements ou autres.

Les divers modèles Infoworks CS existants (Nave/Rimbert/Grand Nocq amont) ont donc été :

- agglomérés en un seul modèle, incrémentés et étendus à des éléments du réseau secondaire non modélisés antérieurement (talwegs, ravines notamment) ;
- incrémentés, densifiés dans la description des tronçons et zones d'inondations, homogénéisés en termes de paramétrages, sans toutefois avoir à remettre en cause les calages réalisés dès 2006 à partir de mesures de débits faites en 2005.

Par ailleurs, des modèles initialement construits sous Infoworks RS, ont été intégralement reconstruits et re-paramétrés sous Infoworks CS, ce qui en l'occurrence a nécessité également de reprendre les calages pour ces réseaux hydrographiques :

- le modèle Clarence amont, très instable et qui présentait des secteurs de modélisation simplifiée (méthode de Muskingum au lieu de la résolution des équations de Barré de St Venant) en amont de Camblain-Châtelain ;
- le modèle Guarbecque / Busnes Demingue, très maillé et qui ne présentait aucune garantie de stabilité.

In fine, il a donc été reconstitué deux modèles complets sous Infoworks CS :

- un modèle « Guarbecque » d'une part ;
- un modèle Clarence – Nave – Busnes d'autre part.

Pour les secteurs du seul bassin versant et réseau hydrographique de la Clarence, situés approximativement en aval de la RD943, le modèle initial sous Infoworks RS, après évaluation, a été jugé suffisamment stable et pertinent pour être conservé sous ce logiciel, mais a néanmoins subi des nettoyages et modifications, y compris des implémentations liées notamment à la modélisation fine des secteurs de l'Abbaye, et du courant de Bellerive, requis par les études de faisabilité des sites 5A puis 5B, et 11.

Les deux modèles CS et RS demeurent totalement interfacés, via des fichiers d'import-export excel :

- les hydrogrammes de sortie du modèle amont sont réinjectés dans celui de l'aval en respectant les points d'interfaçage ;
- de plus l'hydrologie des bassins d'apports du réseau hydrographique aval modélisé hydrauliquement sous RS, a été entièrement repassée sous CS (cas des sous-bassins d'apport du courant de Bellerive notamment) ;
- le système de couplage des deux modèles en temps réel, via OpenMI n'a pas été conservé en raison de sa lourdeur de mise en œuvre et de son inutilité étant donné l'absence de contrainte aval aux points d'interfaçage.

Voir figure ci-après : Synoptique des modèles actualisés

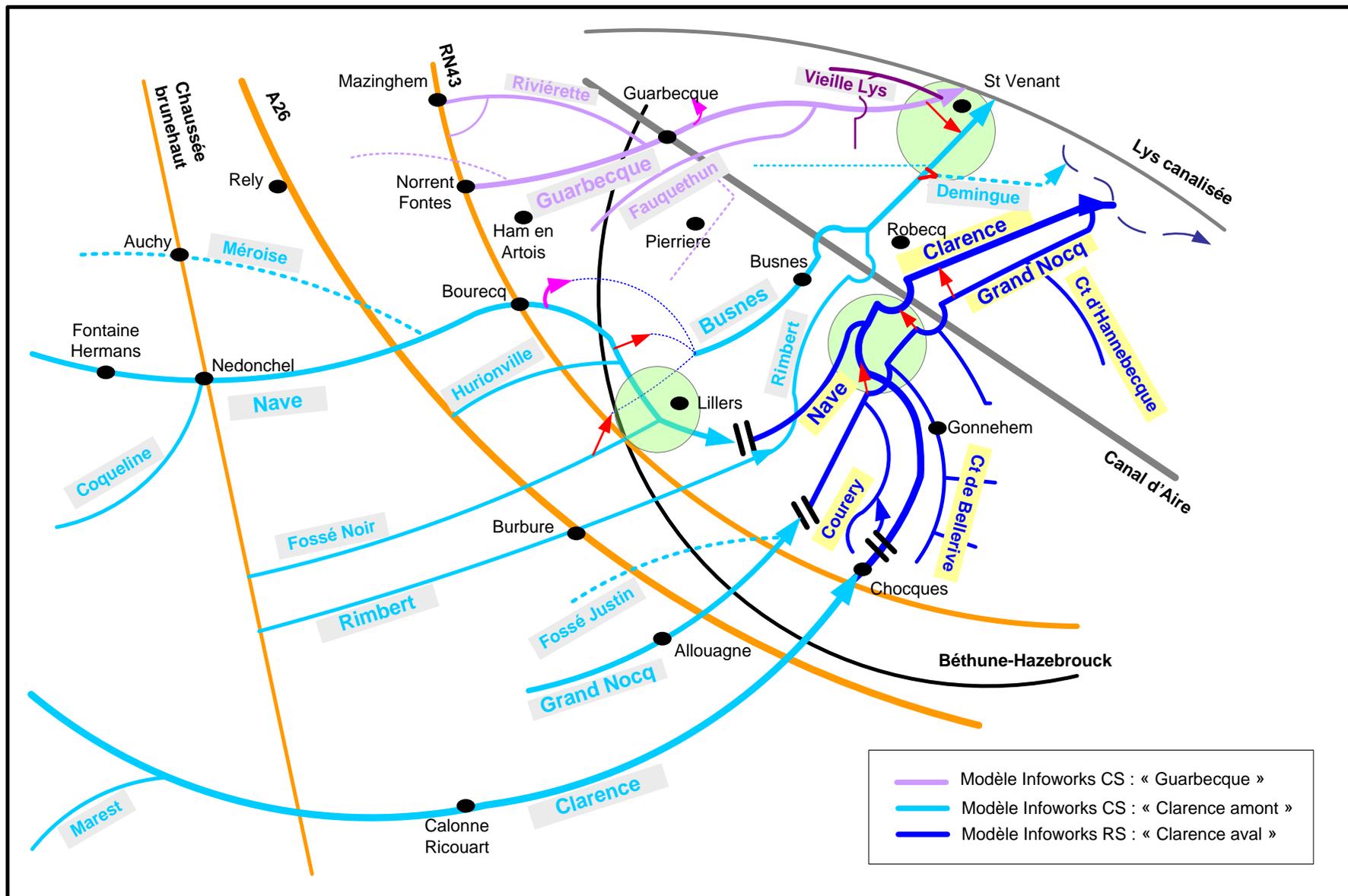


Figure 31 : Synoptique des modèles actualisés

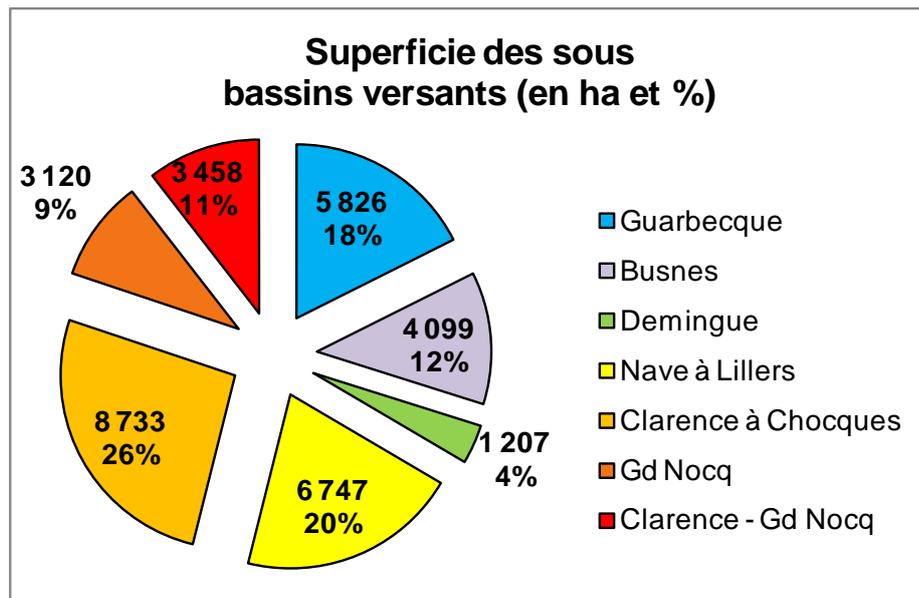


Figure 32 : Superficies des bassins versants modélisés

Le sous-modèle Infoworks CS « Clarence amont » représente 70% du bassin versant total modélisé alors que le sous-modèle CS « Guarbecque » et le modèle RS « Clarence aval » représentent respectivement 20% et 10% du bassin versant total.

2.6.2 Calage des paramètres hydrologiques et hydrauliques

2.6.2.1 Données hydrologiques présidant à la description des conditions de ruissellement et au calage

Pluviométrie et hydrométrie

Les données hydrologiques utilisées pour le calage des modèles sont :

- La pluviométrie horaire de 1993 à 2003 aux stations Météo France de Fiefs et Lillers et à la station DIREN d'Aire-sur-la-Lys ;
- La pluviométrie à pas de temps 5 min au poste de Norrent Fontes lors de la campagne ponctuelle d'OTECH en 2005 (notamment pour l'événement exceptionnel orageux de juillet 2005) ;
- Les données pluviométriques radar au poste Météo France de Abbeville pour l'événement exceptionnel orageux de juillet 2005 ;
- Les données limnimétriques et débitmétriques à la station DIREN de Robecq ;
- Les données débitmétriques de la Clarence à Pernes et à Chocques, de la Nave en entrée et sortie de Lillers, du Guarbecque à Isbergues, lors de la campagne ponctuelle de 2005, menée par Otech Environnement

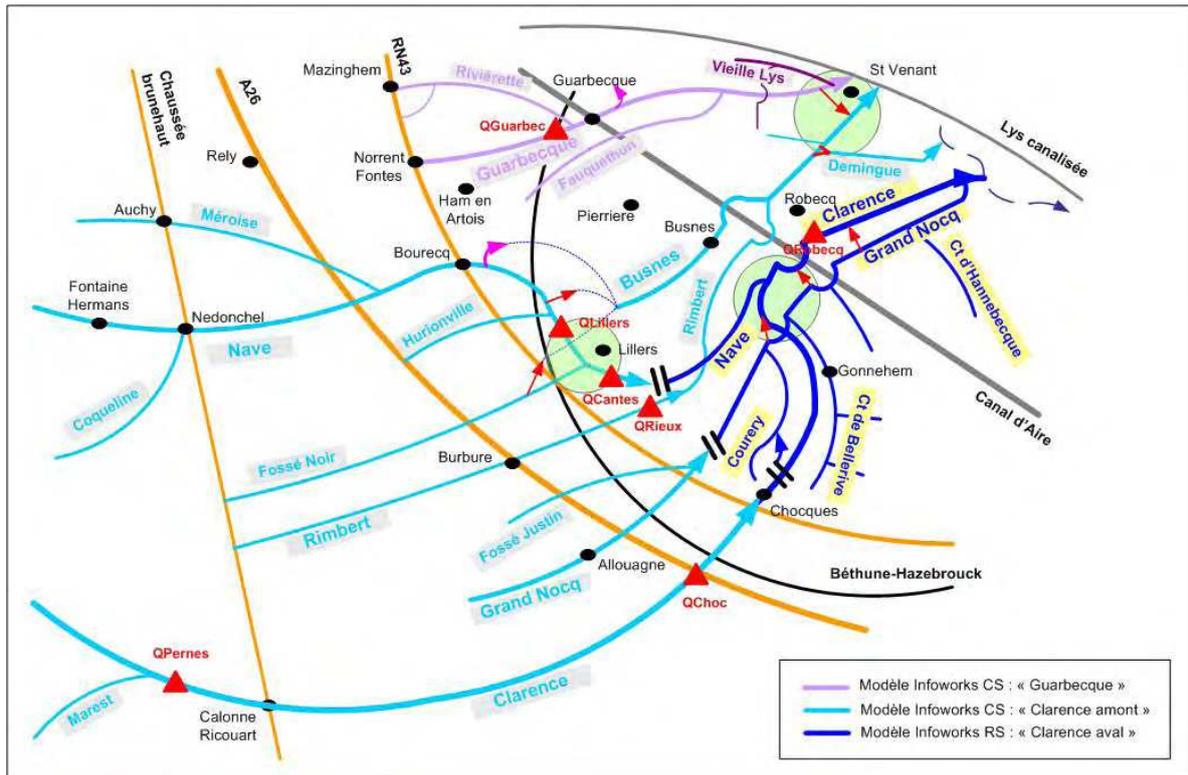


Figure 33 : Points hydrométriques de référence pour le calage

Pour la crue de juillet 2005, le caractère orageux de l'événement nous a incités à utiliser les données radar du poste d'Abbeville afin de retranscrire le plus fidèlement possible dans le modèle la rapidité et l'intensité de l'événement (données à pas de temps court), ainsi que sa répartition spatiale, et l'évolution de cette répartition dans le temps (données spatialisées).

Modèle Guarbecque : événements retenus

Le Guarbecque et/ou ses affluents n'étant pas suivi en continu (pas de poste DIREN), les deux seuls événements hydrologiques significatifs qui ont pu être exploités sont ceux du 23/04/2005 et du 05/07/2005, mesurés lors de la campagne ponctuelle Otech 2005.

Le point de mesures QGuarbec étant situé sur le Guarbecque en amont de sa confluence avec la Riviérette, les paramètres de calage du modèle « Guarbecque amont » (coefficients de ruissellement par type d'occupation du sol et paramétrages du module Infiltration/Restitution pour rendre compte des apports de nappe et de ressuyage des sols saturés) ont été transposés, par homothétie, au sous bassin de la Riviérette qui présente des caractéristiques proches de celui du Guarbecque.

Le sous-bassin versant du Fauquethun se comportant davantage comme un énorme réservoir de stockage / restitution à débit très influencé par le drainage agricole (car alimenté par un réseau de fossés, jouant naturellement un rôle de stockage et récupérant majoritairement des eaux de ces drainages qui concernent la majeure partie des terres cultivées), il a été décidé de le modéliser comme un « bassin versant réservoir », se vidant à débit constant de 1 l/s/ha et se remplissant (comme pour les BV ordinaires) par le module de transformation pluie / débit.

La **pluie de calage retenue est celle du 23/04/2005** et celle de **validation du 05/07/2005** car une intervention sur les siphons (bouchage/débouchage) du Guarbecque a eu lieu lors de l'événement de juillet, rendant difficile le calage du modèle sur cette pluie (facteur extérieur difficilement conceptualisable).

Modèle Nave – Clarence amont : événements retenus

Lors de l'étude de synthèse hydraulique de 2005, ce sous modèle (et notamment la Nave) a fait l'objet d'un calage précis et fiable des apports de ruissellement ruraux et urbains et des apports souterrains de ressuyage des sols et de nappe grâce à des calages sur des pluies estivales orageuses (avril / mai / juillet 2005 notamment) et sur des événements hydrologique hivernaux de longue durée et survenant en période de saturation des sols (crue de l'hiver 1994/1995 - décembre 1999 ...).

L'objectif de cette étude n'est donc pas de refaire un calage hydrologique à proprement parler mais de ré-exploiter les résultats et analyses produits lors de cette synthèse et d'éventuellement d'en affiner le calage pour les pluies estivales.

Dans un souci de cohérence avec le sous bassin versant du Guarbecque et étant donné le nombre relativement limité de données hydrologiques sur ce sous bassin versant, nous calerons le modèle sur les deux événements majeurs de 2005, à savoir les pluies **du 23/04/2005** et celle **du 05/07/2005**.

Le modèle sera calé en plusieurs nœuds pour lesquels la campagne OTECH de 2005 a fourni des données débitmétriques et limnimétriques à pas de temps court : QRieux, QLillers, QCantes, QPernes, QChoc.

Le sous-bassin versant de la Busnes et de la Demingue se comportant davantage comme un énorme réservoir de stockage / restitution à débit très influencé par le drainage agricole (car alimenté par un réseau de fossés, jouant naturellement un rôle de stockage et récupérant majoritairement des eaux de ces drainages qui concernent la majeure partie des terres cultivées), il a été décidé de le modéliser comme un « bassin versant réservoir », se vidant à débit constant de 1 l/s/ha et se remplissant (comme pour les BV ordinaires) par le module de transformation pluie / débit.

Modèle Clarence aval – Gd Nocq : événements retenus

Le modèle « Clarence aval » n'a pu être véritablement calé sur des données mesurées faute de station limnimétrique et/ou débitmétrique. Toutefois, les apports ruraux drainés par la Clarence aval et le Grand Nocq aval apparaissent, au vu de la superficie des bassins versants en jeu et de leur typologie (pente quasi-nulle) comme faibles par rapport à ceux générés par les bassins versants amont de la Nave, du Rimbert, du Grand-Nocq et de la Clarence (et de leurs affluents).

Pour le modèle « Clarence aval », il s'agit donc davantage de s'assurer que pour les pluies réelles simulées (notamment l'orage de juillet 2005), les zones de désordres et de débordements sont respectées quantitativement et qualitativement et que le fonctionnement global des cours d'eau, biefs et autres ouvrages est cohérent avec les investigations menées sur le terrain : en particulier le bassin versant du courant de Bellerive a fait l'objet d'ajustements des paramétrages hydrologiques sur ce principe.

Description hydrologique des sous-bassins versants

La caractérisation hydrologique (pentes, nature et occupation des sols) des bassins versants joue un rôle prépondérant dans la définition initiale des coefficients de ruissellement puis dans leur évolution successive durant les étapes de calage afin de s'assurer, in-fine, de la cohérence des paramètres hydrologiques obtenus après calage.

Occupation des sols des bassins versants

Le bassin versant global est occupé majoritairement par des terres arables (65%) et, dans un moindre mesure, par des prairies et des zones urbaines (15% chacune). Cette répartition n'est pas identique sur les grands sous bassins versants :

- Moins de 5% de zones boisées, moins de 10% de prairies et plus de 75% de terres arables sur les 3 sous bassins « Guarbecque », « Demingue » et « Clarence / Grand Nocq » ;
- Environ 14% de zones boisées et 55% de terres arables pour le bassin « Clarence à Chocques » ;
- Environ 5% de zones boisées et 25% de prairies pour le bassin « Nave à Lillers » ;
- Des zones urbaines concentrées essentiellement sur les bassins de la Busnes (agglomération de Lillers), « Clarence à Chocques » (agglomération de Calonne-Ricouart / Marles-les-Mines / Auchel) et « Grand Nocq » (Allouagne).

Pentes des versants

Le bassin versant global présente des pentes faibles à moyennes sur les ¾ de sa superficie (55 % de pentes inférieures à 2% et 25 % de pentes comprises entre 2 et 5%). Cette répartition n'est pas identique sur les grands sous bassins versants :

- Plus de 20% de superficie avec des pentes supérieures à 5% (et 10% pour les très fortes pentes) pour les 2 sous bassins situés en tête de versant « Nave à Lillers » et « Clarence à Chocques » ;
- Plus de 60% de superficie avec des pentes inférieures à 2 % pour les autres sous bassins (et jusqu'à plus de 80% pour les sous bassins « Demingue » et « Clarence – Gd Nocq ») ;

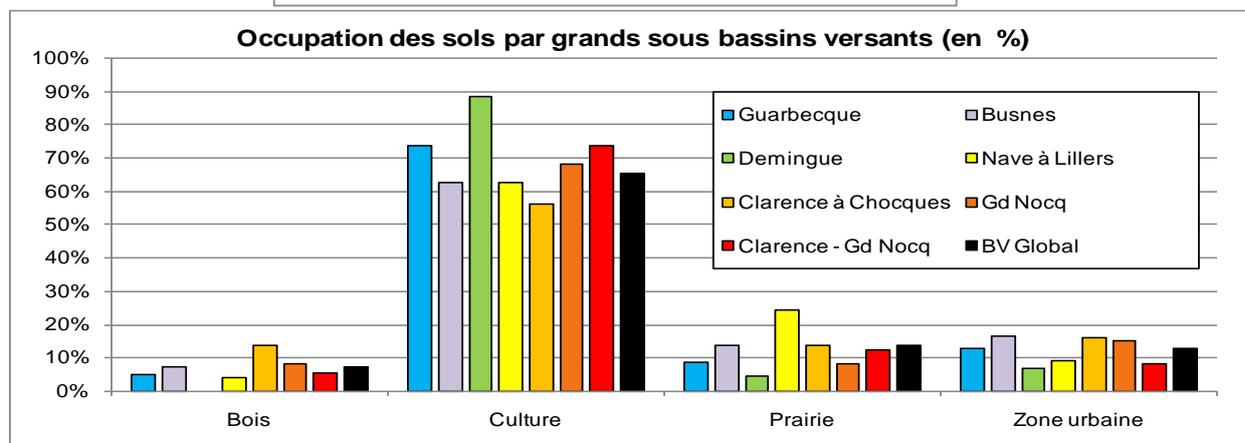
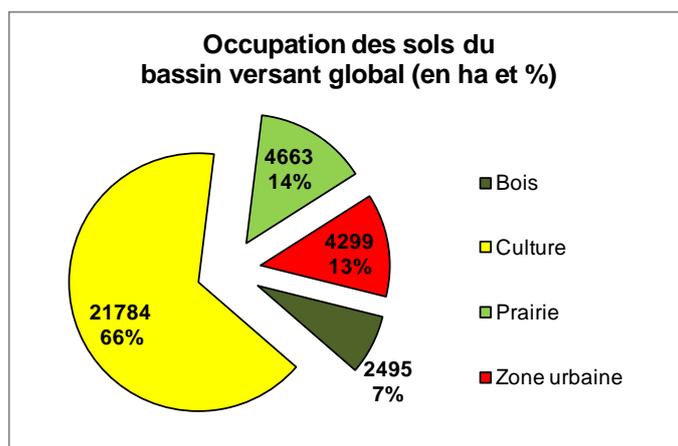


Figure 34 : Occupation des sols sur le bassin versant de la Clarence

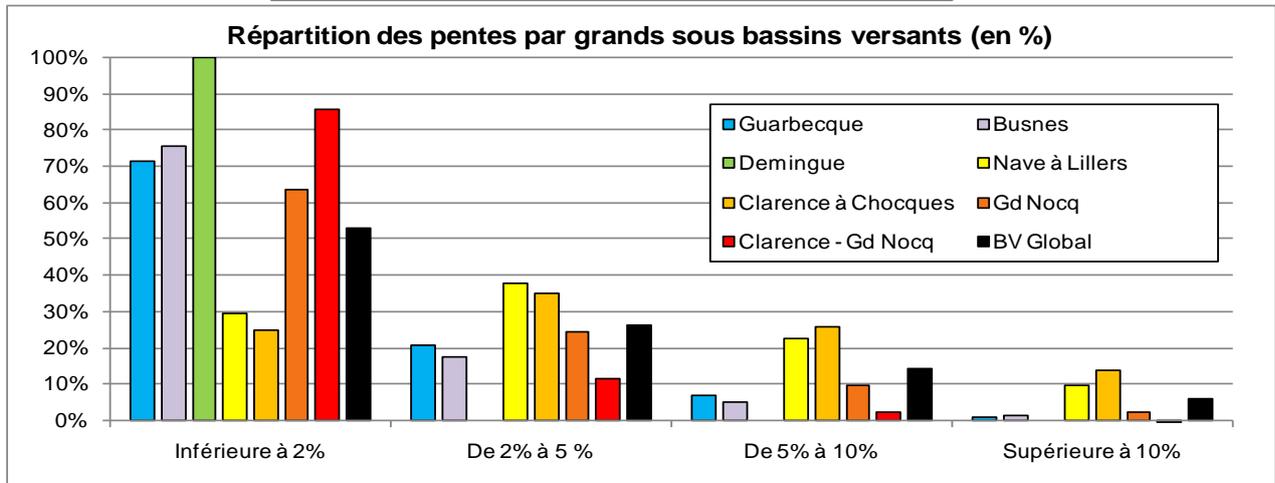
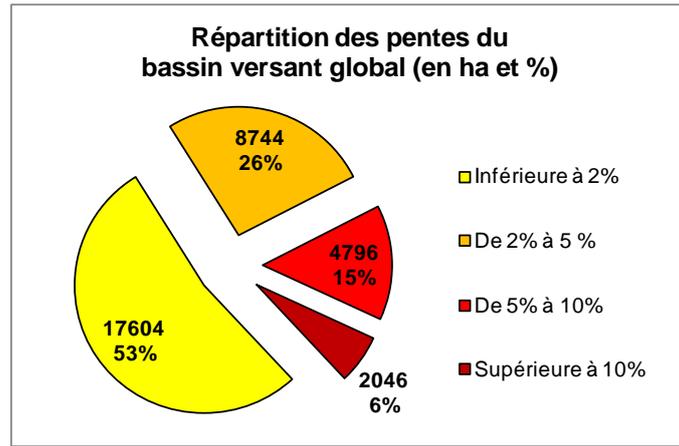
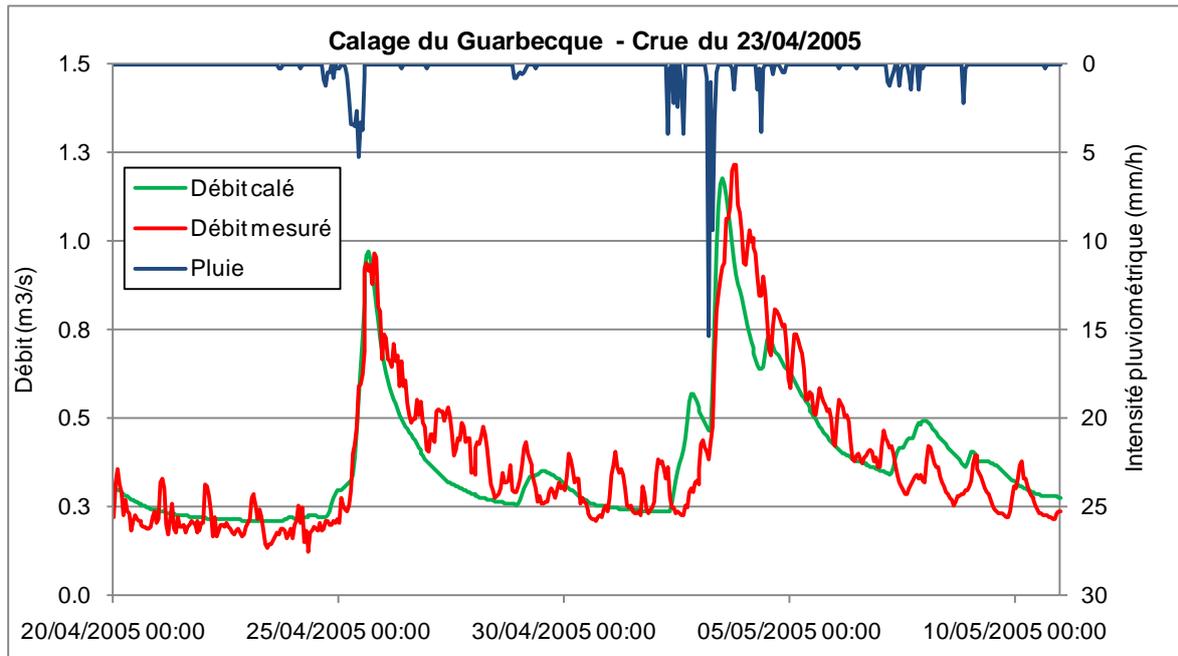


Figure 35 : Répartition des pentes sur le bassin versant de la Clarence

2.6.2.2 Calage du modèle Guarbecque

Calage sur l'événement d'avril 2005

Le graphique et le tableau suivants présentent les résultats du calage pour la crue d'avril 2005 sur le Guarbecque et attestent de la bonne reproductibilité du modèle, sur les débits de pointe, les volumes générés et ruisselés et la propagation dans le temps, avec des écarts par rapport aux mesures, inférieurs à 6%.



Comparaison des mesures et des résultats du modèle		Du 02/05/2005 09h00 au 07/05/2005 03h00
Volume ruisselé global (m3)	Mesure	252 657
	Modèle	238 942
	Ecart	-5.4%
Débit maximum horaire (m3/s)	Mesure	1.22
	Modèle	1.18
	Ecart	-2.9%

Figure 36 : Calage du sous-modèle « Guarbecque » sur la pluie du 23/04/2005

Après plusieurs simulations itératives, les paramètres de ruissellement retenus sont :

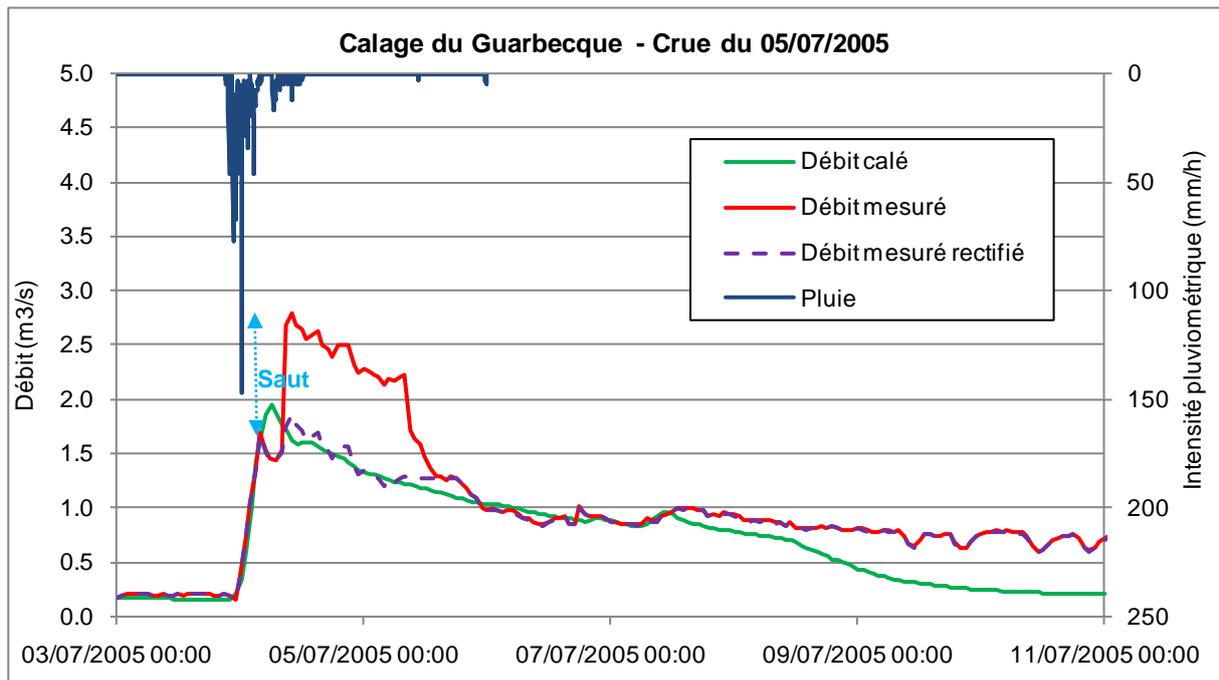
- 0.08 pour les zones cultivées (routing de 30) et 0.12 pour les sols agricoles drainés ou très pentus (routing de 15)
- 0.05 pour les zones en prairies (routing de 15)
- 0.20 pour les zones urbanisées (routing de 20)
- 0.05 pour les zones boisées (routing de 30)

Sur l'ensemble du bassin versant, le coefficient moyen de ruissellement est de 13 %.

Validation du calage sur l'événement de juillet 2005

Le bouchage puis le débouchage des siphons du Guarbecque pendant l'événement pluvieux, expliquent le « saut » enregistré sur les débits mesurés (en rouge).

En essayant de supprimer cet « artefact » de mesures, le modèle semble retranscrire correctement les débits et volumes qui auraient pu être mesurés (rectification de l'hydrogramme mesuré par retrait d'un débit constant de 0.92 m³/s pour supprimer le « saut » qui ne peut s'expliquer « naturellement » sans ce bouchage/débouchage des siphons, avec des écarts par rapport aux mesures inférieurs à 5%.



Comparaison des mesures et des résultats du modèle		Du 03/07/2005 22h00 au 06/07/2005 23h00
Volume ruisselé global (m3)	Mesure	400 142
	Mesure rectifiée	315 893
	Modèle	313 003
	<i>Ecart Modèle / Mesure</i>	-21.8%
	<i>Ecart Modèle / Mesure rectifié</i>	-0.9%
Débit maximum horaire (m3/s)	Mesure	2.79
	Mesure rectifiée	1.87
	Modèle	1.96
	<i>Ecart Modèle / Mesure</i>	-29.9%
	<i>Ecart Modèle / Mesure rectifié</i>	4.6%

Figure 37 : Validation du sous-modèle « Guarbecque » sur la pluie du 05/07/2005

2.6.2.3 Calage du modèle Clarence amont

Calages d'après les mesures de 2005

L'étude hydraulique de synthèse menée sur les sous-bassins versants de la Nave, du Rimbert et de la Clarence notamment, avait conduit à un calage relativement précis et fiable des apports de ruissellement ruraux et urbains et des apports souterrains de ressuyage et de nappe grâce à des calages :

- sur des pluies estivales orageuses (avril / mai / juillet 2005 notamment) ;
- sur des événements hydrologique hivernaux de longue durée et survenant en période de saturation des sols (crue de l'hiver 1994/1995 - décembre 1999 ...).

Concernant le point de mesures de la Clarence à Chocques, les débits et volumes générés apparaissent étrangement faibles au regard des mesures à Pernes. En effet, le débit de pointe est quasiment identique (entre de 3.2 et 3.8 m³/s) et le volume est incrémenté d'environ 30% (206 000 m³ à Pernes contre 306 000 m³ à Chocques) alors que la surface du bassin versant est multiplié par deux entre les deux points (et la surface active d'environ trois en raison de la plus forte urbanisation de la Clarence aval, notamment les zones denses de Marles et Auchy, situées entre les deux points de mesure).

De plus, la comparaison de ces mesures avec celles obtenues sur la Nave en amont du déversoir du Platrier (Qp = 8.7 m³/s et V = 295 000 m³) confirme, au vu de la taille des bassins d'apport (7 000 ha pour la Nave contre et 9 000 ha pour la Clarence) et de l'occupation des sols (environ 7% de zones urbanisées sur la Nave en amont de Lillers contre environ le double sur la Clarence en amont de Chocques) que **les mesures débitométriques sur la Clarence à Chocques sont très probablement sous-estimées.**

Les niveaux d'eau obtenus sur la Clarence dans le centre bourg de Lapugnoy, avec la simulation de l'événement juillet 2005, confirment le fait que le modèle retranscrit assez fidèlement le comportement du cours d'eau, avec des valeurs de hauteurs d'eau proche des cotes d'alertes voir, dans certains secteurs particuliers (en amont de singularités hydrauliques type ponts, buses, ...) des débordements de la Clarence.

Après plusieurs simulations itératives, les paramètres de ruissellement retenus sont :

	Zones boisées	Zones cultivées	Zones en prairies	Zones urbanisées
Nave + Hurionville	0.02 (routing 30)	0.08 (routing 30)	0.02 (routing 30)	0.20 (routing 3) 0.40 et 0.25 (routing 2) pour les zones très denses de Lillers
Fossé Noir + Rimbert + Fossé Justin + Grand Nocq	0.01 (routing 30)	0.03 (routing 30)	0.01 (routing 30)	0.20 (routing 3)
Clarence + Marest	0.01 (routing 30)	0.03 (routing 30)	0.01 (routing 30)	0.20 (routing 3) 0.35 (routing 3) sur Marles / Auchy

Tableau 22 : Coefficients de ruissellement par occupation du sol

Pour chaque grand bassin versant, les coefficients de ruissellement moyens sont les suivants :

Sous bassins versants	Surface totale (ha)	Surface active (ha)	Coefficient de ruissellement
Méroise	1 377	95	6.9%
Nave amont	3 150	206	6.5%
Hurionville	635	60	9.4%
Fossé Noir	1 255	54	4.3%
Nave	668	74	11.0%
TOTAL Nave	7 084	488	6.9%
Rimbert	1 153	55	4.7%
Fossé Justin	535	18	3.4%
Gd Nocq amont	823	57	6.9%
Marest	2 096	56	2.7%
Clarence amont	2 485	72	2.9%
Clarence zones urbaines	1 084	148	13.7%
Clarence	3 280	109	3.3%
TOTAL Clarence	8 944	386	4.3%
TOTAL	18 538	1 003	5.4%

Tableau 23 : Coefficients de ruissellement moyen pour les macro-bassins versants

Calage complémentaire des apports urbains sur la Clarence intermédiaire

Concernant les zones urbaines de Marles et Auchy, une campagne de mesures ponctuelles a fourni les valeurs de hauteurs d'eau, vitesses et débits en deux points de rejet du réseau d'eaux pluviales vers la Clarence sur une durée de 3 mois environ en 2008.

Le point PM1 récupère les eaux de ruissellement d'un bassin versant de 11 ha environ, entièrement urbanisé et celui de PM2 un bassin mixte (urbain et rural) de 850 ha.

Les coefficients de ruissellement des zones urbaines de Marles et Auchy ont été définis sur la base d'un ajustement des débits au point PM1 car le point PM2 présentait des mesures très douteuses (débit de pointe et volume généré anormalement forts) comme le prouvent les graphiques suivants (coefficient de ruissellement moyen 1.5 fois plus fort sur un bassin versant mixte que sur un bassin versant strictement urbain !).

In fine, compte tenu des résultats peu exploitables sur ces deux points de mesures (pluies faibles, absence de cohérence entre les deux points), les coefficients de ruissellement issus du calage global ont été conservés.

		Q Lillers	Q Cantes	Q Rieux	Q Pernes	Q Choc
MESURES	Débit maximal (m3/s)	2.46	2.75	1.12	3.21	3.81
	Volume ruisselé (m3)	193 498	352 811	66 670	206 188	306 107
MODELE	Débit maximal (m3/s)	2.85	3.42	1.29	3.46	5.29
	Volume ruisselé (m3)	162 581	269 372	56 482	216 914	388 368
ECART %	Débit maximal	16.1%	24.4%	14.7%	7.7%	38.8%
	Volume ruisselé	-16.0%	-23.6%	-15.3%	5.2%	26.9%

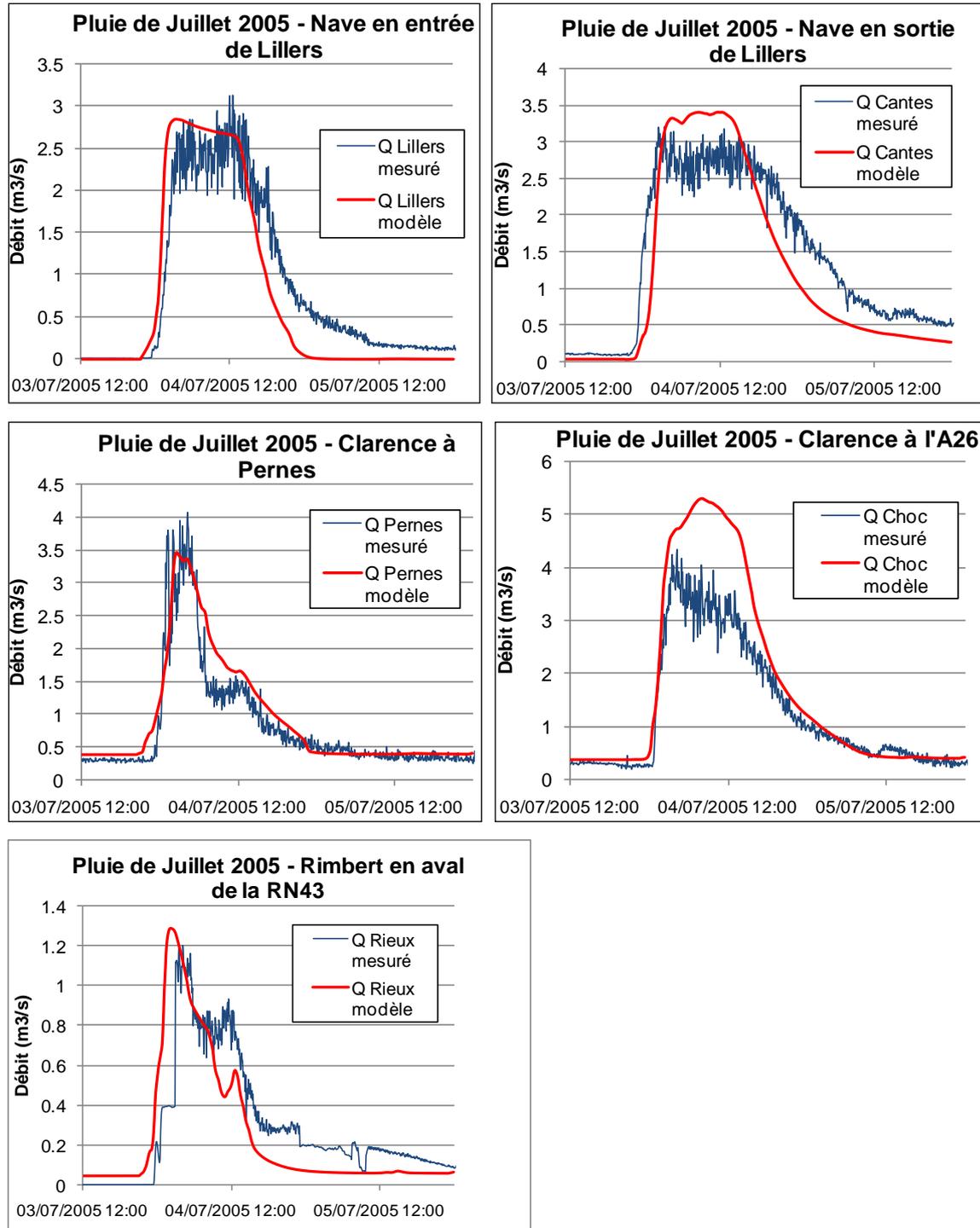


Figure 38 : Débits mesurés comparés à ceux obtenus avec le modèle Clarence amont

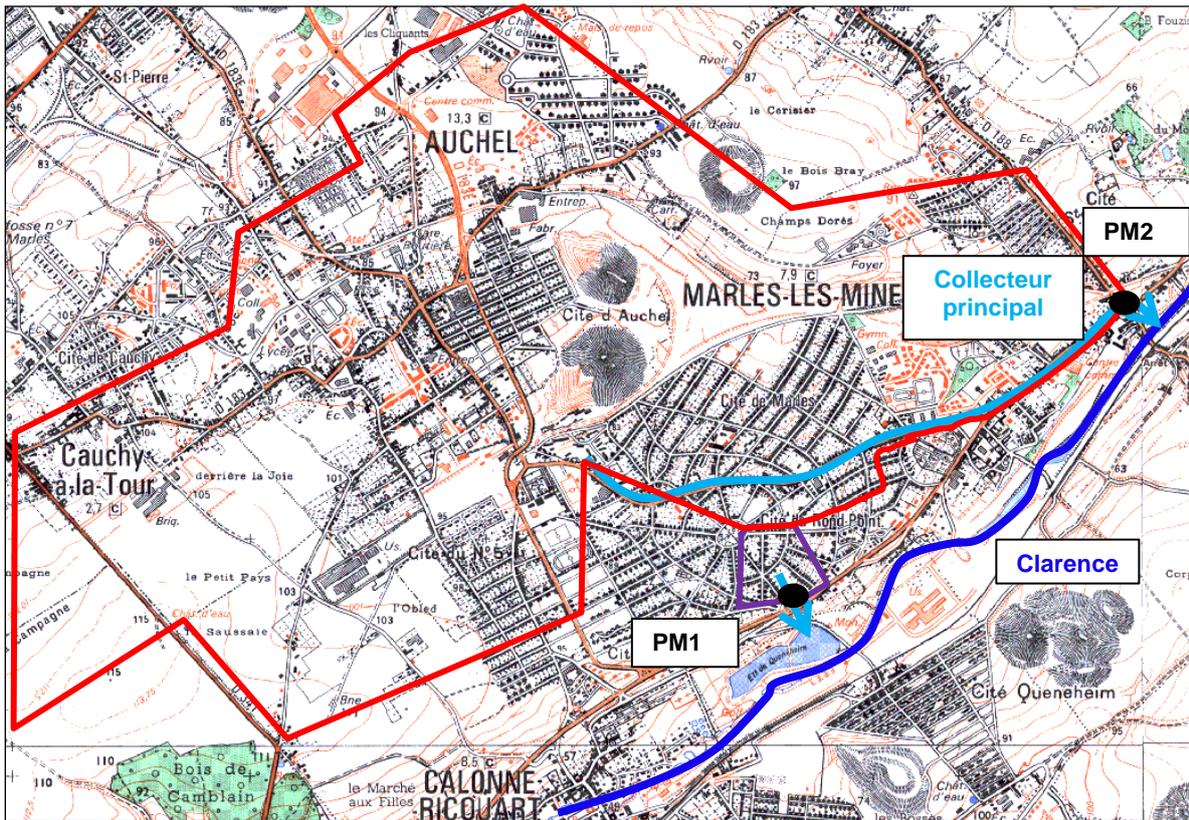
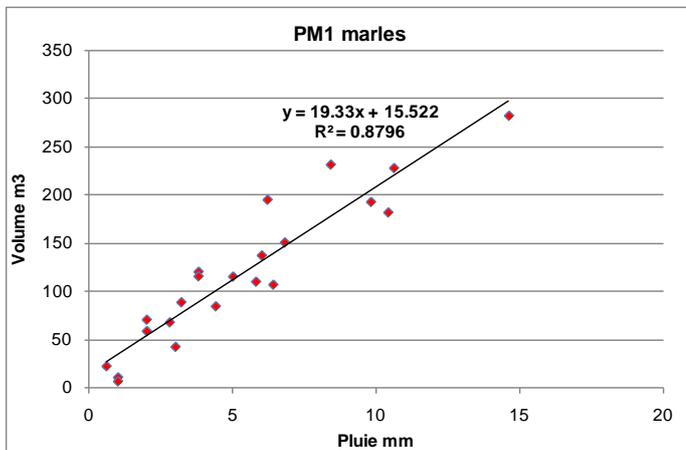
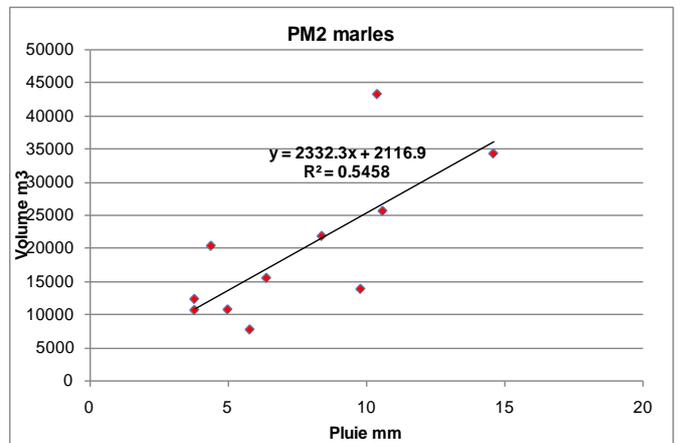


Figure 39 : Campagne de mesures pour calage complémentaire – 2008



Surface active = 1.93 ha
Surface totale = 11 ha d'occupation urbaine stricte
Coefficient de ruissellement moyen = 0.18



Surface active = 233.23 ha
Surface totale = 850 ha d'occupation mixte
Coefficient de ruissellement moyen = 0.27

Figure 40 : Analyse des mesures au point PM1 et PM2 à Marles

2.7 Extrait du rapport de faisabilité pour les aménagements sur le bassin de la Laquette - Calage du modèle hydraulique et pluies de référence

2.7.1 Structures hydrauliques, évolutions et choix des modèles

La modélisation de la Laquette et de ses affluents s'est déroulée en 3 étapes avec 3 orientations techniques successives et des évolutions de structures (topologie = nombre d'éléments hydrauliques et hydrologiques intégrés et décrits dans les modèles), de plus en plus complexes et détaillées :

2.7.2 L'étude PGGEEC : modèles Infoworks RS

Le BET Haecon, selon un raisonnement a priori logique s'agissant d'un réseau hydrographique, a cherché à mettre en œuvre un logiciel de modélisation d'hydraulique fluviale le logiciel Infoworks RS.

Compte tenu de la typologie du bassin versant amont, de la petite taille (et donc des petits débits de base), et de la réactivité du réseau hydrographique associé, le BET s'est rapidement heurté à des problèmes de stabilité (récurrents dans les modèles fluviaux appliqués à de petits cours d'eau), qui l'ont amené :

- A découper le modèle en 3 entités avec un nombre plus limité de structures décrites et donc, en principe, de moindres instabilités, soit 2 modèles amont (Laquette, Surgeon) et un modèle aval (Laquette – Mardyck – Laque) ;
- A simplifier les descriptions de certains éléments (ouvrages, contre-pentes, fossés secondaires dans la plaine – Pâtures d'Aire et Lenglet), qui contribuaient à aggraver l'instabilité des modèles.

Le linéaire total modélisé (état fin 2007) était de 46 km, pour 732 liens hydrauliques (tronçons de cours d'eau, ouvrages, secteurs de débordements).

CHANNELS	River Section	Section	356
Structures	Orifice Short Conduit		19
	Weir Sharp Crested		4
	Spill		11
Boundaries	Abstraction		2
	Hydrograph	Stage/Time	1
		Flow / Time	15
Junctions			16
Links		Total	312
		ml	18 260
CHANNELS	River Section	Section	340
Structures	Orifice Short Conduit		38
	Weir Sharp Crested		1
	Spill		25
Boundaries	Abstraction		1
	Hydrograph	Stage/Time	3
		Flow / Time	9
Junctions			22
Links		Total	282
		ml	27 697

Tableau 24 : Structures des modèles RS de Haecon (amont / aval)

2.7.2.1 1ère évolution par Setegue (Egis Eau) en 2008-2009 : modèles Infoworks CS+RS

Compte tenu des difficultés rencontrées par Haecon et de la propre expérience acquise par Setegue (Egis Eau), sur des cours d'eau voisins (la Nave, la Clarence) et sur d'autres petits cours d'eau avec de nombreux facteurs d'anthropisation hydraulique, nous en avons conclu que la modélisation de la Laquette et de ses affluents dans la totalité de son linéaire impliquait, au vu de la diversité de la typologie des versants (et donc des apports pluviaux) et de la morphologie des cours d'eau, l'utilisation de deux logiciels de simulation distincts mais compatibles (issus de la même famille de modèles).

Pour les secteurs amont, caractérisés majoritairement par des versants pentus, une occupation des sols à forte tendance agricole et des cours d'eau sinueux, pentus, de gabarit moyen et présentant à certaines époques de l'année des débits et niveaux d'eau faibles, le logiciel INFOWORKS CS a été mis en œuvre en lieu et place des modèles RS amont (récupérés en début d'étude) établis par Haecon.

Les versants et les cours d'eau situés sur la partie aval de la Laquette, à proximité des plaines d'Aire-sur-la-Lys ont été modélisés avec le logiciel INFOWORKS RS, davantage approprié à la modélisation de cours d'eau structurants, de vastes lits majeurs et zones inondables et d'aménagements d'amortissement dynamique ou d'écrêtement en plaine.

Les deux modèles ont été interfacés, via des fichiers d'import-export excel :

- les hydrogrammes de sortie du modèle amont sont réinjectés dans celui de l'aval en respectant les points d'interfaçage ;
- le système de couplage des deux modèles en temps réel, via OpenMI n'a pas été retenu en raison de sa lourdeur de mise en œuvre et de son inutilité étant donné l'absence de contrainte aval aux points d'interfaçage.

Le choix de Haecon, de scinder la Laquette en modèles « Laquette amont » et « Laquette aval » au droit de l'autoroute A26 a été légèrement modifié, en prolongeant le modèle amont jusqu'à Witternesse, où une station de mesures DIREN fournit des données limnimétriques et débitmétriques depuis 1993, permettant ainsi un calage plus juste du modèle et notamment une prise en compte de la plaine d'inondation de Quernes en rive droite de la Laquette.

Si l'on considère la Laquette dans sa globalité, le linéaire modélisé a été multiplié par 1.7 par rapport au modèle Haecon, avec un linéaire supplémentaire de 31.9 km (45 960 ml pour Haecon et 77 820 ml pour Egis Eau) et le nombre d'ouvrages toutes catégories confondues a été plus que doublé (98 pour Haecon et 210 pour Egis Eau).

Ces écarts sont en grande partie dûs à l'extension du modèle « Laquette Amont », et notamment l'ajout de la Tirmande et des branches amont du Surgeon et de la Laquette, avec un linéaire et un nombre d'ouvrages qui ont été doublés sur cette partie amont (18 300 ml pour Haecon et 46 400 ml pour Egis Eau, soit un ajout de 28 200 ml et en termes d'ouvrages : 34 pour Haecon et 153 pour Egis Eau) : ces extensions n'ont été permises que par l'utilisation de Infoworks CS, car dans le cas de ravines comme la Tirmande (débit de fond = 0), ou de petits ruisseaux et des parcours supérieurs de la Laquette et surtout de Surgeon, il était impossible d'intégrer ces éléments dans un modèle RS.

Concernant l'hydrologie des modèles et notamment les découpages en bassins versants pour Infoworks CS ou en hydrogrammes d'entrée pour Infoworks RS, l'incrémentation des modèles est encore plus significative, avec une multiplication par 3 des entités d'apport sur la globalité de la Laquette (24 pour Haecon et 74 pour Egis Eau, dont 61 bassins élémentaires sur les parties amont contre 15 pour le modèle initial).

Fin 2009, le linéaire modélisé atteignait donc 78 km de cours d'eau, fossés et bras de ressuyage, soit 764 liens hydrauliques pour le modèle amont et 448 liens hydrauliques pour le modèle aval : plus de 1300 éléments hydrauliques et hydrologiques décrits au total.

2.7.2.2 2ème évolution par Egis Eau en 2010-2011 : modèle unique Infoworks CS

Malgré le contexte de plaine et de niveaux d'eau permanents souvent assez élevés, il est apparu, en raison particulièrement des mailles, des nombreux casiers interconnectés en crue mais dont les fossés de liaison sont secs en période initiale, et de l'anthropisation du réseau hydrographique (endiguements et merlonnages, biefs perchés), que le modèle aval sous Infoworks RS demeurait instable et, afin de pallier à cette instabilité, nécessitait l'instauration de conditions initiales (débits de fond et niveaux d'eau) qui ne correspondaient pas à la réalité du système en particulier hors périodes hivernales.

D'autre part, la mise à disposition par l'EPTB Lys, à partir de 2010, de données topographiques beaucoup plus nombreuses (étendue, densité), nous permettait de décrire de très nombreux casiers et les conditions d'inondabilité dans ces casiers, qui n'avaient pas été suffisamment décrits antérieurement faute de profils en travers de zones inondables, densités suffisantes : l'incrémentation des modèles avec ces casiers supplémentaires, supposait dès lors de nombreux liens inter-casiers supplémentaires, secs en dehors des crues, et donc des instabilités supplémentaires du modèle aval.

Il est apparu, dès lors, plus pertinent de regrouper toute la modélisation en un seul modèle hydraulique construit sous Infoworks CS, qui a permis :

- D'une part de compléter et finaliser cette étude de faisabilité ;
- D'autre part d'établir une méthodologie « pilote » pour la modélisation fine aux fins de la cartographie générale d'inondabilité, en cours d'élaboration pour l'EPTB Lys.

Ces modifications ont abouti à la structure suivante :

Structures décrites au modèle	LAQUETTE -
Nombre Nœuds	1304
Nombre tronçons rivière	1090
Nombre conduites	190
Nombre d'ajutages et vannes	50
Nombre de casiers	54
Nombre liens de débordement et surverse	393
Nombre sous-bassins versants et bassins d'alimentation des nappes	69 5

Tableau 25 : Structures du modèle complet final Infoworks CS d'Egis Eau

Par rapport au modèle en version 2, le modèle en version 3 et en situation non aménagée, présente :

- 200 nœuds supplémentaires ;
- 170 tronçons de cours d'eau supplémentaires ;
- 630 autres liens hydrauliques (surverses et points de débordements, conduites et ouvrages de contrôle), soit un nombre doublé par rapport à la version antérieure, lié notamment à l'alimentation de 54 casiers (hors zones de casiers, à l'amont notamment et hors zones aménageables et zones d'enjeux, les tronçons sont décrits en sections complexes lit mineur/lit majeur).

En 2011, le linéaire modélisé atteignait donc 80 km de cours d'eau, fossés et bras de ressuyage, soit près de 2000 éléments hydrauliques et hydrologiques décrits au total, et une densité moyenne supérieure à 20 liens hydrauliques par km.

Parmi les secteurs densifiés ou ajoutés au modèle dernière version, on citera :

- La densification de la description des Pâtures d'Aire ;
- Une description plus détaillée des conditions de débordement de la Laquette en rive gauche vers les casiers du Mardyck (de Fort Mardyck à la RD 943), lesquelles ont une incidence sur les débordements en rive droite et le fonctionnement des Pâtures d'Aire ;
- Une description plus détaillée des casiers et drains de surface en rive droite de la Laquette de Witternesse aux Pâtures d'Aire (secteurs de Montgré et de l'Abbaye St André), également importante pour décrire le fonctionnement des Pâtures d'Aire ;
- L'extension du modèle de la Laque en aval du Canal à Grand Gabarit, jusqu'à l'exutoire à la Lys Canalisée (écluse de Cense à Witz).

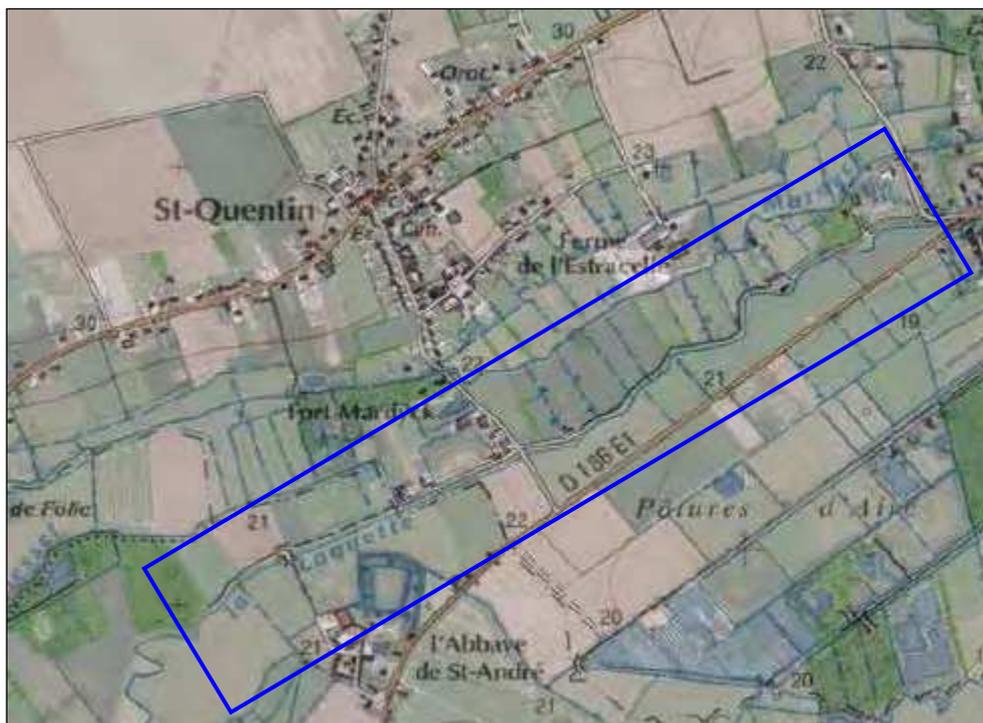


Figure 41 : Zone de densification du modèle V3 – le Mardyck

2.7.3 Calage des paramètres hydrologiques et hydrauliques

2.7.3.1 Données hydrologiques présidant à la description des conditions de ruissellement et au calage

Pluviométrie et hydrométrie

Les données hydrologiques utilisées pour le calage du modèle Laquette sont :

- La pluviométrie horaire interpolée via la méthode des polygones de Thiessen par Haecon lors de leur étude hydraulique à partir des données pluviométriques de 1993 à 2003 aux stations DIREN de Herbelles et Aire-sur-la-Lys et de Météo France de Fiefs et Radinghem ;
- La pluviométrie à pas de temps 5 min au poste de Norrent Fontes pour l'événement exceptionnel orageux de juillet 2005 ;
- Les données limnimétriques et débitmétriques mesurées à la station DIREN de Witternesse (bassin versant de 86 km²) et disponibles de 1993 à 2008 à un pas de temps variable (lié à l'évolution des valeurs).

Pour la crue de juillet 2005, le caractère orageux de l'événement nous a incités à utiliser une pluviométrie à pas de temps très court afin de retranscrire le plus fidèlement possible dans le modèle la rapidité et l'intensité de l'événement.

Le poste de Norrent-Fontes, instrumenté par OTEC dans le cadre d'une campagne de mesures temporaires (non encore installé pour les crues de 1993 à 2003), a permis de récupérer ces données pluviométriques à pas de temps court.

Les parties aval du modèle (Laquette aval de Witternesse, Mardyck, Laque) n'ont pu être véritablement calées sur des données mesurées faute de station limnimétrique et/ou débitmétrique.

Toutefois :

- le sous-bassin versant du Mardyck et les sous-bassins agricoles entre Witternesse et les Pâtures d'Aire (environ 300 ha pour ces derniers), peuvent faire l'objet d'analogies par rapport aux calages des sous-bassins en amont de Witternesse ;
- les apports ruraux drainés par la Laquette aval apparaissent, au vu de la superficie des bassins versants en jeu et de leur typologie (pentes modérées à faibles) comme faibles par rapport à ceux de la Laquette amont (et de ses affluents), et en tous cas, contribuant peu aux débits de pointe sur la Laquette (en revanche, ils ne sont pas à négliger dans l'alimentation des Pâtures d'Aire) ;
- les secteurs des Pâtures d'Aire et de la Laque, notamment en hiver, sont fortement réalimentés par les apports de nappe, apports qui sont pris en compte par différentes hypothèses d'apports de nappe présentées plus haut.

Pour les parties aval du modèle, il s'agit donc de s'assurer que pour les pluies réelles simulées, les zones de désordres et de débordements sont respectées quantitativement et qualitativement et que le fonctionnement global des cours d'eau, biefs et autres ouvrages est cohérent avec les investigations menées sur le terrain : c'est en cela que l'apport des données LIDAR, traduit par la version 3 de la modélisation, a été déterminant pour la fiabilisation de cette représentation du réseau hydrographique et de son fonctionnement qu'est le modèle.

Description hydrologique des sous-bassins versants de la Laquette

La caractérisation hydrologique (pentes, nature et occupation des sols) des bassins versants joue un rôle prépondérant dans la définition initiale des coefficients de ruissellement puis dans leur évolution successive durant les étapes de calage afin de s'assurer, in-fine, de la cohérence des paramètres hydrologiques obtenus après calage.

Occupation des sols des bassins versants amont

Ainsi, le bassin versant amont, d'une superficie totale de 7 770 ha est à forte dominante rurale, avec plus de 90% de terres arables et de prairies, et jusqu'à 95% pour la Tirmande et le Surgeon, et les cultures y sont nettement prédominantes.

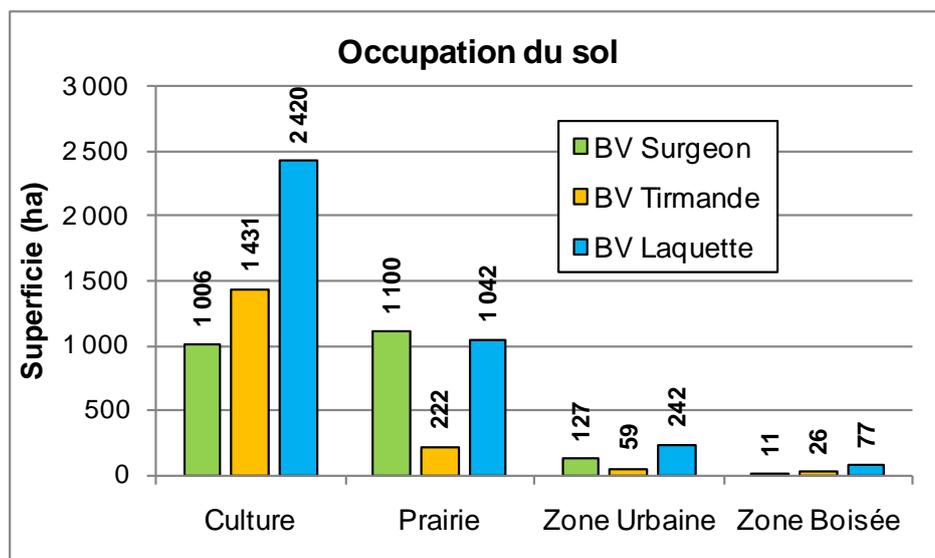
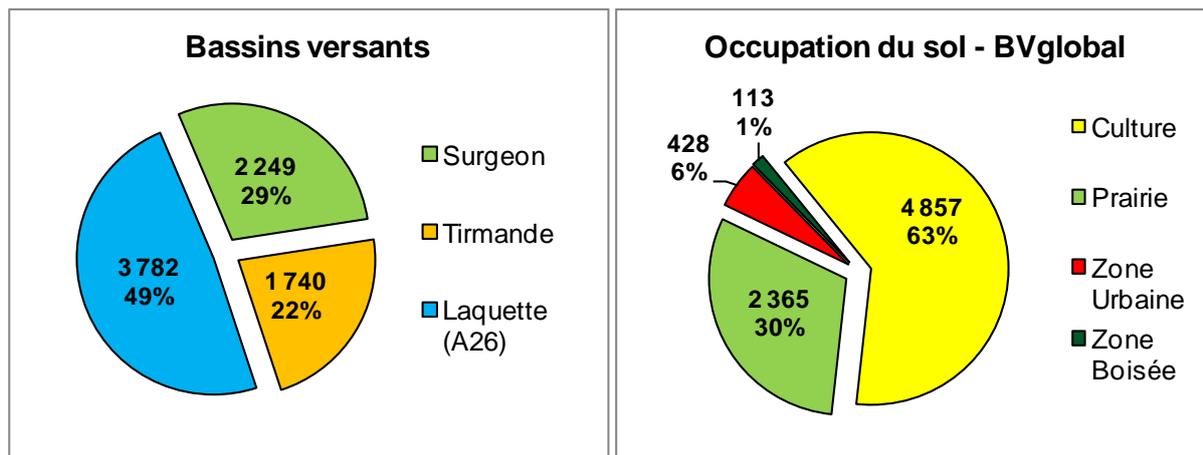


Figure 42 : Occupation des sols sur les sous-bassins versants de la Laquette amont

Au vu de l'occupation des sols, le bassin versant de la Tirmande apparaît comme plus sensible aux phénomènes de ruissellement avec une part importante de zones cultivées (82% de sa superficie totale), contrairement au bassin versant du Surgeon pour lequel la répartition entre les terres arables et les prairies est nettement plus homogène (45% en culture et 49% en prairie).

Le bassin versant de la Laquette présente une répartition intermédiaire, proche de celle du bassin versant global (64% en culture et 28% en prairie).

Pentes des versants

Le bassin versant global présente des pentes faibles à moyennes sur 70% de sa superficie (35 % de pentes inférieures à 2% et 35 % de pentes comprises entre 2 et 5%). Cette répartition n'est pas identique sur les grands sous-bassins versants :

- Plus de 85% de la superficie des sous-bassins « Laquette aval » et « Tirmande » ont des pentes inférieures à 5% (dont respectivement 70% et 35% pour les pentes inférieures à 2%) d'où, a priori, une plus faible sensibilité au ruissellement ;
- Plus de 40% de la superficie des sous-bassins « Laquette amont » et « Surgeon » ont des pentes supérieures à 5% (dont respectivement 10% et 25% pour les pentes supérieures à 10%) d'où, a priori, une plus forte sensibilité au ruissellement.

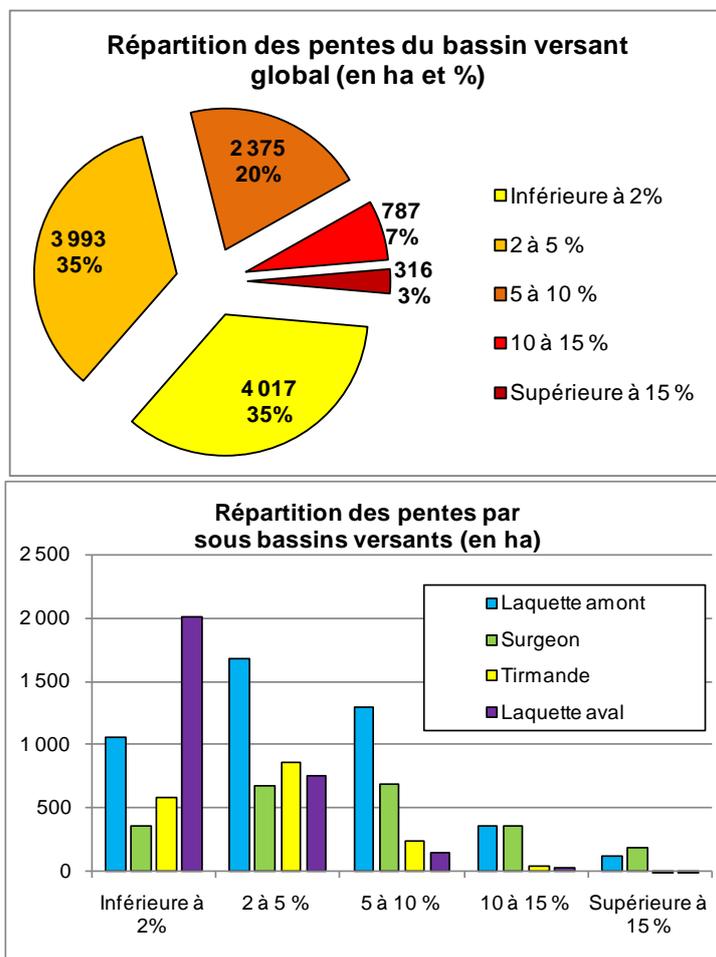


Figure 43 : Répartition des pentes sur le bassin versant de la Laquette amont

2.7.3.2 Choix et caractéristiques des évènements de calage

Evénements remarquables ayant fait l'objet d'arrêtés de Catastrophe Naturelle

Depuis 1988, 11 événements hydrologiques ont donné lieu à des arrêtés de Catastrophe Naturelle (CatNat) dont 7 en période hivernale (d'octobre à février) et 4 en période estivale (de mai à juillet).

ARRETES DE CATASTROPHE NATURELLE	Aire sur la Lys	Witternesse	Quernes	Lièttres	Estrée Blanche	Enquin les Mines	Erny Saint Julien	Bomy	Flechin
20/01/1988 à 25/02/1988	√							√	
18/11/1991 à 22/11/1991	√								
11/05/1993 à 11/05/1993		√		√	√				
19/12/1993 à 02/01/1994	√	√	√		√		√		√
08/12/1994 à 05/02/1995	√		√		√	√	√	√	
25/12/1999 à 29/12/1999	√	√	√	√	√	√	√	√	√
09/05/2000 à 09/05/2000	√				√	√			
28/02/2002 à 01/03/2002	√								
03/07/2005 à 04/07/2005	√	√	√	√	√				√
04/07/2006 à 04/07/2006	√								
24/10/2006 à 24/10/2006							√	√	

Tableau 26 : Arrêtés de Catastrophe Naturelle sur le bassin versant de la Laquette

Pour les 7 événements majeurs survenus entre 1993 et 2005, le tableau suivant récapitule la pluviométrie et les débits maximaux horaires observés, ainsi que les périodes de retour estimées des événements :

Evénements classés Catastrophe Naturelle	08/05/1993 à 14/05/1993	01/12/1993 à 30/04/1994	01/12/1994 à 30/07/1995	01/12/1999 à 30/01/2000	09/05/2000 à 10/05/2000	27/02/2002 à 31/05/2002	03/07/2005 à 04/07/2005
Débit horaire max (m3/s)	1.52	5.40	6.55	8.09	6.37	10.21	12.40
Occurrence des débits		2/5 ans	2/5 ans	5/10 ans	2/5 ans	10/20 ans	> 20 ans
Pluie horaire max (mm/h)	7.65	9.08	7.50	9.21	3.57	5.95	32.80
Occurrence des pluies	< 2 ans	50 ans					

Tableau 27 : Caractérisation des 7 événements classés CatNat

L'estimation des périodes de retour des événements pluviométriques, sur une durée d'une heure, s'est faite sur la base des données Intensité – Durée – Fréquence de Météo France à la station de Lille-Lesquin. L'occurrence des débits de pointe horaire est basée sur les débits de référence calculés par la DIREN à la station de Witternesse.

Evénements écartés pour le calage et les tests de reproductibilité - justifications

Les événements suivants ne seront pas exploités dans la suite de l'étude :

- Ceux de 1988 et 1991 puisque les données hydrologiques ne sont disponibles et cohérentes que depuis 1993 ;
- Celui de mai 1993 étant donné les incohérences entre les données de pluies et de débits
- Ceux de juillet et octobre 2006 et celui de février 2002 (données également peu cohérentes) puisqu'ils n'ont affecté qu'un nombre assez limité de communes.

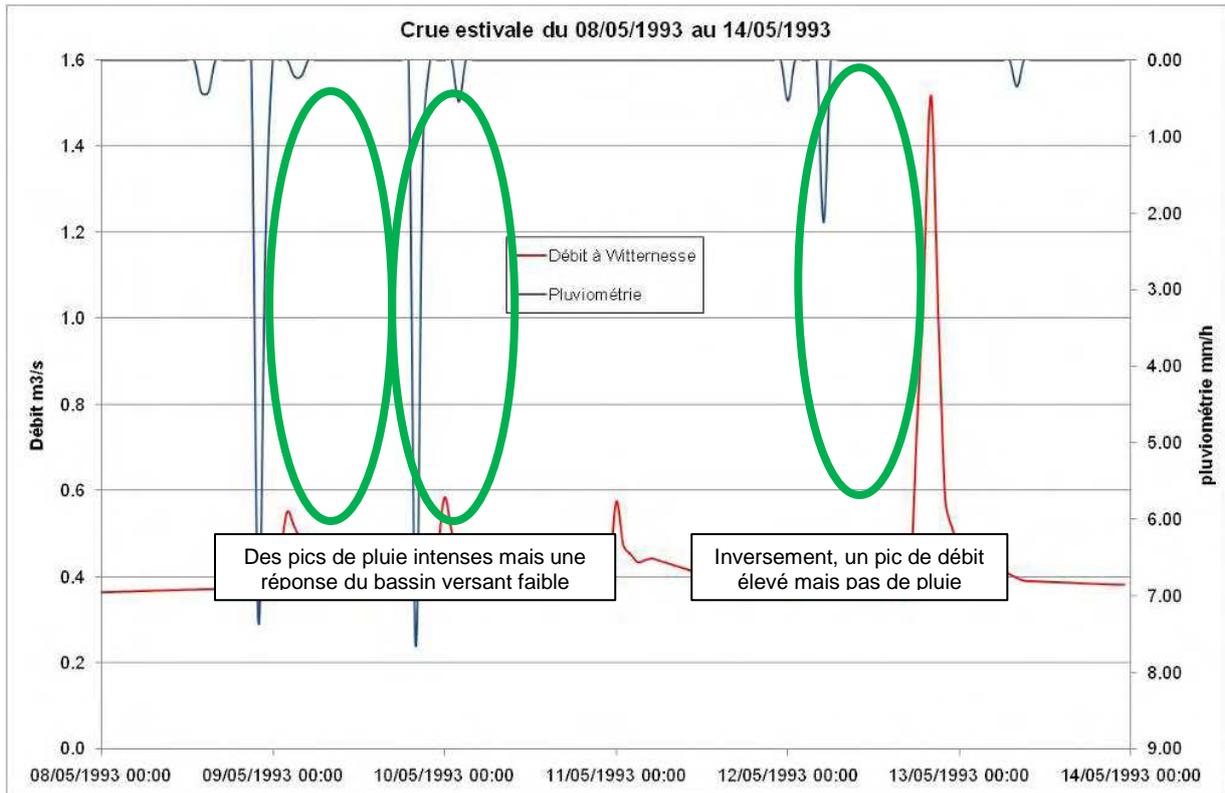


Figure 44 : Graphique pluie / débit pour la crue de mai 1993

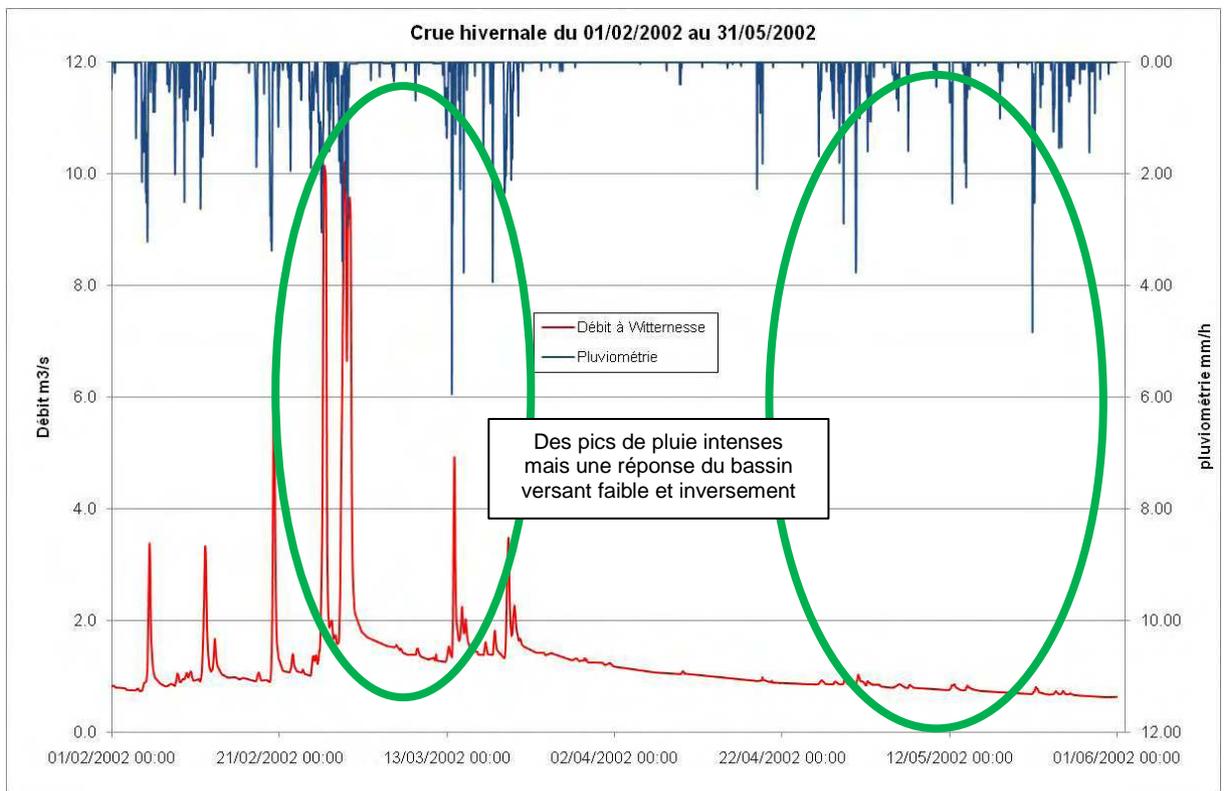


Figure 45 : Graphique pluie / débit pour la crue de février 2002 à mai 2002

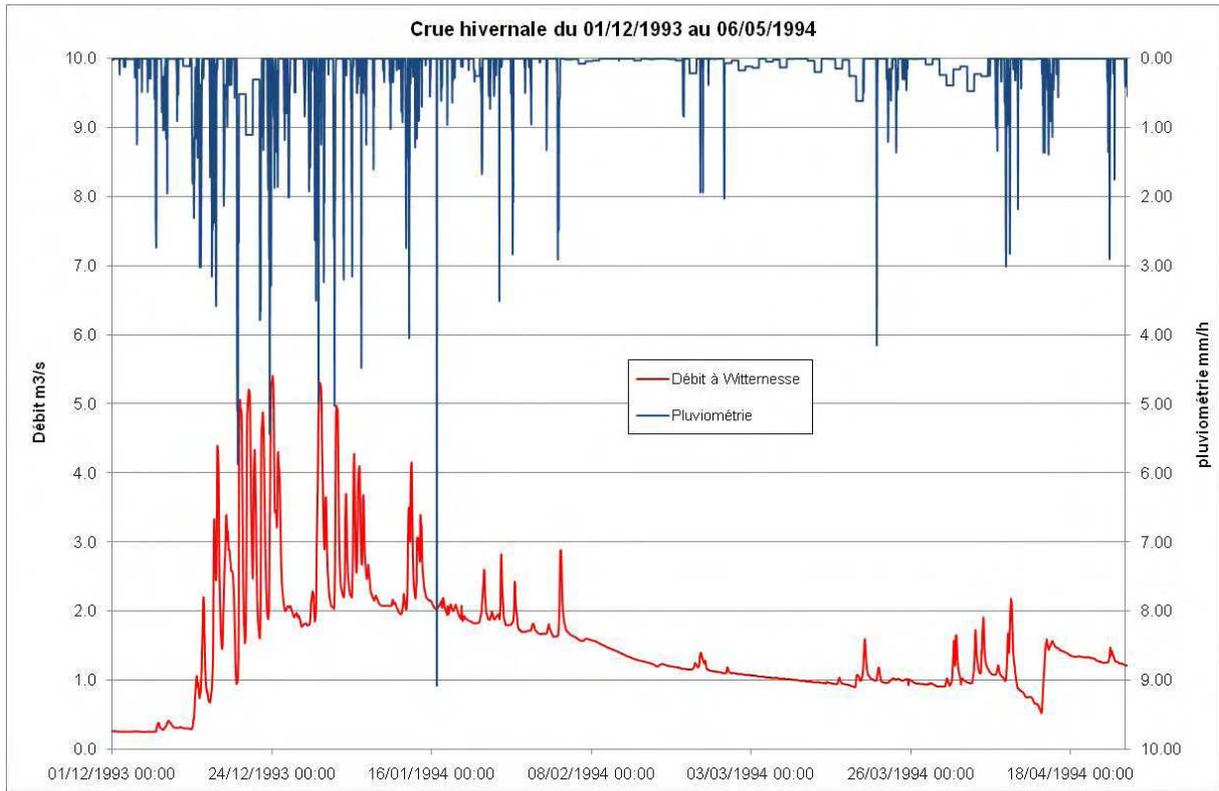


Figure 46 : Graphique pluie / débit pour la crue de décembre 1993 à mai 1994

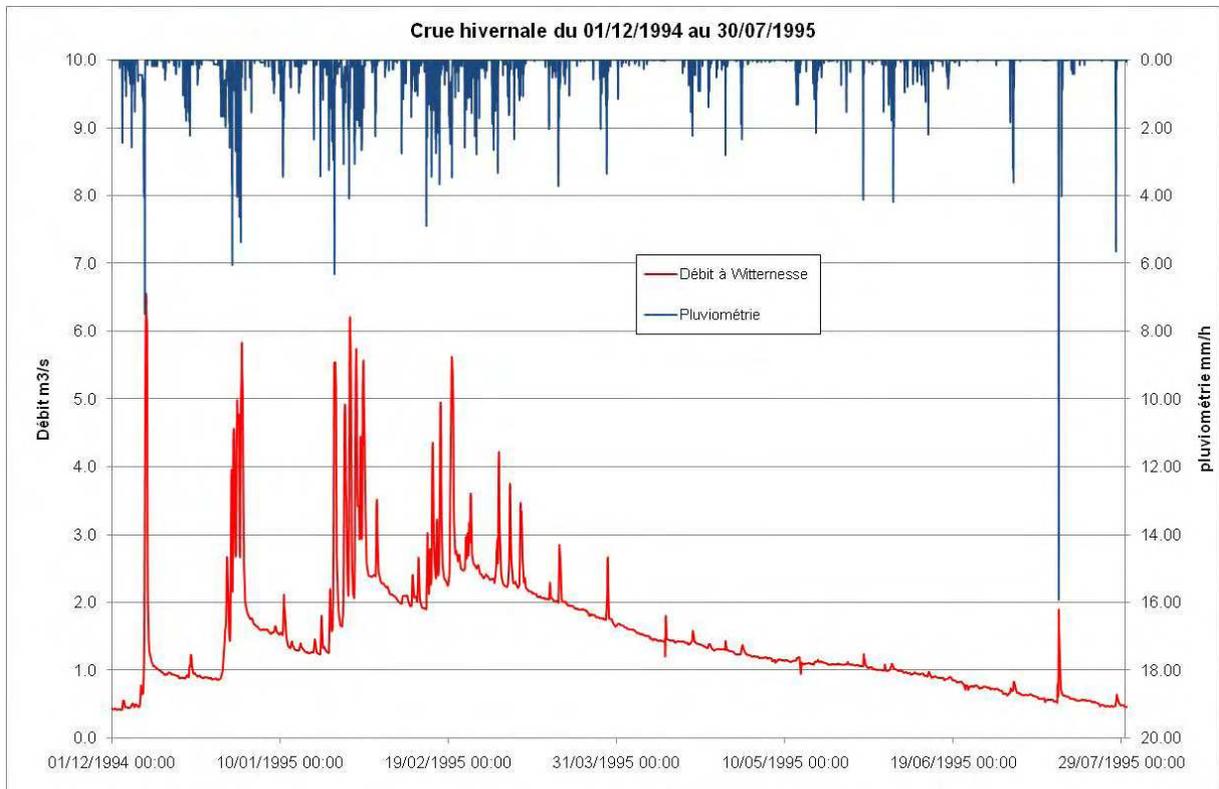


Figure 47 : Graphique pluie / débit pour la crue de décembre 1994 à juillet 1995

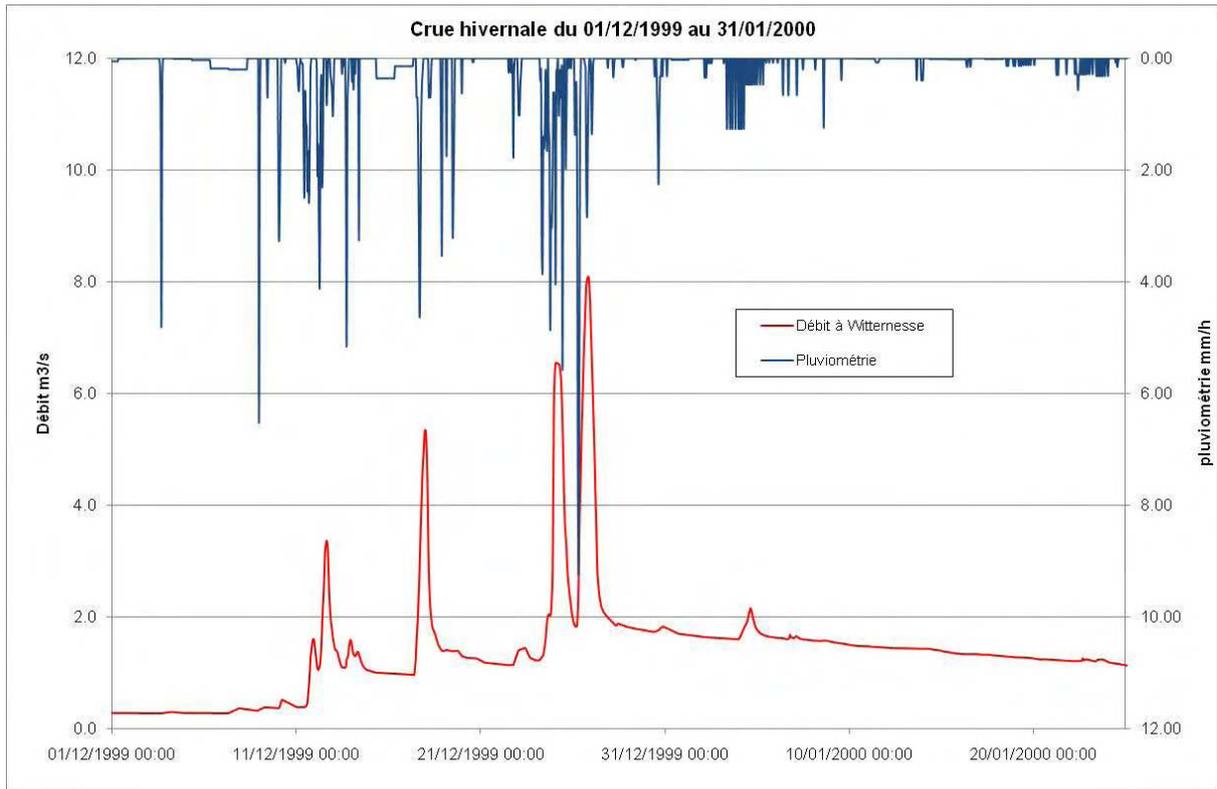


Figure 48 : Graphique pluie / débit pour la crue de décembre 1999

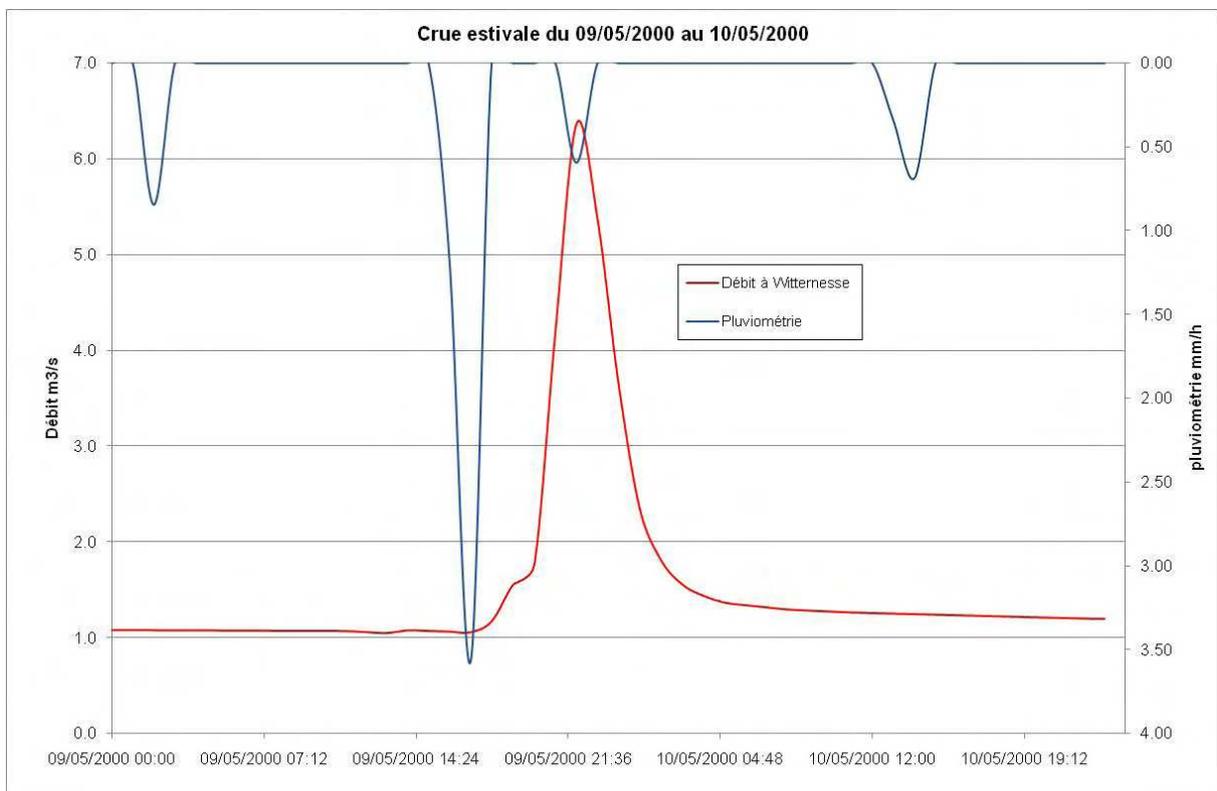


Figure 49 : Graphique pluie / débit pour la crue de mai 2000

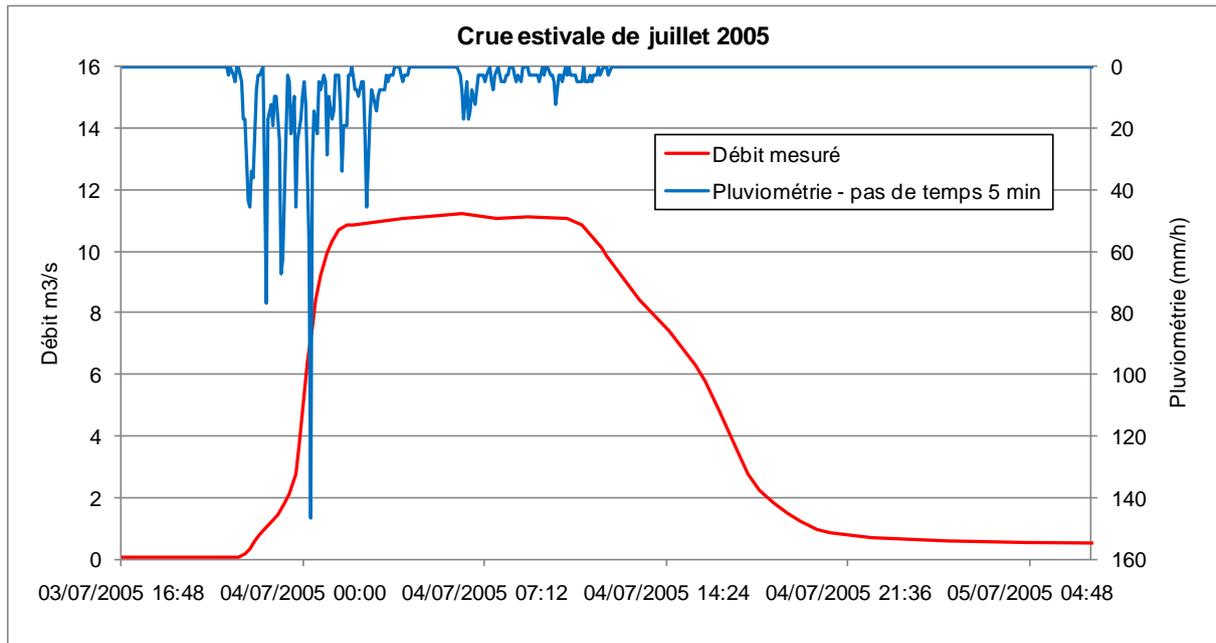


Figure 50 : Graphique pluie / débit pour la crue de juillet 2005

Estimation des coefficients de restitution pour les crues estivales

Le coefficient de restitution des sols correspond au ratio du volume ruisselé mesuré à Witternesse sur le volume d'eau s'abattant sur les versants (soit la pluviométrie * la surface du bassin versant au droit de Witternesse).

Les orages (d'été) surviennent pendant des périodes où les sols sont peu saturés (pas ou peu de phénomène de ressuyage) et le niveau des nappes est relativement bas : l'occupation des sols peut en revanche être très variée durant la saison orageuse qui s'étend presque de mars à novembre.

La réponse hydrologique du bassin versant est donc uniquement liée au phénomène de ruissellement de surface. Dans ce cas, le coefficient de restitution correspond en fait au coefficient de ruissellement des sols.

	Du 09/05/2000 à 14h00 au 10/05/200 à 06h00 (16h)	Du 03/07/2005 à 06h00 au 05/07/2005 à 06h00 (48h)
Volume ruisselé (m3)	133 435	782 615
Pluie (mm)	5.35	136.00
Coefficient de restitution	0.29	0.07

Tableau 28 : Coefficients de restitution estimés pour les pluies estivales

Cette première estimation des coefficients de ruissellement indique des conditions hydrologiques très différentes entre les événements de mai 2000 et celui de juillet 2005, alors que l'on pourrait s'attendre en termes de couvert végétal et d'apports de nappe, à des conditions certes plus pénalisantes en mai, mais pas avec un tel écart de 1 à 4.

Ce constat est confirmé par les figures précédentes qui indiquent des débits de fond (ou plus sûrement des débits de restitution des apports de nappe pour mai 2000) quasiment nuls pour la crue de juillet 2005 et de l'ordre de 1.07 m³/s pour mai 2000, valeur élevée au regard de celles mesurées pour les crues hivernales (notamment en décembre – janvier) et qui témoigne de sols assez fortement saturés (conséquence très probable de la crue de décembre 1999 à janvier 2000).

Si l'on s'affranchit de ces apports constants de vidange des nappes pour mai 2000 (en soustrayant au volume ruisselé total ces apports), le coefficient de restitution calculé apparaît comme nettement plus faible avec une valeur de l'ordre de 0.16.

Ce coefficient, certes plus élevé que celui calculé en 2007 dans l'étude Haecon (environ le double), apparaît toutefois comme cohérent puisque lorsque les sols et nappes sont saturés/remplis suite à un premier cycle pluvieux important (ce qui est le cas pour mai 2000 avec la crue de décembre 1999 – janvier 2000), les coefficients de ruissellement sont, pour des sols identiques (nature, couverture, pente), plus forts que s'il n'y a pas d'antécédent pluvieux.

Dans la suite de l'étude, nous retiendrons la crue de juillet 2005 pour caler le « modèle ETE » car la pluie de mai 2000 présente des conditions hydrologiques particulièrement pénalisantes et davantage typiques des événements hivernaux (vidange des nappes et sur-saturation des sols).

Estimation des coefficients de restitution pour les crues hivernales

Pour les crues hivernales, un coefficient de restitution moyen sur la totalité de l'événement a été calculé pour les 4 crues hivernales majeures, prenant ainsi en compte les apports issus du ruissellement, du réessuyage et de la nappe profonde :

	01/12/1993 au 15/02/1994	01/12/1994 au 15/04/1995	01/12/1999 au 15/01/2000	27/02/2002 au 31/03/2002
Volume ruisselé (m3)	12 299 368	22 509 530	5 635 663	8 115 504
Pluie (mm)	430.06	655.08	253.13	276.12
Coefficient de restitution	0.33	0.40	0.26	0.34

Tableau 29 : Coefficients de restitution estimés pour les événements hivernaux

Les coefficients de restitution globaux apparaissent comme relativement élevés avec une moyenne sur les 4 événements hivernaux de 0.33.

Toutefois, si l'on s'affranchit des apports de nappe en dichotomisant les événements hydrologiques sur des pas de temps plus fins et en soustrayant au volume ruisselé total les apports de nappe estimés, les coefficients de ruissellement calculés apparaissent comme nettement plus faibles avec une valeur de l'ordre de 0.08. (cf les figures suivantes).

Conclusions sur les coefficients de ruissellement moyens

Le coefficient de ruissellement moyen du bassin versant amont en période estivale est de l'ordre de 0.07 (crue de juillet 2005).

Les apports de nappe en période hivernale sont à l'origine d'au moins 50% des volumes ruisselés totaux mais avec des écarts relativement importants d'une pluie à l'autre (de 35% à 80%).

Le coefficient de restitution du bassin versant en période hivernale est de l'ordre de 0.33 (entre 0.26 et 0.40 selon les événements) et, le coefficient de ruissellement moyen en s'affranchissant des apports de nappe, de l'ordre 0.08 en moyenne, avec toutefois des écarts sensibles selon les crues.

	Evenement de décembre 1993 à avril 1994					
	Pluie n°1	Pluie n°2	Pluie n°3	Pluie n°4	Pluie n°5	Pluie n°6
Volume ruisselé total (m3)	213 642	792 653	1 261 417	728 447	2 562 948	906 782
Apports de nappe (m3)	111 600	280 440	573 885	418 813	1 851 595	721 098
Pluie (mm)	38.29	42.00	94.22	37.68	92.11	29.77
Coefficient de restitution	0.03	0.14	0.08	0.10	0.09	0.07

Les coefficients de restitution sont calculés en s'affranchissant des apports de nappe

Moyenne des coefficients de restitution : 0.09

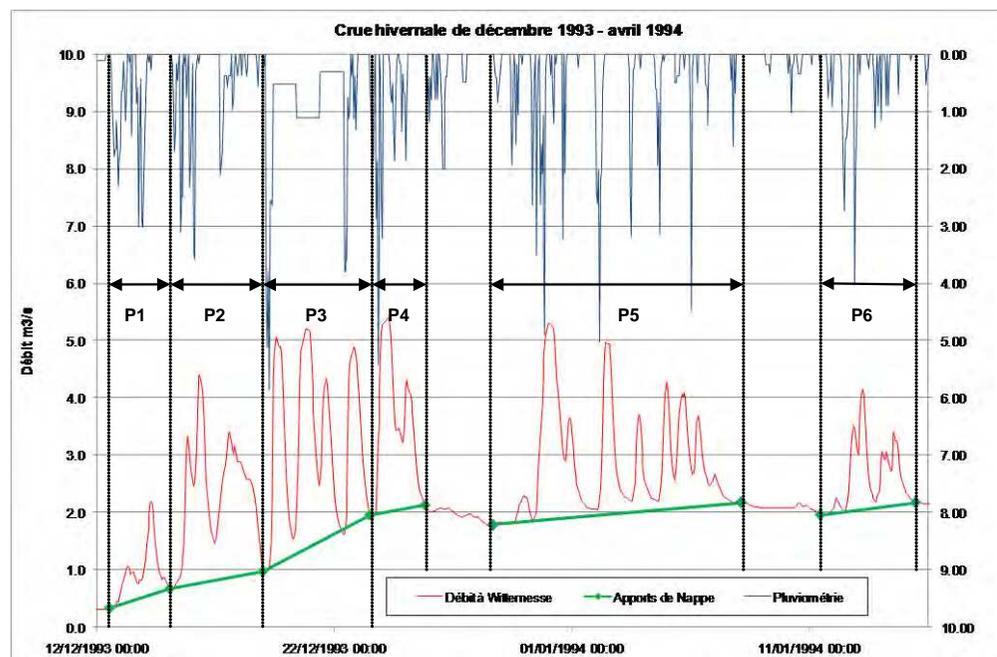


Figure 51 : Coefficients de restitution détaillés pour la période déc.93 / avr.94

	Evenement de décembre 1994 à juillet 1995				
	Pluie n°1	Pluie n°2	Pluie n°3	Pluie n°4	Pluie n°5
Volume ruisselé total (m3)	547 299	1 654 600	3 728 905	1 261 234	980 190
Apports de nappe (m3)	245 700	938 675	2 614 248	984 528	759 510
Pluie (mm)	42.85	115.40	164.28	51.88	37.25
Coefficient de restitution	0.08	0.07	0.08	0.06	0.07

Les coefficients de restitution sont calculés en s'affranchissant des apports de nappe

Moyenne des coefficients de restitution : 0.07

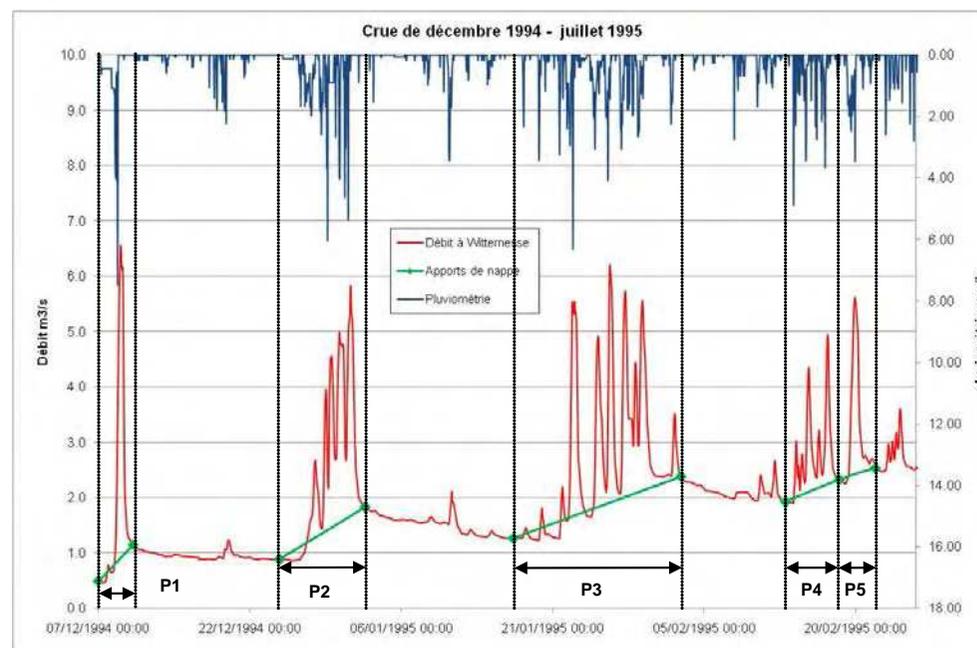


Figure 52 : Coefficients de restitution détaillés pour la période déc.94 / juil.95

Evenement dec 1999 - janv 2000			
	Pluie n°1	Pluie n°2	Pluie n°3
Volume ruisselé total (m3)	417 240	349 877	1 255 004
Apports de nappe (m3)	227 536	166 514	532 834
Pluie (mm)	49.17	18.25	87.40
Coefficient de restitution	0.04	0.12	0.10

Les coefficients de restitution sont calculés en s'affranchissant des apports de nappe

Moyenne des coefficients de restitution : 0.09

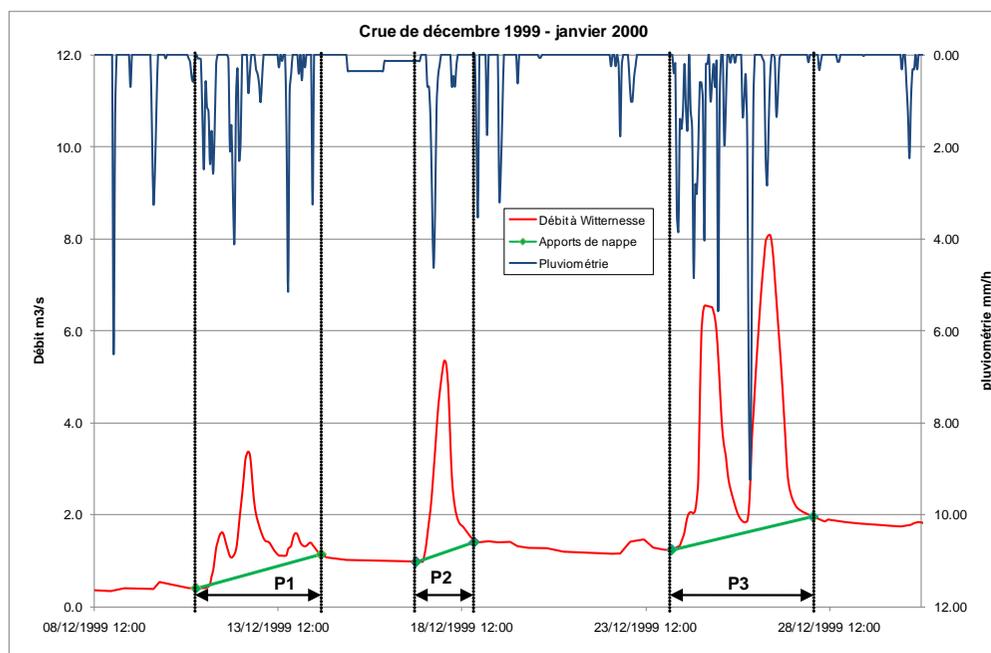


Figure 53 : Coefficients de restitution détaillés pour la période déc.99 / janv.2000

Evenement de février / mars 2002			
	Pluie n°1	Pluie n°2	Pluie n°3
Volume ruisselé total (m3)	331 753	2 048 162	536 015
Apports de nappe (m3)	162 891	769 363	408 386
Pluie (mm)	23.77	83.64	33.67
Coefficient de restitution	0.08	0.18	0.04

Les coefficients de restitution sont calculés en s'affranchissant des apports de nappe

Moyenne des coefficients de restitution : 0.10

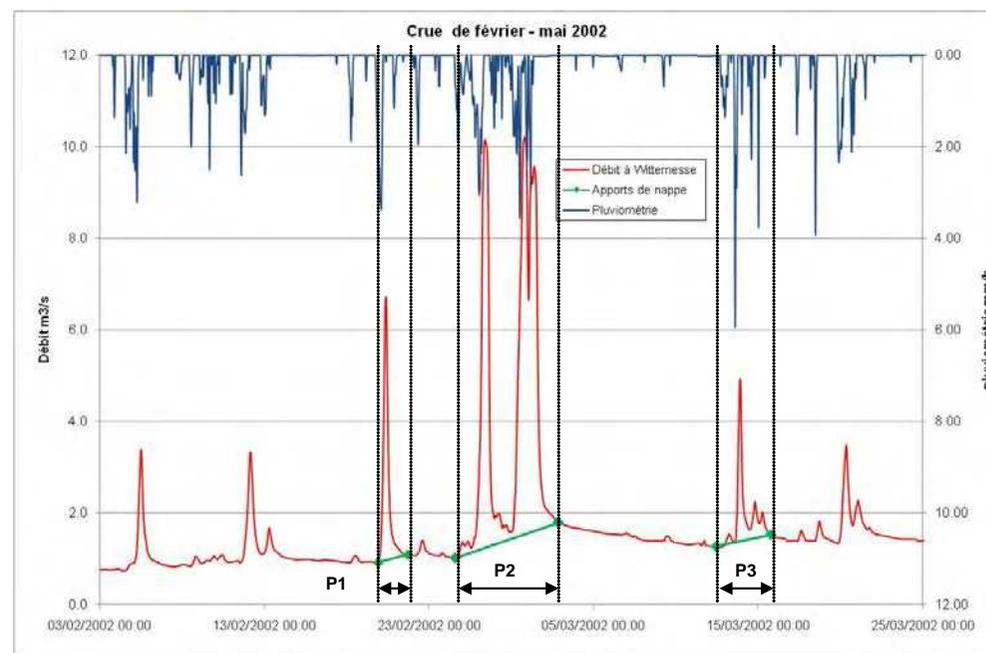


Figure 54 : Coefficients de restitution détaillés pour la période fév. / mars. 2002

2.7.3.3 Calage et validation du modèle « ETE »

Il s'agit de caler les apports de ruissellement pour la crue de juillet 2005 en faisant évoluer les paramètres hydrologiques et hydrauliques de calage.

La reproductibilité du modèle, qui ne peut être testée sur une autre crue réelle, faute d'événement présentant des conditions hydrologiques similaires, sera vérifiée sur la base des désordres et débordements recensés lors de nos visites de terrain en présence (ou non) des élus et riverains locaux.

Calage sur l'événement de juillet 2005

Paramétrages hydrologiques et hydrauliques

Après plusieurs simulations itératives, les paramètres moyens de ruissellement retenus sont :

- 0.06 pour les zones cultivées (routing de 8)
- 0.03 pour les zones en prairies (routing de 14)
- 0.20 pour les zones urbanisées (routing de 20)
- 0.02 pour les zones boisées (routing de 14)

Ces paramètres sont adaptés selon les pentes des sous-bassins.

Sur l'ensemble du bassin versant, le coefficient moyen de ruissellement est de 0.058 et la surface active de 450 ha (surface totale de 7 770 ha au droit de l'autoroute).

Afin de conceptualiser les effets d'écrêtement du débit de pointe et de décalage temporel, liés au chevelu de collecte qui n'est pas modélisé (fossés, talwegs, réseaux de collecte, ...), les longueurs d'écoulement des sous-bassins versants ont été multipliées par un coefficient correcteur (1.2) et les coefficients de routing retenus (paramètre « d'étirement » du réseau) sont assez élevés.

Le principe reste identique pour le calage du « modèle HIVER ».

Paramétrages hydrauliques particuliers

Le coefficient de Manning (témoin de la rugosité du lit mineur) a été fixé en moyenne à 0.05 après quelques simulations successives : cette valeur correspond à un coefficient de Strickler de 20.

De plus, l'épisode de juillet 2005 a fait l'objet de conditions hydrauliques particulières au droit de l'aqueduc SNCF situé sur le cours d'eau de la Tirmande à l'aval de Ligny-les-Aires car des témoignages nous ont indiqué une obstruction partielle de cet ouvrage : afin de conceptualiser ces embâcles, un orifice, placé au droit de l'aqueduc, a permis de limiter le débit à 1.5 m³/s (débit maximal admissible dans une ouverture rectangulaire de 2 m de large et 0.40 m de haut), soit environ 1/5^{ème} du débit maximal admissible dans l'arche de 2 m de large et 1.30 m de haut.

La figure ci-après : Fonctionnement en charge de l'aqueduc de la Tirmande souligne l'importance de ces conditions hydrauliques particulières liées aux embâcles en comparant la courbe de niveaux d'eau obtenue grâce au modèle, avec ou sans embâcle, au droit du secteur sensible situé juste en amont de l'aqueduc de l'ancienne voie ferrée.

Le niveau d'eau dans la Tirmande passe localement de 56 mNGF à environ 59.5 mNGF lorsque l'aqueduc est obstrué au 4/5^{ème} de ces capacités hydrauliques maximales, engendrant ainsi des débordements hors du lit mineur de la Tirmande (TN à 58 mNGF).

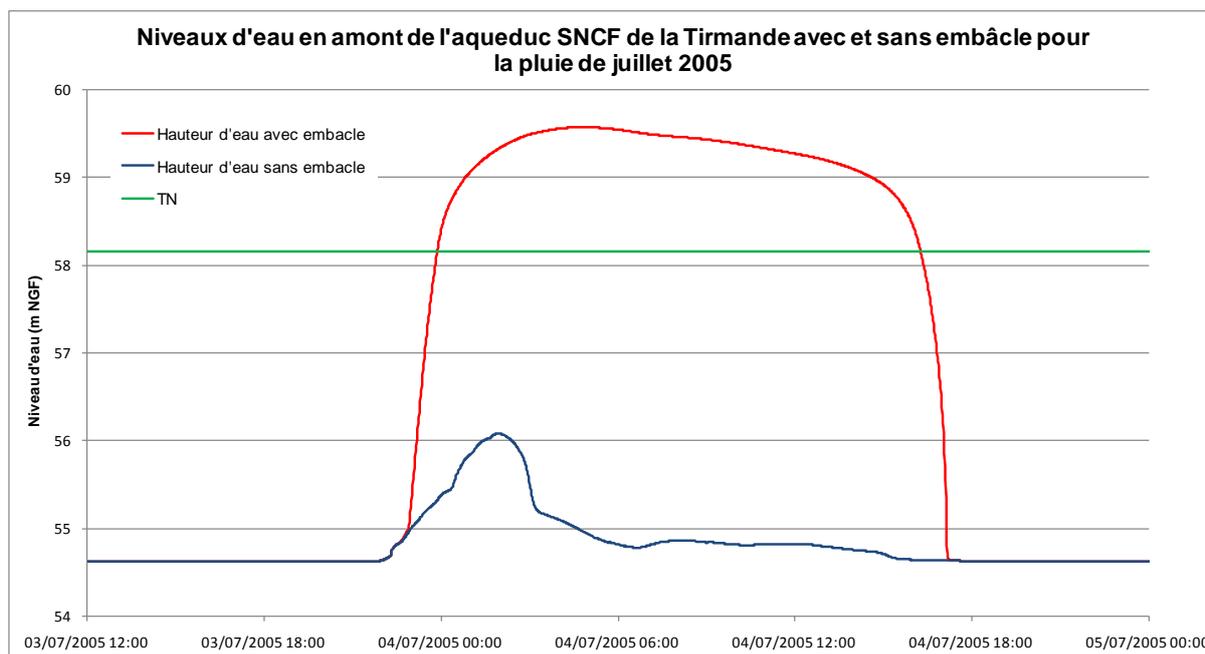


Figure 55 : Fonctionnement en charge de l'aqueduc de la Tirmande

Résultats du calage

Comparaison des mesures et des résultats du modèle		Du 03/07/2005 20h00 au 04/07/2005 20h00
Volume ruisselé global (m3)	Mesure	637 188
	Modèle	588 983
	<i>Ecart</i>	-7.6%
Débit maximum horaire (m3/s)	Mesure	11.21
	Modèle	11.16
	<i>Ecart</i>	-0.4%

Tableau 30 : Résultats du calage à Witternesse de l'événement de juillet 2005

L'hydrogramme obtenu avec le modèle calé est assez fidèle à la réponse hydrologique du bassin versant mesurée à Witternesse, avec notamment une bonne retranscription des volumes ruisselés (écart de 7.6%) et de l'écrêtage des débits de pointe (écart inférieur à 1% pour la valeur de débit seuil).

Pour cet événement, les débits de pointe mesurés (et ceux issus du modèle) atteignent une valeur seuil de 11.2 m³/s, témoignant d'un écrêtement très significatif des crues par les zones d'expansion de crue naturelles situées sur les versants amont de la Laquette et de ses affluents.

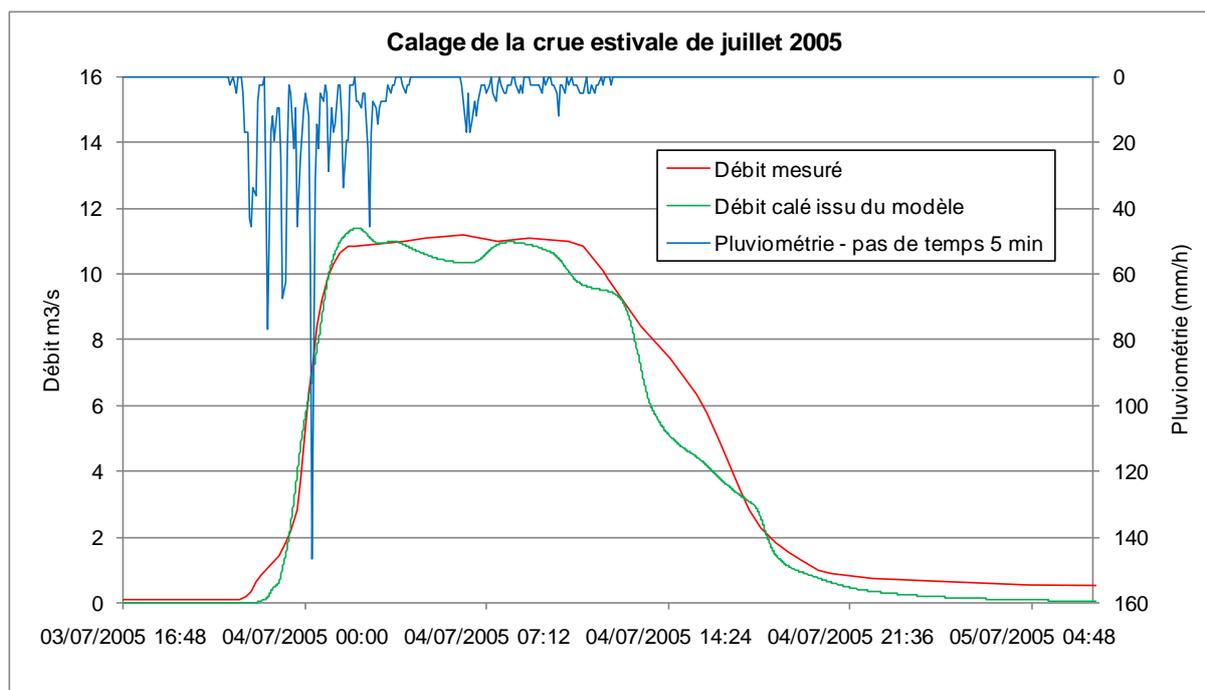


Figure 56 : Calage du ruissellement pour l'événement de juillet 2005

Validation du calage par localisation des points de débordement

La validation du calage par confrontation des points de débordement réels recensés et de ceux fournis par le modèle est d'autant plus intéressante et nécessaire pour cette crue qui présente un phénomène de laminage important dû aux inondations.

Lors des visites de terrain et des rencontres avec les élus locaux, certains secteurs sont apparus comme sensibles aux inondations et/ou au ruissellement non maîtrisé, lors de crues de grande ampleur (dates citées par les élus : l'orage de juillet 2005 et la crue hivernale de décembre 1999) :

■ ENQUIN-LES-MINES :

- Le centre d'Enquin-les-Mines, au croisement de la rue du Moulin et de la rue d'Adam, par débordement de la Laquette ;
- Le centre de Fléchinelle, le long de la D159 au croisement avec la Voyette de Fléchinelle, par débordement du Surgeon, seulement en décembre 1999.

■ ESTREE-BLANCHE :

- L'extrémité de la rue de la Laquette, par débordement de la Laquette (1 maison et un hangar inondés) ;
- Le centre d'Estrée-Blanche et notamment le secteur compris entre le cours d'eau et la rue de l'Eglise RD341, par débordement de la Laquette ;
- Les habitations situées en bordure de la D159 (Vallée de Fléchinelle), à proximité des Anciennes Mines, par débordement du Surgeon ;

- Les habitations le long de la D186 à Longhem, par débordement de la Tirmande (en 2005) ;
 - Les terres cultivées en rive droite de la Tirmande (habitations en rive gauche à la limite de l'inondation), en aval du secteur busé (arche de franchissement de l'ancien remblai SNCF – commune de Ligny-les-Aires) et en amont du passage sous la D341.
- **FLECHIN :**
- La zone naturelle localisée au niveau du site d'aménagement étudié de Cuhem ;
 - Le long de la route D95E à Boncourt, en amont de l'ancien moulin : les berges basses, la succession de passerelles privées et la pente faible du radier du cours d'eau conduisent assez régulièrement à une submersion de la route. Toutefois les habitations étant légèrement surélevées par rapport au niveau de la route, elles restent généralement hors eau (et ce même au point bas de la rue n°7) ;
 - Dans le centre de Fléchin, en bas de la route de Boncourt, une berge basse en rive droite, permettait (la berge a été rehaussée) à la rivière de sortir localement de son lit, sans toutefois générer de grave inondation ;
 - Dans le centre de Cuhem, entre la D77 et la D159, le long des Laquettes, la route et quelques unes des habitations situées à proximité ont déjà subi d'importantes inondations.
- **WITTERNESSE :**
- Les pâtures (et la ferme Montgré) situées en rive droite de la Laquette, en aval de Witternesse et jusqu'à l'Abbaye de Saint André, par débordement du cours d'eau et des fossés (Pont de Saint Quentin limitant) ;
 - Le centre de Witternesse, notamment la rue des Hours et la rue de Blessel, par débordement de la Laquette (jusqu'à 1 m d'eau en cas de forte crue) ;
 - Le centre de Witternesse par ruissellement et coulée de boue provenant du bassin rural de la Cavée Marianne via la route D186E et le chemin de la Cavée Marianne.
- **LIGNY-LES-AIRES :**
- Le long de la rue de Transvaal en amont de la section busée de la Tirmande (arche en pierre sous le passage de l'ancienne voie SNCF), par débordement du cours d'eau (arche de franchissement présentant un envasement important et une section, a priori, limitante lors des crues) ;
 - Le centre du lieu-dit « La Tirmande » par débordement du cours d'eau ;
 - Le long de la D90, entre le château d'eau et le centre de Ligny-les-Aires, par ruissellement des parcelles amont.
- **AIRE-SUR-LA-LYS :**
- Les Pâtures d'Aire sont touchées par les inondations mais aucun secteur à enjeux n'a été identifié comme soumis aux débordements

Les volumes débordés lors de la crue de juillet 2005 et estimés par le modèle calé sont récapitulés ci-dessous au Tableau ci-après : Volumes débordés en situation actuelle modélisée – Crue de juillet 2005.

La Figure: Zones de débordement amont pour l'événement de juillet 2005 présente les zones de débordement identifiées par la modélisation de calage, conformes aux secteurs indiqués par les élus.

N°	Site	Volume débordé (m3)
1	Erny Saint-Julien	5 777
2	Enquin les mines	9 597
3	Serny	5 432
4	Estrée blanche	19 701
5	Confluence Tirmande	41
6	Fléchinelle	3 874
7	Cuhem	10 744
8	Combe des Avesnes	1 109
9	Tirmande	26 654
10	Ligny les Aires	8 166
11	Febvin	6 838
12	Boncourt	4 308
13	Bomy	22 856
14	Rupigny	2 163
Tous	Total	127 259

Tableau 31 : Volumes débordés en situation actuelle modélisée – Crue de juillet 2005

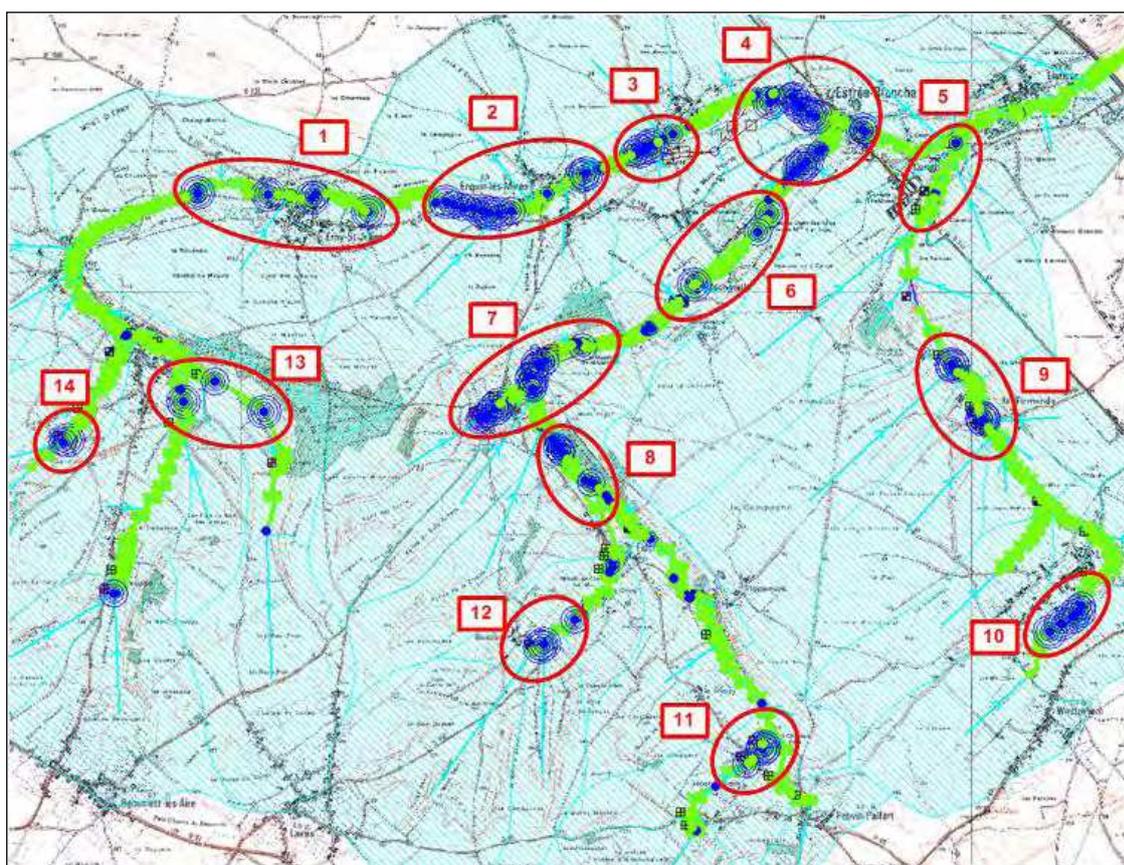


Figure 57 : Zones de débordement amont pour l'événement de juillet 2005

2.7.3.4 Calage du modèle « HIVER »

La prise en compte des phénomènes de ressuyage et des apports de nappe dans les simulations en période hivernale nécessite l'utilisation du module d'infiltration/restitution d'Infoworks CS, basée sur le principe du double réservoir linéaire.

Il s'agit, dans un premier temps, de caler les coefficients de ruissellement puis les paramètres agissant sur les sur-volumes liés aux apports de ressuyage et de nappe sur un événement de référence. Ici, l'événement retenu est celui de décembre 1994 à juillet 1995 qui présente, au vu des coefficients de restitution estimés par sous-événement, une certaine fiabilité dans les mesures et une apparente homogénéité dans la réponse hydrologique du bassin versant.

La reproductibilité du modèle (tant le ruissellement que les sur-volumes de nappe et de ressuyage) est ensuite testée sur les 2 autres événements hivernaux de décembre 1993 à février 1994 et de décembre 1999 à janvier 2000.

Calage sur l'événement de décembre 1994 à avril 1995

Dans un premier temps, il s'agit de caler les apports de ruissellement strict et donc de s'affranchir des phénomènes de nappe en générant les sur-volumes évoluant de manière constante (création d'une « droite » des apports de nappe) : la fin de l'hydrogramme de nappe proposée ci-dessous (à partir de début mars) est évidemment totalement fautive (en réalité, la pente de droite s'inverse dans des conditions saisonnières « moyennes » vers cette période).

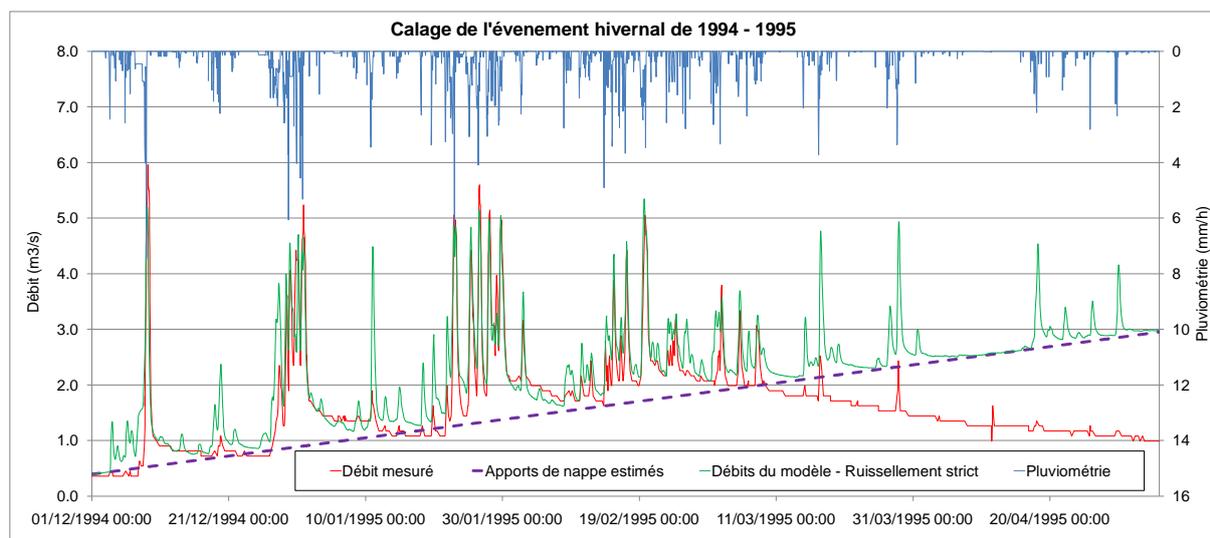


Figure 58 : Calage pour l'événement de déc. 1994 à avr.1995 – ruissellement

Après plusieurs simulations itératives, les paramètres de ruissellement moyens hivernaux retenus sont :

- 0.10 pour les zones cultivées (routing de 25)
- 0.04 pour les zones en prairies (routing de 30)
- 0.20 pour les zones urbanisées (routing de 20)
- 0.02 pour les zones boisées (routing de 30)

Sur l'ensemble du bassin versant, le coefficient moyen de ruissellement est de 0.086 et la surface active de 670 ha (surface totale de 7 770 ha au droit de l'autoroute).

Dans un second temps, les paramètres conceptuels du module Infiltration / Restitution ont été calés afin de conceptualiser les apports de ressuyage et de nappe.

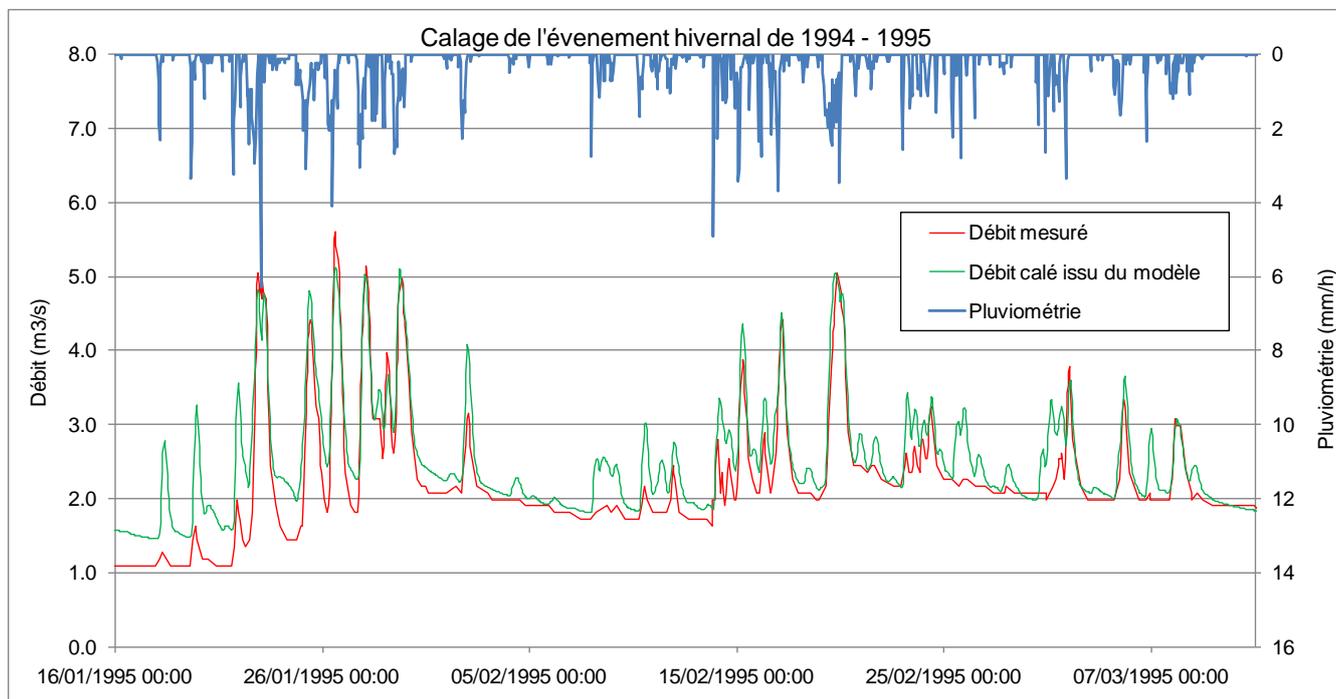
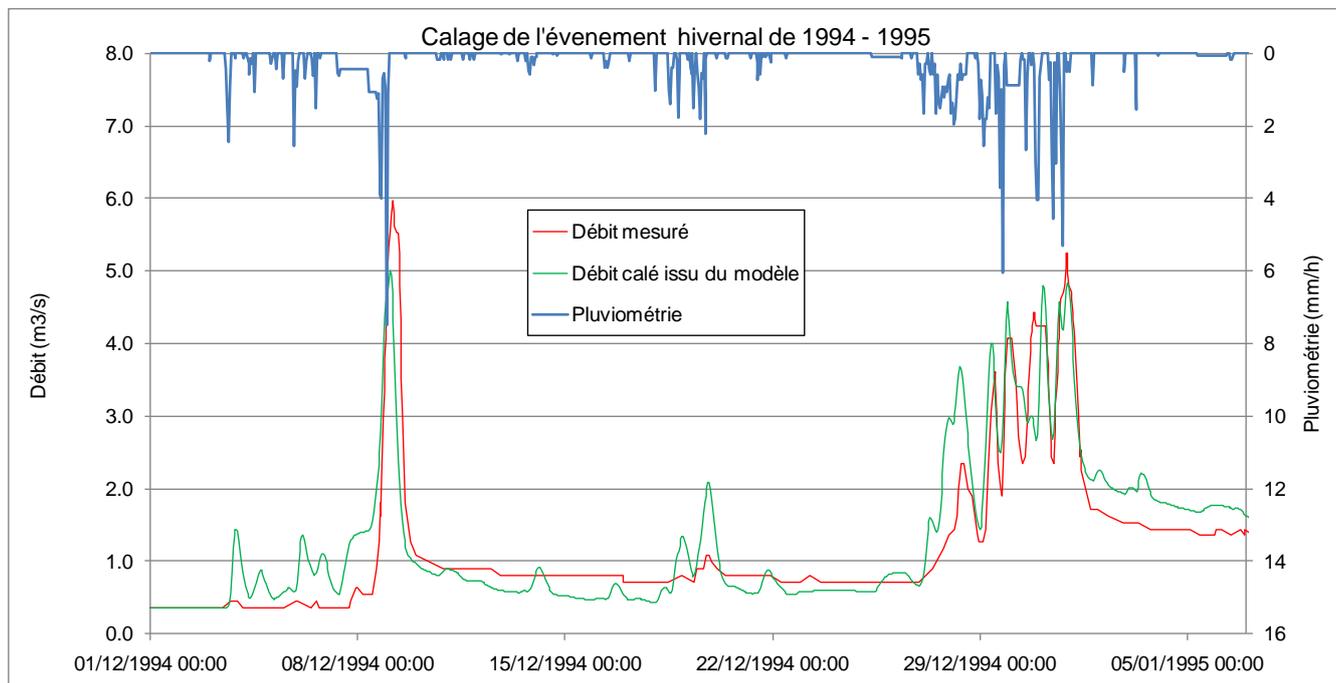


Figure 59 : Calage pour l'événement de déc. 1994 à avr.1995 – ensemble des apports

Après plusieurs simulations, les paramètres du module Infiltration / Restitution retenus sont :

- Pour le ressuyage (Réservoir Soil) : la superficie retenue est la superficie totale du bassin versant moins celle contribuant au ruissellement (surface active)

Parameter	Value
Ground Infiltration ID	SOIL
Soil Depth (m)	1.000
Percolation Coefficient	3.000
Baseflow Coefficient	20.000
Infiltration Coefficient	40.000
Percolation Threshold	1.000
Percolation Percentage Infiltrating	7.000
Porosity of Soil	50.000
Porosity of Ground	50.000
Baseflow Threshold Level (m)	0.050
Baseflow Threshold Type	Absolute
Infiltration Threshold Level (m)	0.400
Infiltration Threshold Type	Absolute

Tableau 32 : Paramétrages des apports de drainage hypodermique

- Pour la nappe (Réservoir Ground) : la superficie retenue est la superficie totale du bassin versant

Parameter	Value
Ground Infiltration ID	GROUND
Soil Depth (m)	1.000
Percolation Coefficient	3.000
Baseflow Coefficient	40.000
Infiltration Coefficient	170.000
Percolation Threshold	1.000
Percolation Percentage Infiltrating	0.010
Porosity of Soil	50.000
Porosity of Ground	50.000
Baseflow Threshold Level (m)	0.050
Baseflow Threshold Type	Absolute
Infiltration Threshold Level (m)	0.130
Infiltration Threshold Type	Absolute

Tableau 33 : Paramétrages des apports de nappe

- A cela s'ajoute un débit constant d'étiage (de l'ordre de 0.20 m³/s)

Concernant les paramétrages hydrauliques du modèle, le coefficient de Manning (témoin de la rugosité du lit) a été fixé à 0.05 après quelques simulations successives pour assurer la concordance temporelle des pics de crue entre les mesures et le modèle.

Résultats

L'hydrogramme obtenu avec le modèle calé est assez fidèle à la réponse hydrologique du bassin versant mesurée à Witternesse, avec notamment une bonne retranscription des volumes ruisselés (écart moyen de 10%), du temps de réponse (pics de crue synchrones), des phénomènes de vidange/recharge de nappe et, dans une moindre mesure, des débits de pointe (écart de 8% en moyenne sur les 4 pics de pluie).

Comparaison des mesures et des résultats du modèle		Du 07/12/1994 au 10/12/1994	Du 25/12/1994 au 05/01/1995	Du 21/01/1995 au 07/02/1995	Du 13/02/1995 au 12/03/1995	Evenement TOTAL du 01/12/1994 au 15/04/1995
Volume ruisselé global (m3)	Mesures	496 581	1 902 452	3 698 793	5 542 085	20 339 018
	Modèle	506 785	2 154 266	4 056 488	5 965 582	22 412 028
	Ecart	2.1%	13.2%	9.7%	7.6%	10.2%
Débit maximum horaire (m3/s)	Mesures	5.92	5.26	5.60	5.07	
	Modèle	5.01	4.84	5.12	5.03	
	Ecart	-15.3%	-8.1%	-8.6%	-0.8%	

Tableau 34 : Résultats du calage de l'événement de décembre 1994 – avril 1995

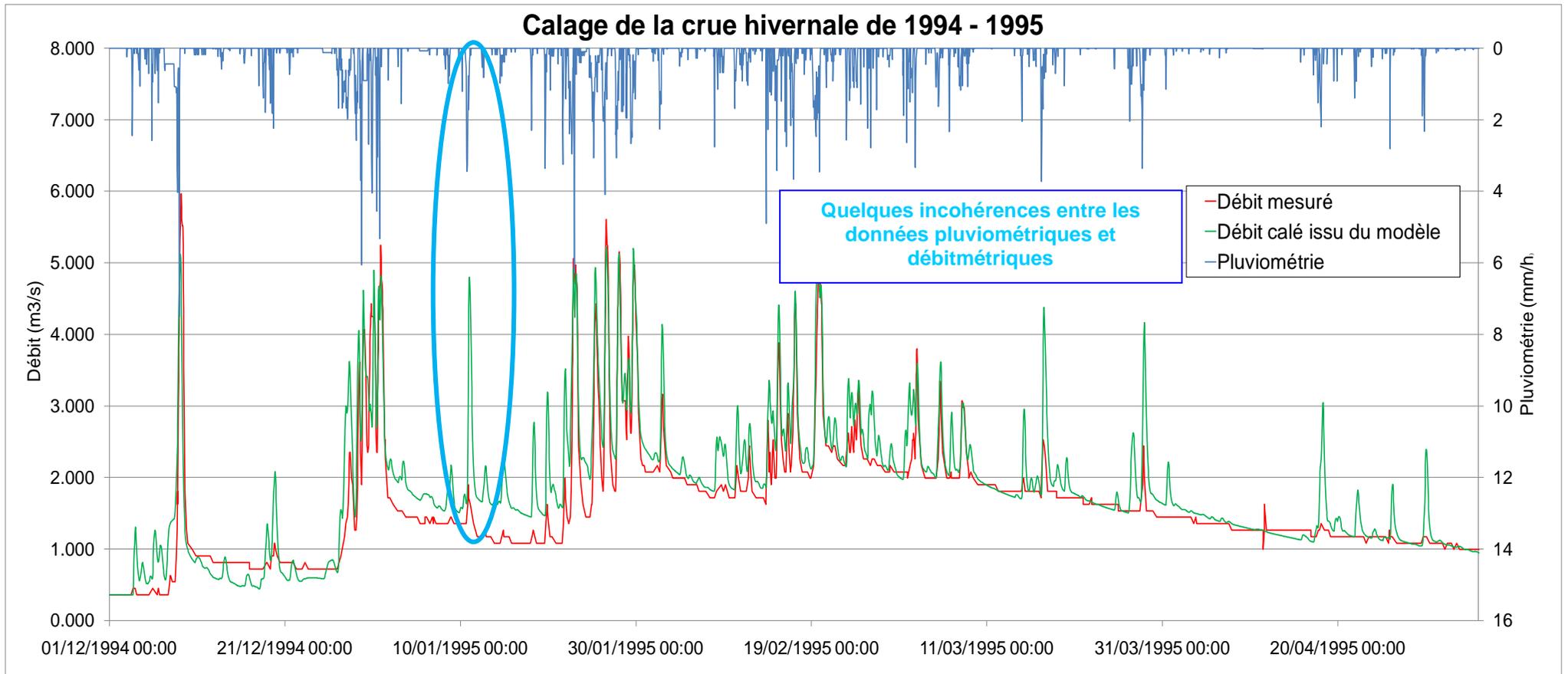


Figure 60 : Hydrogrammes calé et mesuré pour l'événement de décembre 1994 à avril 1995

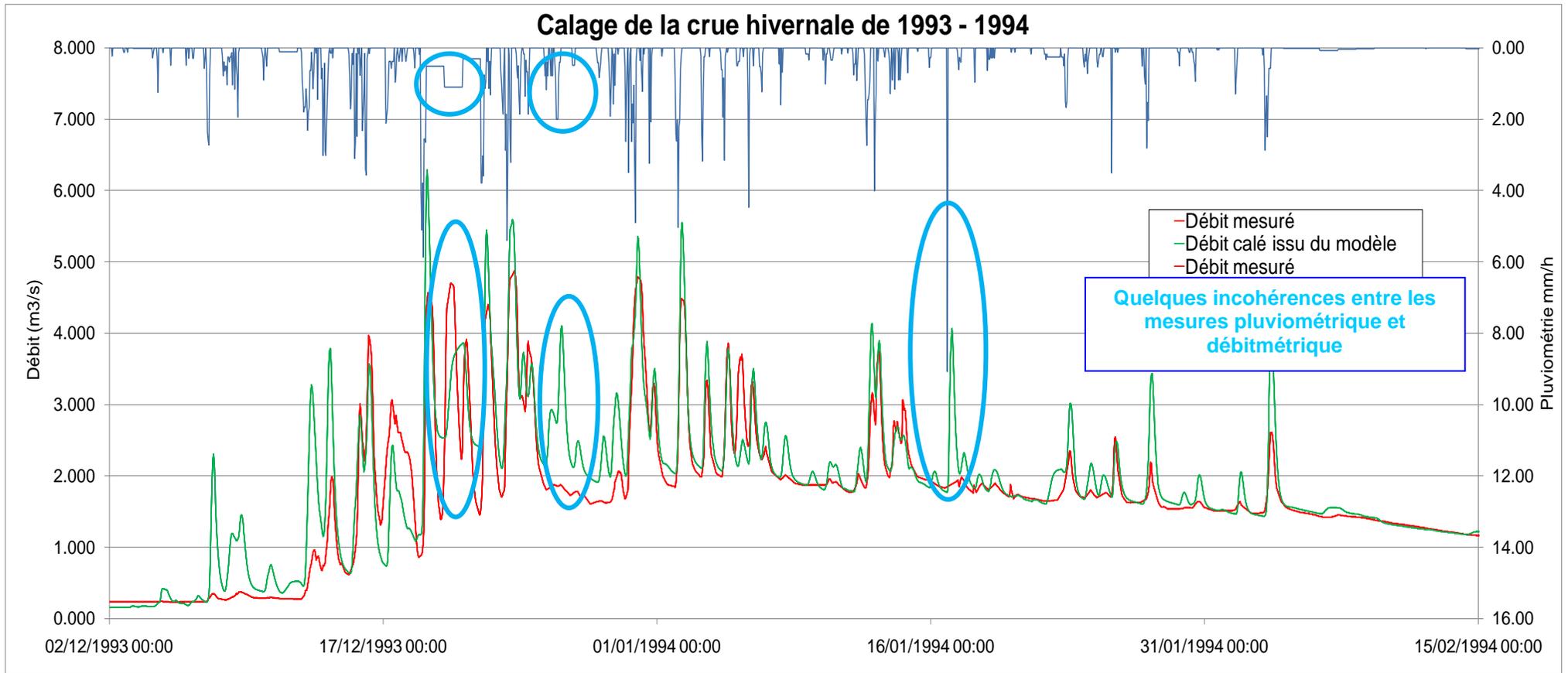


Figure 61 : Hydrogrammes calé et mesuré pour l'événement de décembre 1993 à février 1994

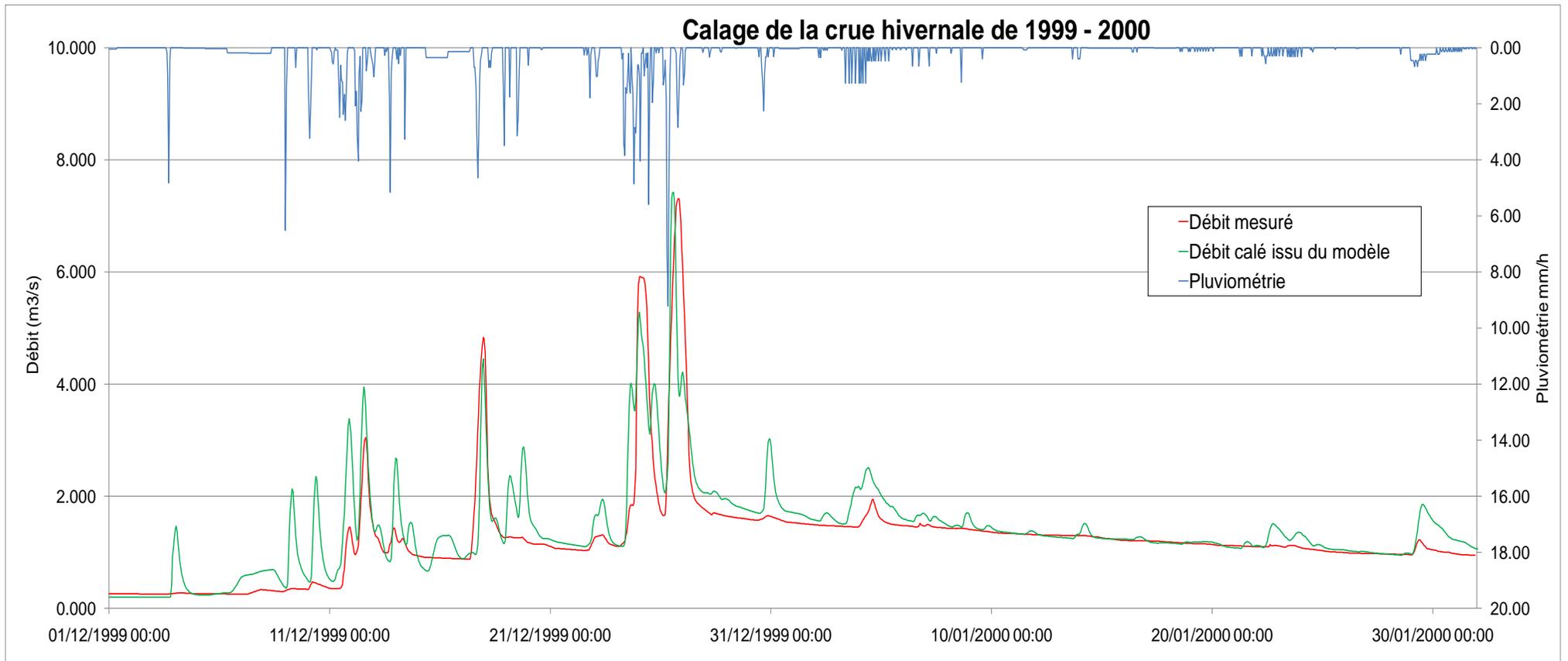


Figure 62 : Hydrogrammes calé et mesuré pour l'événement de décembre 1999 à janvier 2000

2.8 Extrait du rapport propre à l'Inondabilité – Fascicule 2 : l'hydrologie dans les modèles

2.8.1 Les modèles

Tous les modèles présentés précédemment ont été homogénéisés et revalidés lors de l'étude d'inondabilité en 2012.

Le présent paragraphe établit l'hydrologie de chacun des modèles, à la base de l'étude d'inondabilité, soit le bilan de l'état actuel d'un point de vue de l'hydrologie, des modèles issus des études antérieures et des améliorations apportées.

Le tableau ci-après liste tous les modèles constituant le bassin versant de la Lys et précise, pour chacun d'eux, la présence ou l'absence de calage, le type de calage, le(s) point(s) de calage et en conclusion les coefficients de ruissellement qui ont été retenus.

Il est possible de distinguer quatre profils hydrologiques homogènes :

- Plaine de la Lys
- La Flandre inférieure, en rive gauche de la Lys canalisée (bassin versant de la Grande Becque de Saint-Jans Cappel, de la Méteren Becque, de la Bourre et de la Melde). Ce qui explique le calage par homothétie de la Melde par rapport au modèle de la Bourre.
- La Lys rivière ;
- Laquette, Clarence, Lawe.

En présence d'évènements météorologiques de longue durée, les apports des nappes ne sont pas négligeables. Leur intégration et leur évolution peut se réaliser par plusieurs techniques alternatives :

- Module d'infiltration (pour le logiciel Infoworks CS) ;
- Module d'apport avec débit constant ou débit variable ;
- La création de sous-bassins versants fictifs dont le temps de réponse est très long et dont le volume est étalé dans le temps.

Tableau 35 – Les modèles hydraulique – hydrologie

Modèle	Cours d'eau	Evènement calage	Point calage	Remarques	Coefficient ruissellement moyen Cr	Rapport
Canaux de la Bourre	Borre Becque Foëne Becque	Décembre 2008	Le long de la Borre Becque au lieu-dit « la Capellerie » (H-V-Q)	Le calage a concerné l'intégralité du bassin versant de la Bourre. Les trois évènements de calage présentent des conditions hydrologiques similaires	Zones boisées => 2% ÷ 8% Zones cultivées => 14% ÷ 23% Zones en prairies => 5% ÷ 10% Zones urbaines => 15% ÷ 30%	Etude de faisabilité d'aménagements combinés de lutte contre les inondations sur les réseaux hydrographiques des canaux de la Bourre (§ 3.5.4)
	Bourre	Novembre 2009	capteur limnimétrique sur la Bourre en amont de la confluence de la Plate Becque (au droit du Pont à Loup)			
	Grande Steenbecque	Février – Mars 2010	Le long de la Grande Steenbecque à l'amont de la gare (H-V-Q)			
Clarence Amont	Clarence	Calage Estival pluie du 23/04/2005 et	Pernes, Chocques	les aménagements envisagés sont dimensionnés pour des événements hydrologiques intenses, type pluie estivale orageuse	Zones boisées => 1% ÷ 2% Zones cultivées => 3% ÷ 8% Zones en prairies => 1% ÷ 2% Zones urbaines => 20% ÷ 35%	Etude de faisabilité d'aménagements combinés de lutte contre les inondations sur les réseaux hydrographiques de la Clarence et du Guarbecque (§ 3.2.2.2)
	Nave		Lillers, Cantes,			
	Rimbert	Pluie de validation du 05/07/2005	Rieux			
G-B-D	Guarbecque	Le calage hivernal a été réalisé pour l'étude antécédente à l'étude de faisabilité.	situé sur le Guarbecque en amont de sa confluence avec la Rivière	Paramètres de calage du modèle « Guarbecque amont » ont été transposés, par homothétie, au sous bassin de la Rivière qui présente des caractéristiques proches de celui du Guarbecque. Le sous-bassin versant du Fauquethun => comme pour Busnes et Demingue	Cr moyen =>13% Zones boisées => 5% Zones cultivées => 7% ÷ 12% Zones en prairies => 5% Zones urbaines => 20%	Etude de faisabilité d'aménagements combinés de lutte contre les inondations sur les réseaux hydrographiques de la Clarence et du Guarbecque (§ 3.2.2.2)
	Busnes et Demingue	-	Absence de stations limnimétrique et/ou débitométriques	Se comportent davantage comme un énorme réservoir de stockage / restitution à débit très influencé par le drainage agricole (car alimenté par un réseau de fossés, jouant naturellement un rôle de stockage et récupérant majoritairement des eaux de ces drainages qui concernent la majeure partie des terres cultivées), il a été modélisé comme un « bassin versant réservoir », se vidant à débit constant de 1 l/s/ha et se remplissant (comme pour les BV ordinaires) par le module de transformation pluie / débit.		
Clarence Aval	Clarence et Grand Nocq amont	-	Absence de stations limnimétrique et/ou débitométriques	Les apports ruraux drainés par la Clarence aval et le Grand Nocq aval apparaissent, au vu de la superficie des bassins versants en jeux et de leur typologie (pente quasi-nulle) comme faibles par rapport à ceux générés par les bassins versants amont de la Nave, du Rimbert, du Grand-Nocq et de la Clarence (et de leurs affluents).		
Grand Nocq Aval	Grand Nocq	Calage en fonction des désordres hydrauliques existants repérés				
Laquette	Laquette jusqu'à Witternesse	Calage été Juillet 2005 Calage Hiver : Décembre 1993, 1994, 1999 Février 2002	Station DIREN de Witternesse	Calage par rapport aux désordres hydrauliques réels. Le modèle hydraulique et hydrologique doit reproduire la réalité. pour les pluies réelles simulées, les zones de désordres et de débordements doivent être respectées quantitativement et qualitativement et que le fonctionnement global des cours d'eau, biefs et autres ouvrages doit être cohérent avec les investigations	ETE Cr moyen été (Juillet 2005) =>7% - Zones boisées => 2% - Zones cultivées => 6% ÷ 10% - Zones en prairies => 3% ÷ 4% - Zones urbaines => 20%	Etude de faisabilité d'aménagements combinés de lutte contre les inondations sur le réseau hydrographique de la Laquette
	Laquette, aval de Witternesse	-	Absence de station limnimétrique et/ou débitométrique		HIVER Cr moyen hiver => 33% + module Infiltration / Restitution des nappes + débit constant d'étiage (-0.20 m³/s)	
	Laque Mardyck	-			Calage aval de Witternesse : BV Mardyck=> il a été réalisé par analogie avec la Laquette amont Laquette Aval=> les apports ruraux drainés par la Laquette aval contribuant peu aux débits de pointe sur la Laquette. Cependant, ils ne sont pas à négliger dans l'alimentation des Pâtures	

Modèle	Cours d'eau	Evènement calage	Point calage	Remarques	Coefficient ruissellement moyen Cr	Rapport									
				menées sur le terrain	d'Aire) ; Les secteurs des Pâtures d'Aire et de la Laque , notamment en hiver, sont fortement réalimentés par les apports de nappe										
Lawe amont	Lawe amont	Modèle non calé			Cr moyen => 23%										
Lawe Aval	Lawe aval				Cr moyen => 18%										
Loisne et Surgeon	Loisne	Orage du 24 Avril 2004	Sur la Loisne, point de calage à l'aval de la STEP de Nœux-les-Mines	Le calage de la Loisne de Nœux-les-Mines à Beurvry, a été réalisé par similitude avec le bassin versant amont.	Cr moyen => 9% ÷ 20%	Etude de faisabilité d'aménagements de lutte contre les inondations sur le réseau hydrographique de la Loisne et du Surgeon									
	Surgeon	Aucune pluie lors de la campagne de mesure		Calage par homothétie avec la Loisne	Cr moyen => 8% ÷ 20%										
Lys canalisée	Lys canalisée	Pas de calage		Il faut distinguer la Lys canalisée de la Plaine de la Lys. Le module hydrologique de transformation pluie/débit concerne que la plaine de la Lys. Les affluents de la Lys canalisée sont entrés dans le modèle comme « inflow »	Plaine de la Lys : <table border="1"> <thead> <tr> <th>Cr moyen (%)</th> <th>i≥2%</th> <th>I<2%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>zone urbaines ou autres espaces artificialisés</td> <td>30</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>le reste</td> <td>20</td> <td>16</td> </tr> </tbody> </table>	Cr moyen (%)	i≥2%	I<2%	zone urbaines ou autres espaces artificialisés	30	30	le reste	20	16	Etude du risque d'inondation sur le bassin versant de la Lys - Fascicule 2
Cr moyen (%)	i≥2%	I<2%													
zone urbaines ou autres espaces artificialisés	30	30													
le reste	20	16													
Lys rivière	Lys rivière	Décembre 1999	Station DREAL Lurgy Station DREAL Delettes	Calage hivernal pour déterminer les apports de nappe Pas de calage d'été.	Cr hiver => 25 (moyenne pondérée avec apports de nappe) Cr orage => 16,5 (moyenne pondérée)										
Melde	Melde	Pas de calage		Calage par homothétie avec les modèles de la Bourre et de la Méteren Becque	Renvoie modèle Bourre et Méteren	-									
Métern Becque	Méteren Becque	Fin Février-Début Mars	Capteur Hauteur/Vitesse installé au droit de la RD 69a lors de la campagne de mesures réalisée par le SYMSAGEL entre fin 2009 et mars 2010.		<ul style="list-style-type: none"> - Zones boisées => 4% - Zones cultivées => 15% - Zones en prairies => 10% - Zones urbaines => 30% 	Etude de faisabilité d'aménagements de lutte contre les inondations sur le réseau hydrographique de la Méteren Becque									
RC Lawe	Caucourt - Hermin - Rebreuve - Bajus - Magnicourt	Pas de calage		Calage par homothétie avec le modèle de la Lawe	Cr moyen => 17% ÷ 20%	\$\$LCH									
RC Lys	Maisnil	Pas de calage			Cr moyen => 21%	LCH									
	Gein			Cr moyen => 25%											

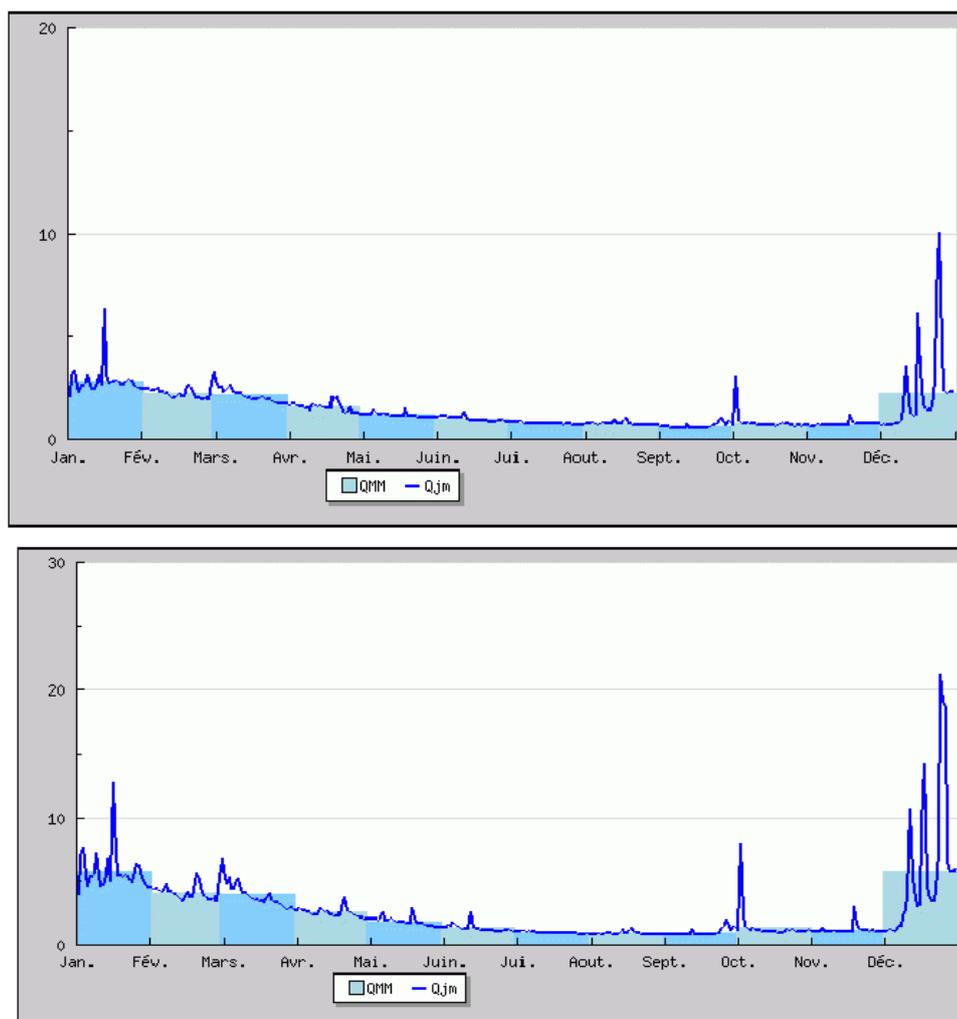
En gras, les modifications apportées

2.8.2 Implémentations / Améliorations

2.8.2.1 Calage de la Lys Rivière

Le modèle de la Lys rivière, réalisé sur Infoworks RS par le BET Haecon, n'utilise pas le module hydrologique pour la transformation des pluies en débits. Les hydrogrammes, qui sont déterminés grâce à un module extérieur au modèle, sont entrés dans le modèle RS comme « Inflow ».

De ce fait, nous avons réalisé un **calage du modèle pour un évènement hivernal** (crue Décembre 1999) au droit des stations hydrométriques de la banque hydro, à Lugy et à Delettes afin de déterminer les apports de nappe.



QMM : écoulement mensuel mesuré - Qjm : débit journalier moyen

QMN : écoulement naturel reconstitué

Figure 63 : Débit journalier moyen et débit mensuel mesuré à la station de Lugy et Delettes pendant l'année 1999

Mesures	Lugy	Delettes
Q instantané max (m ³ /s)	15,60 (26/12/99 à 10:50)	29,10 (27/12/99 00:00)
H instantanée max (cm)	207 (26/12/99 à 10:50)	197 (27/12/99 00 :00)
Q journalier (m ³ /s) 24/12/1999	2,87	7,26
Q journalier (m ³ /s) 25/12/1999	6,92	21,20
Q journalier (m ³ /s) 26/12/1999	10,10	19,10
Q journalier (m ³ /s) 27/12/1999	4,53	18,6
Volume total écoulé du 24 au 27/12/99 (m ³)	2 100 000	5 700 000

Tableau 36 – Mesures enregistrées à la station de Lugy et Delettes – 24-27/12/1999

Calage à Lugy – crue Décembre du 24/12/1999 au 27/12/1999

Les résultats du calage de première approximation (sans le module Infiltration) sont présentés sur la figure ci-dessous:

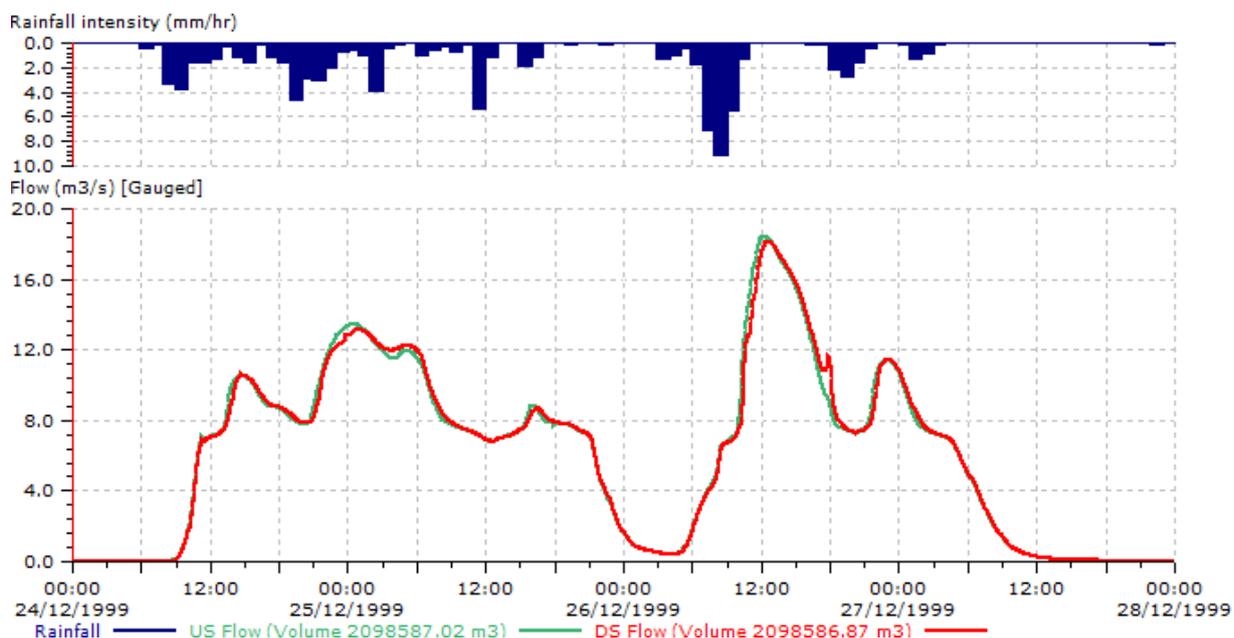


Figure 64 : Débits calculés, première approximation, à la station de Lugy

Il est possible de constater:

- une cohérence entre le volume transitant à la station de Lugy entre le 24/12/1999 et le 27/12 et le volume extrait de la simulation ;
- Le débit de pointe simulé est d'environ 15% plus élevé par rapport à la mesure enregistrée, soit 18,0 m³/s au lieu de 15,6 m³/s ; cet écart reste acceptable ;
- Cependant, les débits journaliers simulés ne sont pas représentatifs de la réalité. Les mesures enregistrées montrent un « crescendo » du débit moyen journalier entre le 24 Décembre et le 26, alors que le cumul de pluie journalière ne subit pas la même augmentation. Le 27 Décembre, il cesse de pleuvoir (2,57 mm de pluie), mais le débit moyen reste assez important. La modélisation d'un évènement de crue hivernal est incapable de reproduire la réalité sans la construction d'un module hydrologique qui prend en compte les infiltrations initiales du terrain (du 24 et 25 décembre) et le ressuyage final (27 Décembre).

Date	Hauteur de pluie (mm)	Débit journalier mesuré (m ³ /s)	Débit journalier simulé (m ³ /s)
24/12/1999 00:00	31.33	2,87	8.72
25/12/1999 00:00	18.78	6,92	5.33
26/12/1999 00:00	34.73	10,10	9.92
27/12/1999 00:00	2.57	4,53	0.46

Tableau 37 – Calage décembre 1999 à Lugy – scénario simulé et réel

L'absence du module hydrologique, de cette première phase de calage, explique l'écart entre les débits journaliers issus des mesures et ceux simulés pour le 24 Décembre, le 25 et le 27. En revanche les résultats pour le 26/12 sont optimum.

Afin d'avoir des résultats encore plus représentatifs de la réalité sur l'ensemble de l'évènement pluviométrique, il est indispensable de mettre en œuvre le module hydrologique afin de tenir compte des interfaces complexes entre le sol et le sous-sol et les apports de nappes affleurantes.

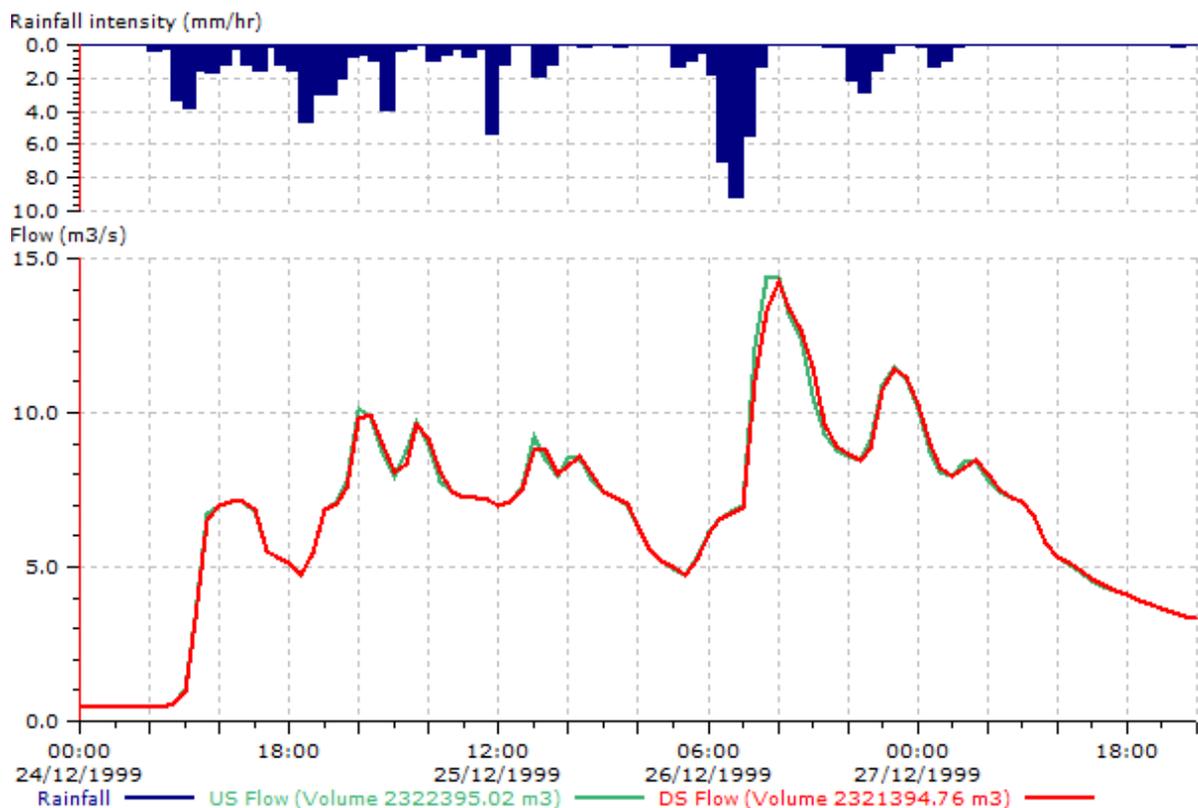


Figure 65 : Débits calculés, avec le module hydrologique - station de Luga, crue 1999

Date	Hauteur de pluie (mm)	Débit journalier mesuré (m ³ /s)	Débit journalier simulé (m ³ /s)
24/12/1999 00:00	31.33	2,87	3,7
25/12/1999 00:00	18.78	6,92	8,1
26/12/1999 00:00	34.73	10,10	8,9
27/12/1999 00:00	2.57	4,53	6,0
Volume cumulé (m ³)		2100000	2320000

Tableau 38 – Calage décembre 1999 à Luga avec module hydrologique– scénario simulé et réel

L'écart entre le volume réel transité à Luga et le volume simulé est limité à 10%. Même écart pour le débit de pointe pour le 25 et 26 Décembre.

Calage à Delettes – crue Décembre du 24/12/1999 au 27/12/1999

Les figures et Tableaux suivants reportent les résultats des débits calculés et mesurés à la station de Delettes.

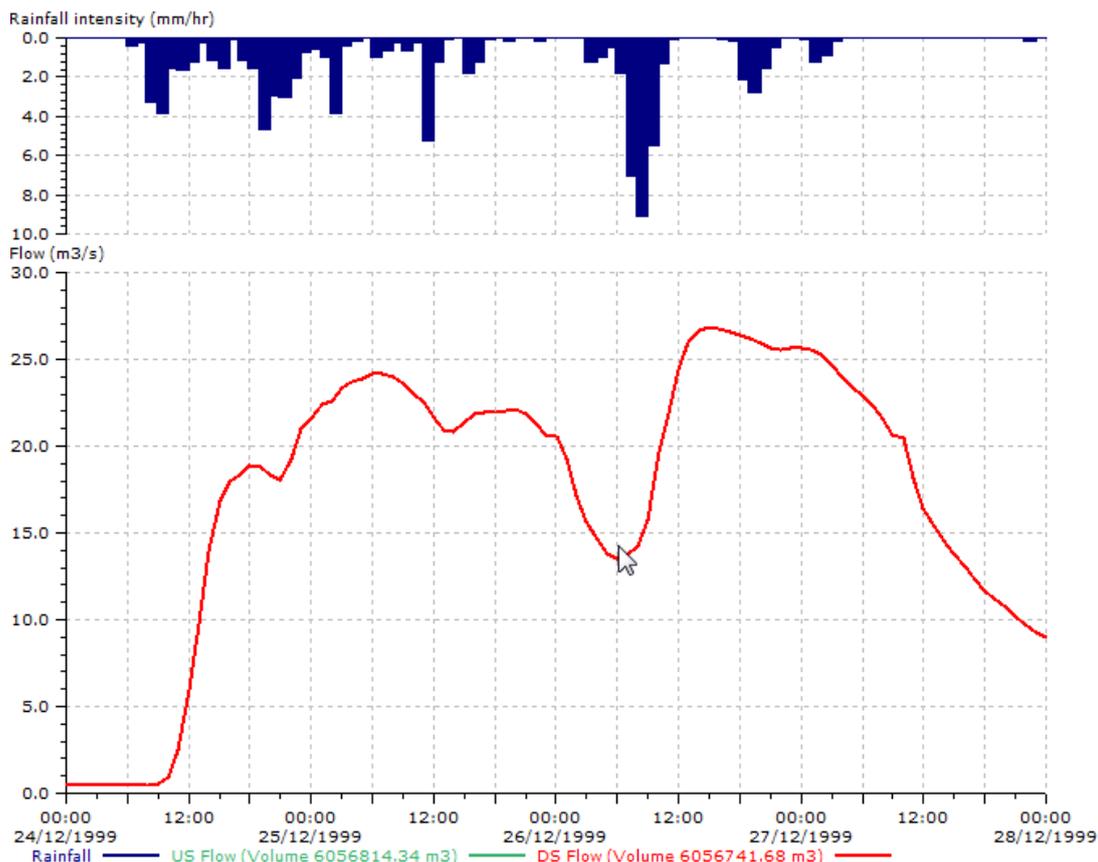


Figure 66 : Débits calculés, avec le module hydrologique - station de Delettes, crue 1999

Date	Débit journalier mesuré (m ³ /s)	Débit journalier simulé (m ³ /s)	Ecart
24/12/1999 00:00	7.26	8.6	17.85%
25/12/1999 00:00	21.2	22.4	5.61%
26/12/1999 00:00	19.1	21.4	11.82%
27/12/1999 00:00	18.6	17.6	-5.27%
Volume cumulé (m ³)	5 716 224	6 041 449	5.69%
Q max instantané (m ³ /s)	29,10	26,82	-7.83%

Tableau 39 – Calage décembre 1999 à Delettes avec module hydrologique– scénario simulé et réel

2.8.3 Le module hydrologique

L'ensemble des apports de nappe doit être intégré au modèle de simulation, via le module Infiltration /Restitution d'Infoworks CS qui consiste à conceptualiser le sous-sol comme plusieurs réservoirs souterrains simplifiés.

Il s'agit de construire dans le modèle, pour chaque bassin d'apport rural, un bassin souterrain fictif composé de deux réservoirs l'un au-dessus de l'autre (« réservoir sol » au-dessus du « réservoir nappes perchées »).

Ces réservoirs se rempliront exclusivement en fonction de la pluie et rendront compte de la capacité de stockage des sols (par le volume accumulé dans ces réservoirs souterrains) jusqu'à la saturation (débordements du réservoir supérieur).

2.8.3.1 Période non saturée

Le remplissage du premier réservoir (dit « réservoir sol ») est directement lié à la pluviométrie. Nous poserons comme hypothèse que la grande majorité des eaux qui ne ruissellent pas pendant la pluie, s'infiltrent dans les premiers centimètres du sol et alimente la nappe perchée temporaire.

En période non saturée, lorsqu'il pleut, le « réservoir sol » se remplit peu à peu, tandis qu'une grande partie des volumes percole jusqu'au second « réservoir nappes perchées » (conceptualisation par la mise en place d'un orifice qui relie le « réservoir sol » au « réservoir nappes perchées »).

La restitution à l'aval, des débits infiltrés en zone rurale (c'est à dire le réessuyage), sera représentée comme la vidange de ce « réservoir nappes perchées » dans les fossés.

Pendant la période non saturée, les réservoirs se remplissent plus qu'ils ne se vident.

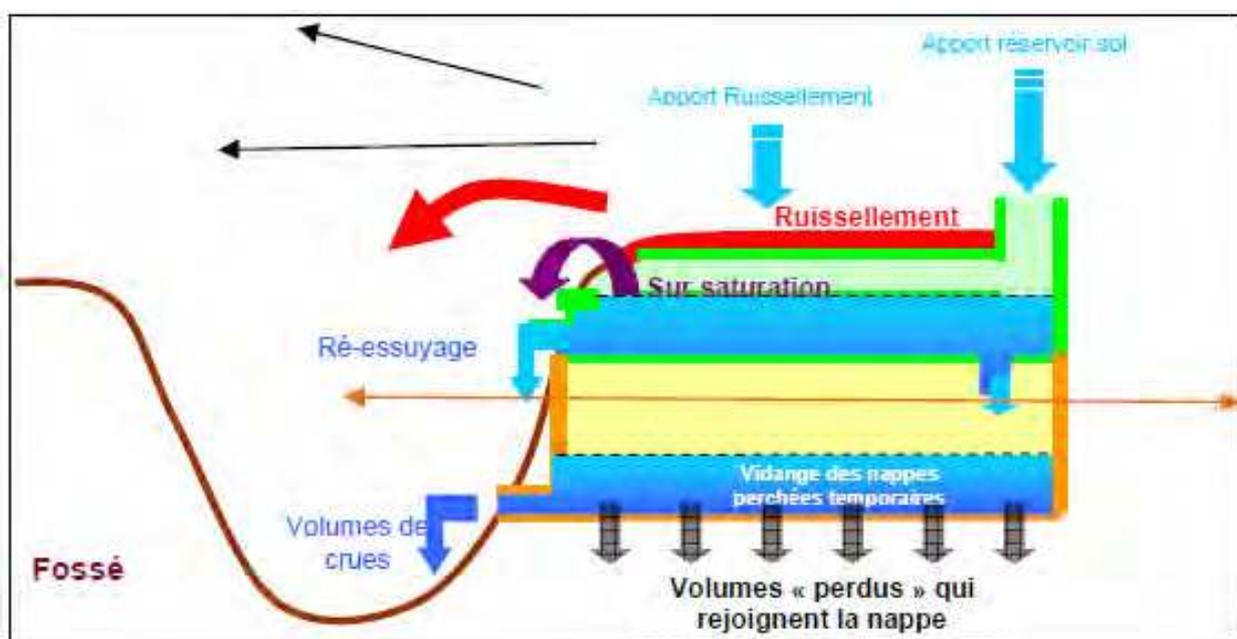


Figure 67 : Schéma de fonctionnement du système d'infiltration/restitution

2.8.3.2 Période saturée

Lorsque la pluie a eu une durée suffisante, les deux réservoirs sont pleins et ne se vident que très lentement. Dans ces conditions de sols saturés, face à une nouvelle pluie, le « réservoir sol » déborde : son débordement induit un volume supplémentaire face à la pluie qui retranscrit, conceptuellement, une augmentation du coefficient de ruissellement.

De plus, dans un deuxième temps, le remplissage des seconds « réservoirs nappes perchées » (soit la hauteur d'eau dans ces réservoirs) impliquera de la même façon des apports supplémentaires sur les volumes induits par la pluie.

NB : *Cela signifie qu'il faut, avant toute modélisation d'une pluie réelle ou de projet, s'inquiéter des antécédents de temps de pluie, afin de rendre compte du remplissage et donc de la restitution des débits par temps de pluie (état initial dans le module Infiltration).*

La phase de calage du modèle s'efforcera d'ajuster les volumes restitués en fonction des antécédents de temps de pluie en jouant notamment sur l'impluvium qui alimente les réservoirs, les dimensions et les capacités de stockage des différents réservoirs, les orifices qui relient les réservoirs sols aux réservoirs nappes perchées, les paramètres de vidange des réservoirs.

Chapitre 3 Discussion autour de la méthode pour la détermination des débits extrêmes

Le présent chapitre expose de façon synthétique deux approches et méthodes différentes (méthode du Gradex et méthode SHYREG), permettant l'évaluation des débits extrêmes ($T > 1000$ ans), sur la région Nord-Pas de Calais et plus précisément sur le TRI Béthune/Armentières propres aux débordements de la Lys et de ses affluents.

3.1 Présentation de la méthode du Gradex

3.1.1 Principes généraux

La méthode du Gradex, développée par EDF en 1966 pour la sécurité des grands barrages, est utilisée couramment en France pour l'estimation des débits de fréquences rare et exceptionnelle.

Le gradex est une méthode simplifiée qui permet d'estimer les débits de crues extrêmes (période de retour de 100 à 10 000 ans). Elle est applicable aux bassins versants de 0 à 5000 km² dont le temps de concentration, de ruissellement ou d'écoulement rapide est de 1h à 4 jours.

La méthode utilise l'information pluviométrique pour extrapoler la distribution de fréquence des débits.

La méthode du Gradex consiste à supposer qu'au-delà d'une période de retour (période de retour dite pivot), les précipitations ruissellent entièrement. Cette méthode permet d'extrapoler les débits de crue pour des périodes de retour plus élevées par proportionnalité avec l'ajustement statistique sur les précipitations. Celui-ci est généralement de meilleure qualité que celui sur les débits, car on dispose de séries plus longues.

La méthode du gradex fournit un support de calcul cohérent et vraisemblable en s'appuyant sur une approche fréquentielle des précipitations locales ou régionales intenses.

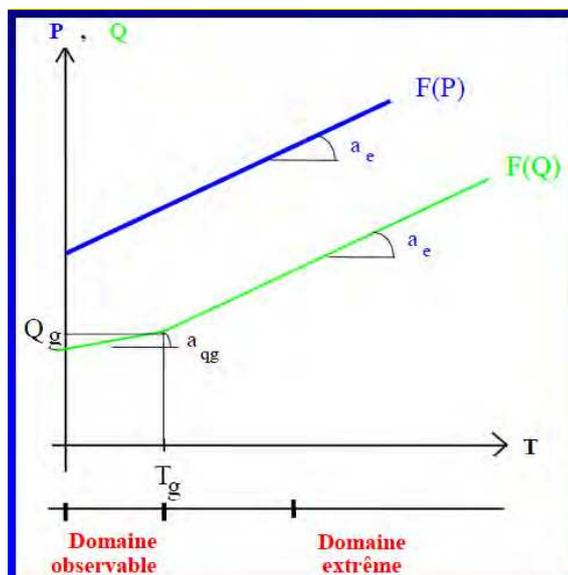


Figure 68 : Principes généraux – Méthode du Gradex

3.1.2 Application de la méthode du Gradex

La méthode du Gradex se base sur l'hypothèse que pour les évènements pluviométriques de périodes de retour exceptionnelles, le sol est rapidement saturé, la pluie ne s'infiltre plus et toute l'eau tombée participe à la formation du débit de pointe. De ce fait, l'ajustement de Gumbel réalisé pour les pluies (distribution exponentielle) peut servir à extrapoler les débits pour les évènements extrêmes par une droite parallèle sur un graphique de Gumbel, parallèle sur un graphique de Gumbel.

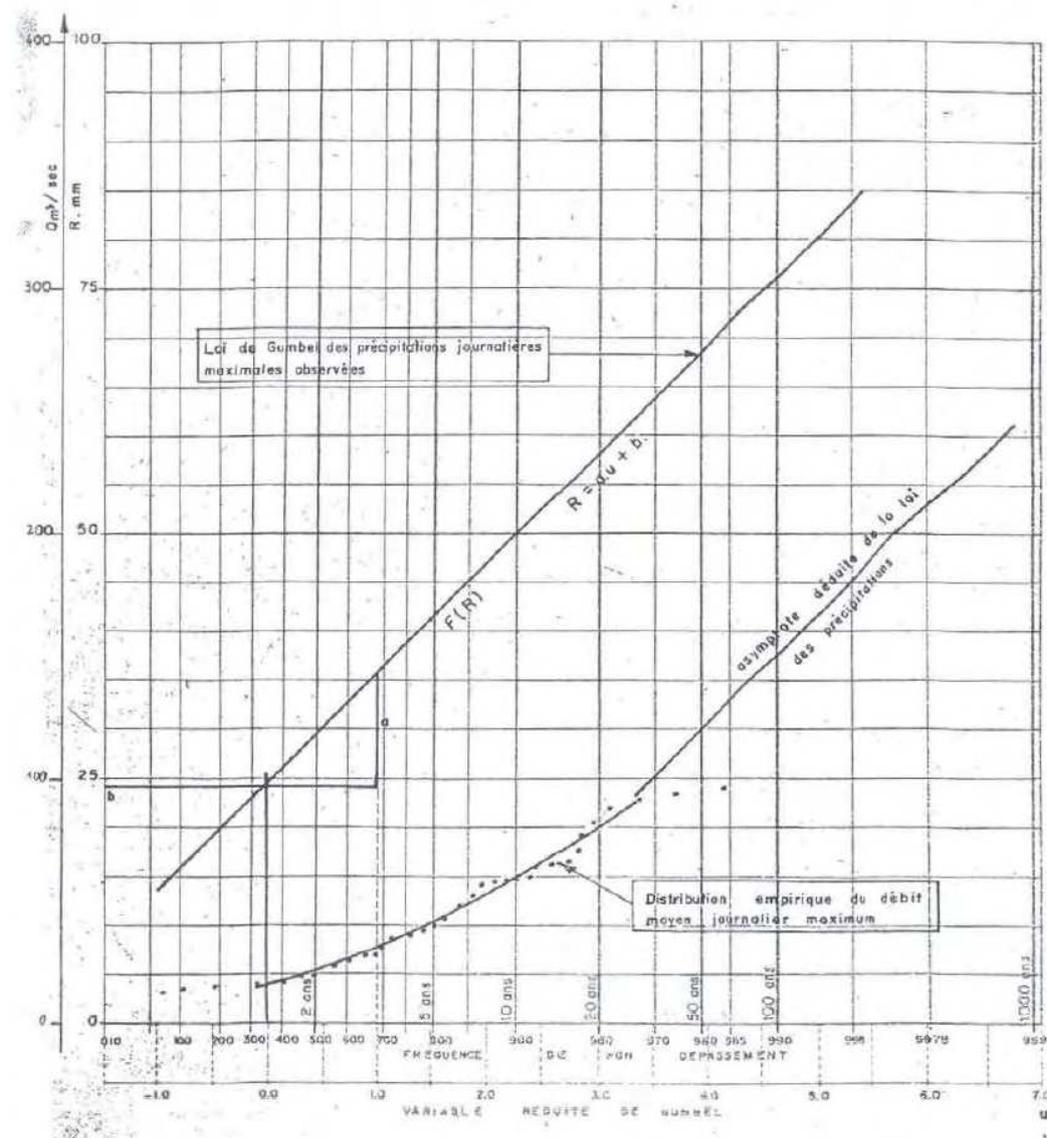


Figure 69 : Principes généraux II – Méthode du gradex

L'avantage de la méthode est que les données de pluviométrie existent bien souvent sur une période beaucoup plus longue que celles d'hydrométrie, et l'ajustement ainsi réalisé est donc plus fiable que celui réalisé directement sur les débits.

Les calculs sont réalisés pour des pluies moyennes et aboutissent donc à des débits moyens sur la durée D (correspondant au temps de concentration du bassin versant). Les débits instantanés peuvent être calculés grâce à un coefficient, appelé coefficient de forme, qui correspond au rapport moyen entre le débit maximum instantané et le débit maximum moyen sur la durée D.

3.2 Présentation de la méthode Shyreg

3.2.1 Principes généraux

Dans le cadre de ses missions de recherche et d'appui aux politiques publiques, Irstea (ex CEMAGREF) a développé une méthode de cartographie de l'aléa hydrologique, la méthode SHYREG débit.

L'application de cette méthode permet l'élaboration d'une base de données, nommée base SHYREG-débit, qui fournit les quantiles de débits de crues (débit de pointe et les débits moyens sur 1, 2, 3, 4, 6, 12, 24, 48 et 72 heures) pour des périodes de retour de 2 à 1000 ans, sur l'ensemble du territoire de France métropolitaine.

La méthode associe un générateur aléatoire de pluies horaires et une transformation de la pluie en débit. Les techniques de simulation permettent de générer de très longues chroniques de pluies horaires (sur 100 000 ans, par exemple), d'où se déduisent les hydrogrammes de crues par application d'une modélisation simple de la pluie en débit. Un simple classement des pluies et des débits simulés permet de tracer les distributions de fréquence « empiriques » des pluies et des débits de toutes durées et d'en déduire les quantiles pour une large gamme de périodes de retour de 20 à 1000 ans.

3.2.2 Décomposition de la méthode Shyreg

- Base SHYREG pluie :

A partir d'analyses statistiques fines de la répartition des pluies dans le temps, a été créée une chronique de pluies horaire aléatoire spécifique, régionalement à l'échelle de 1 km² et calée à partir des données pluviométriques régionales (soit 217 postes météorologiques pour deux saisons différenciées : été de juin à novembre et hiver de décembre à mai) ;

La simulation de cette chronique de pluies a généré, au pas de temps horaire, un échantillon d'évènement pluvieux indépendants, équivalents à un échantillon de plusieurs milliers d'années d'observations.

Une base de données de courbes IDF associés a été obtenue, à l'échelle de 1 km², représentant la pluie ponctuelle.

= paramètre régionalisé du générateur de pluie

- Calage de SHYREG débit

Un modèle hydrologique simplifié, Shyreg-débit, permet une transformation pluie-débit à l'échelle du pixel de 1 km².

Le calage de la méthode Shyreg-débit consiste à choisir une paramétrisation du modèle hydrologique qui permette de retrouver au mieux la distribution de fréquence des débits observés aux stations jaugées. Ce calage a été réalisé sur la base de 1290 bassins versants choisis jugés fiables et non influencés. Le paramètre variable, calé, conceptualise l'abattement des pluies en fonction de la surface et l'abattement des débits impliquée par l'hydraulique.

- Régionalisation de SHYREG débit

Le paramètre variable calé à partir des mesures est extrapolé à l'ensemble du territoire, sur la base de données explicatives telles que la densité du réseau de drainage, l'hydrogéologie, le bilan hydrique.

= paramètre régionalisé du modèle hydrologique

■ Base SHYREG Débit

Un calcul automatique de contour de bassin versant conduit à l'élaboration d'une base « bassins versants » de près de 140 000 contours de bassins associés à des tronçons hydrauliques.

L'application de cette méthode permet l'élaboration d'une base de données, nommée base SHYREG-débit, qui fournit les quantiles de débits de crues (débit de pointe et les débits moyens sur 1, 2, 3, 4, 6, 12, 24, 48 et 72 heures) pour des périodes de retour de 2 à 1000 ans, sur l'ensemble du territoire de France métropolitaine.



Figure 70 : Principes généraux – Méthode SHYREG

Les bases Shyreg-débit sont donc le résultat de l'application de la méthode Shyreg sur le territoire national. C'est une approche régionale qui résulte de l'utilisation d'une information hydro-météorologique la plus exhaustive possible, disponible sur les bases de données nationales. Elle intègre la variabilité spatiale des statistiques sur les pluies. C'est une approche qui présente aussi l'avantage d'être homogène sur l'ensemble du territoire et qui propose, en une seule régionalisation, l'estimation de l'ensemble des caractéristiques des crues (pointe, volume, durée, pour toutes périodes de retour).

3.3 Discussion

Les deux approches hydrologiques ont en commun le calcul des débits au droit des bassins versants élémentaires. Quelle que soit la méthode, ces hydrogrammes d'entrées devront être injectés, en de multiples points, dans le modèle hydraulique construit au niveau du TRI.

Le modèle hydraulique retravaillera les débits d'entrée pour aboutir à une succession d'hydrogrammes d'amont à l'aval, hydrogrammes qui s'autoriseront à être différents (et plus vraisemblables avec prise en compte notamment des volumes stockés et restitués dans les zones d'expansion de crue), des hydrogrammes qui pourraient être calculés à grande échelle par les seules méthodes Gradex ou Shyreg.

Les données nécessaires au calcul du Gradex (temps de concentration, coefficient de forme,...) sont disponibles ou aisément calculables, à toute échelle de travail, par le biais des modélisations ou études antérieures, dans le cadre de cette étude.

Les débits de période de retour $T > 50$ ans, consolidés par la validation des cartographies éditées dans le cadre de l'étude Inondabilité), qui ont servi de base à l'élaboration de cartes d'aléas du risque inondation pour le compte du Symsagel pourront servir de débits pivot.

La méthode du gradex présente peut être l'avantage de se baser et de travailler sur des débits pivots connus, validés, mesurés et calés, à l'inverse de la méthode Shyreg qui présente un travail automatisé (même à considérer une échelle d'approche très fine) de génération de pluie puis de génération de débit, sur un secteur qui présente de nombreuses particularités hydrologiques et hydrauliques.

Cependant, les deux méthodes s'avèrent complémentaires, pour la validation d'un même ordre de grandeur des débits extrêmes obtenus au niveau de bassins versants.

On pourra reprocher l'approche très simplificatrice et controversée du gradex qui s'appuie exclusivement sur une extrapolation statistique à partir du seul paramètre pluviométrique.

La méthode Shyreg peut présenter quant à elle des limites et des incertitudes directement liés à la particularité hydraulique de la Lys qui s'étale littéralement dans la plaine lors de fortes crues.

De ce fait, il est proposé de calculer les débits extrêmes par le biais de la méthode du gradex et de comparer ces débits extrêmes aux débits fournis par Shyreg, pour les mêmes bassins versants définis, en amont de la plaine de la Lys, soit en amont des zones d'expansion de crue. Une discussion sera engagée pour la définition des débits extrêmes retenus.

Chapitre 4 Détermination des débits extrêmes

4.1 Les courbes IDF utilisées: Lille-Lesquin – période 1961-2008

La première étape dans le calcul du Gradex est l'élaboration des courbes IDF (Intensité Durée Fréquences) à partir des données pluviométriques du poste météorologique le plus proche du secteur d'étude. L'obtention des IDF est déterminante : le Gradex des pluies est le coefficient directeur de la droite d'ajustement de l'échantillon pluviométrique.

Au droit du TRI Béthune-Armentières, la station météorologique la plus proche et la plus documentée est la station de Lille-Lesquin.

Le tableau ci-dessous présente les IDF obtenus auprès de Météo-France au droit de la station Lille-Lesquin pour la période 1961-2008.

IDF (Intensité Durée Fréquences) à la station de Lille-Lesquin					
	DUREE DE RETOUR				
	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100ans
INTERVALLES	Quantités en mm				
6 minutes	8,4	10,7	13,3	17,6	21,5
15 minutes	13,6	17,5	21,5	27,6	33,0
30 minutes	17,2	21,5	25,5	31,2	35,9
1 heure	19,6	24,2	28,4	34,4	39,3
2 heures	23,5	28,2	32,6	38,6	43,5
3 heures	26,2	31,1	35,6	42,1	47,3
6 heures	29,1	36,8	42,8	51,6	59,0
24 heures	41,3	51,7	58,0	66,2	72,5
48 heures	58,3	60,2	66,2	73,6	78,7
	Intensités en mm par heure				
6 minutes	84,0	107,0	133,0	176,0	215,0
15 minutes	54,4	70,0	86,0	110,4	132,0
30 minutes	34,4	43,0	51,0	62,4	71,8
1 heure	19,6	24,2	28,4	34,4	39,3
2 heures	11,8	14,1	16,3	19,3	21,8
3 heures	8,7	10,4	11,9	14,0	15,8
6 heures	3,7	6,1	7,1	8,6	9,8
24 heures	1,3	2,2	2,4	2,8	3,0
48 heures	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6

Tableau 40 : IDF à la station météorologique Lille-Lesquin – période 1961-2008

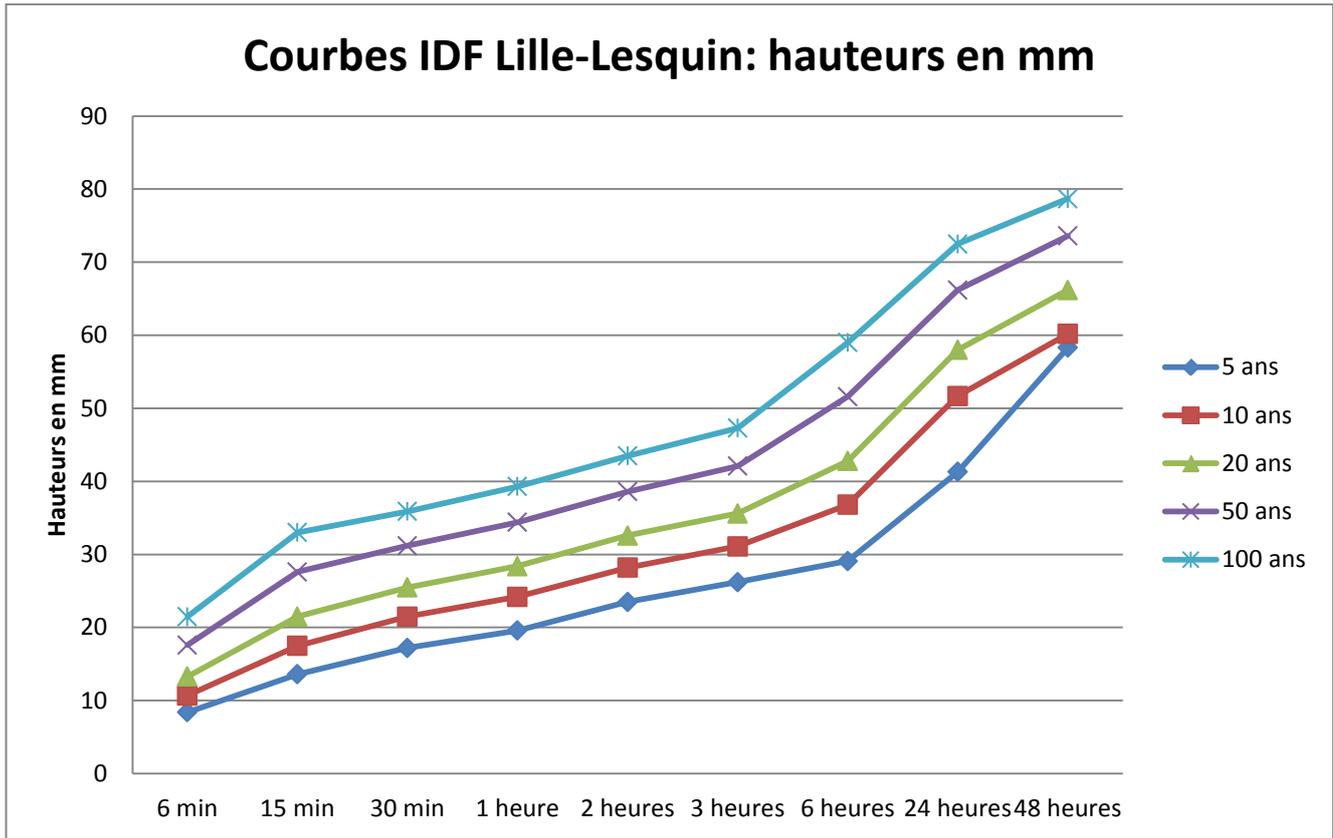


Figure 71 : Courbes IDF Lille-Lesquin – Hauteurs de précipitations en mm

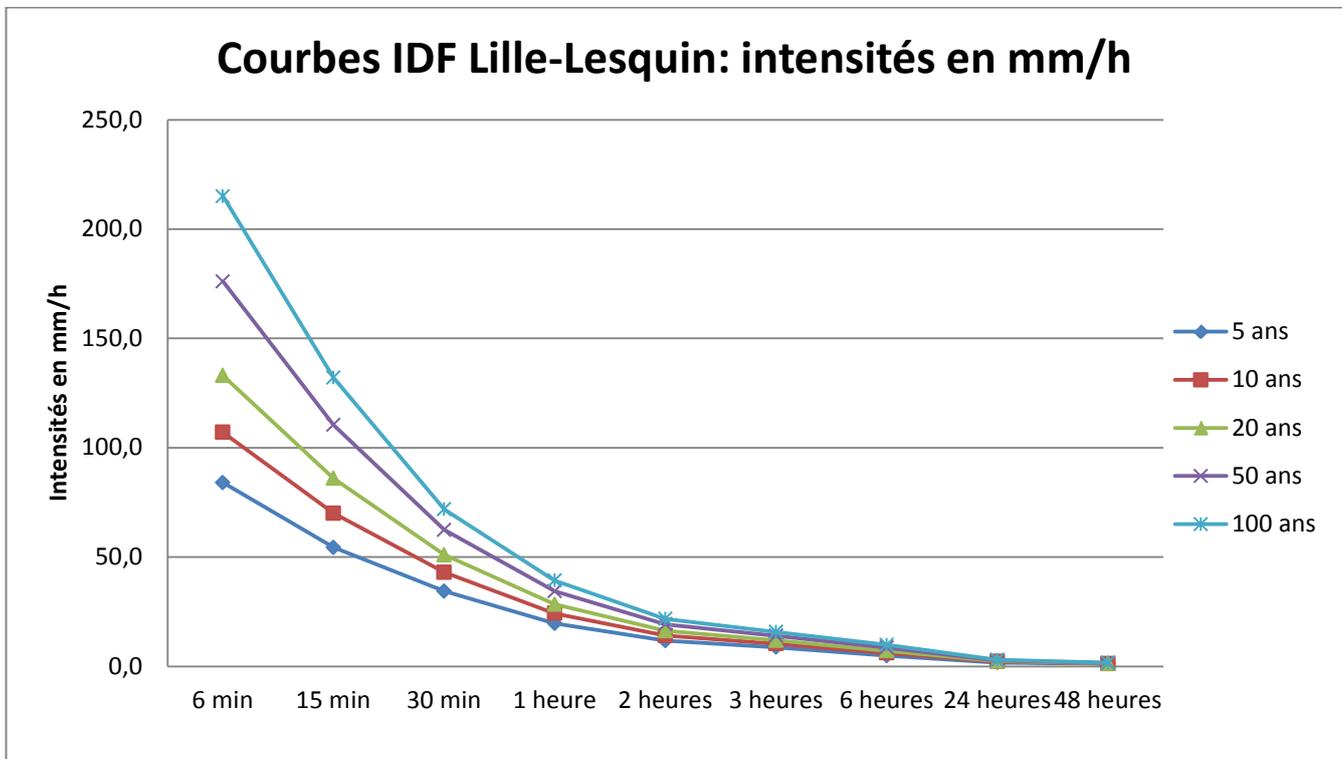


Figure 72 : Courbes IDF Lille-Lesquin – Intensités en mm/h

4.2 Analyse des hydrogrammes de crues sur le TRI Béthune-Armentières

4.2.1 L'accélération et l'amplification des apports

Au regard des études antérieures menées à l'échelle du bassin versant de la Lys, il a été constaté une accélération et une amplification des apports en provenance des bassins d'apport depuis plusieurs années.

Extrait du rapport de Phase 1 et 2

En effet, depuis 50 ans, les analyses empiriques et quantitatives des conditions du ruissellement et des apports hydrologiques dans leur ensemble, tendent à montrer une accélération et une amplification des hydrogrammes alimentant le réseau hydrographique dans la plaine, qu'il s'agisse des émissions par les sous-bassins amont ou de la production intrinsèque du périmètre propre à la plaine et à l'aval du bassin versant de la Lys.

Cette intensification des apports s'explique par :

- La dynamique des apports des bassins versants amont de la Lawe et de la Clarence

Compte tenu de leur morphologie topographique et hydrographique (pentes accentuées, réseaux ramifiés), de l'évolution de l'occupation des espaces sur ces deux sous-bassins versants (fonciers agricoles remembrés et très majoritairement voués à la culture intensive, dont certaines cultures sarclées à impact hydrologique fort, extension des zones urbaines et péri-urbaines, mais aussi de toutes les formes d'imperméabilisation qui affectent jusqu'aux espaces ruraux, et assez largement de la raréfaction des zones d'amortissement hydraulique), la dynamique générale des hydrogrammes émis par la Lawe, la Clarence et ses affluents, vers la plaine en aval du canal d'Aire, s'est accélérée au point de s'apprécier désormais en heures, et la réactivité plus élevée de ces macro-entités hydrologiques, les rend également productrices de pics de débits pour des événements pluviométriques de plus en plus fréquents, en raison d'une sensibilité au ruissellement étendue à plusieurs mois de l'année et à des superficies de plus en plus importantes.

A l'encontre de cette évolution, les conditions de franchissement du canal d'Aire sont restées sensiblement identiques en termes capacitaires, depuis une quarantaine d'année (les reconstructions les plus récentes de siphons remontent aux années 60), et les conditions d'écoulement en amont du canal ont plutôt connu des réductions capacitaires consécutives aux empiètements urbains sur les lits moyens et les bras de décharge, de sorte que l'augmentation des pics de crues n'est que partiellement répercutée vers l'aval et la plaine, par l'effet d'écrêtement des débordements en amont : l'accélération des flux incidents, en revanche, s'impose à l'ensemble du réseau hydrographique et des zones riveraines.

- La dynamique des apports du bassin versant amont de la Lys et ses affluents

Alors que ses affluents au niveau du nœud d'Aire (Laquette, Melde, Liauwette) sont très réactifs compte tenu de leur compacité, de leur relief et de leur taille, la Lys rivière (et ses affluents amont), qui représente plus de 50 % du sous-bassin versant de la Lys au droit du nœud d'Aire, présente encore une genèse de crues hivernales et printanières, plus lentes que celles des grands sous-bassins voisins :

- L'étiement du bassin versant limite la concomitance des contributions élémentaires, ainsi que la sensibilité à des événements pluvieux orageux généralement concentrés géographiquement.
- Il subsiste des zones d'amortissement naturel des crues (lit majeur).

- Les espaces ruraux semblent avoir été moins affectés par l'urbanisation et l'imperméabilisation.

Toutefois, une topographie favorable au ruissellement, et des évolutions foncières et agricoles comparables aux bassins voisins, ont abouti à une accélération de ces crues, dont la montée se produit désormais en moins de 2 jours, à partir du début des précipitations critiques.

- La dynamique des apports de ruissellement intrinsèques au périmètre d'étude

A l'image des autres sous-bassins de la Lys, les apports de ruissellement intrinsèques au secteur du Bas Pays, de la Flandre intérieure et de la plaine de la Lys, se sont notablement accrus et accélérés au cours des dernières décennies :

- Dans les secteurs non plats à l'Est du périmètre, les modifications des pratiques agricoles et de l'organisation parcellaire qui leur est liée, n'ont pas manqué de favoriser le ruissellement rural saisonnier, là où il était sans doute naguère négligeable, en tout cas très réduit compte tenu des pentes qui demeurent la plupart du temps limitées.
- L'extension des secteurs urbains et des agglomérations rurales a généré une densification de l'imperméabilisation, complétée par une densification de la collecte par des réseaux pluviaux enterrés, qui ont favorisé l'accroissement et l'accélération des apports de drainage urbain.

4.2.2 Détermination de la durée de pluie la plus défavorable

D'après l'examen des hydrogrammes de crues via les études antérieures, le temps de concentration le plus pénalisant observé au droit du TRI Béthune-Armentières est de 1 heure. En effet, les principaux apports sur l'ensemble du TRI Béthune-Armentières sont générés par les bassins versants en amont de la plaine de la Lys, dont les réactions face aux précipitations sont très rapides en raison de la pente ainsi que du contexte d'occupation des sols.

Les principaux bassins générant des apports importants sont donc :

- Le bassin amont de Lawe,
- Le bassin amont de Clarence,
- Le bassin amont de la Lys rivière,
- Le bassin amont de la Laquette,
- Le bassin de la Météren Becque,
- Le bassin de la Grande Becque de Saint-jans-Cappel,
- Le bassin de la Melde,
- Le bassin de la Bourre.

Ce temps de concentration permet de savoir sur quelle durée de pluie le Gradex va être calculé.

Le Gradex va donc être calculé sur la durée de pluie d'une heure.

4.2.3 Détermination de la période de retour « pivot »

La période de retour dite « pivot » est la période de retour à partir de laquelle l'ensemble des précipitations sur le bassin du TRI Béthune-Armentières ruissellent entièrement.

Dans le Chapitre 1 : Hydrologie calée – étude de faisabilité et d'inondabilité, il a été présenté les différents éléments de calage des modèles hydrauliques sur le TRI Béthune-Armentières, et plus particulièrement les coefficients de ruissellement (apports des surfaces peu ou pas imperméabilisées) utilisés pour le calage.

Au regard des études de faisabilités ainsi que de l'étude d'inondabilité, il a été observé que les coefficients de ruissellement appliqués n'étaient pas égaux à 100%, aussi bien pour les pluies d'une période de retour $T=20$ ans que pour les pluies d'une période de retour $T=50$ ans. Cela signifie donc que toutes les précipitations en provenance des bassins d'apports ne ruissellent pas, mais qu'une partie de ces eaux est infiltrée.

Le ruissellement total des précipitations sur le secteur du TRI Béthune-Armentières n'est possible qu'à partir d'une pluie ayant une période de retour très supérieure à 50ans.

Au regard de ces éléments et des données IDF disponibles au niveau de la station météorologique de Lille-Lesquin, il a donc été retenu que la période de retour « pivot », utilisé pour le calcul du Gradex est donc $T=100$ ans.

4.3 Calcul du Gradex des pluies

L'objectif de cette étape est de calculer le coefficient multiplicateur de la droite d'ajustement de l'échantillon pluviométrique (IDF Lille-Lesquin) en fonction de la loi de Gumbel ($\ln(\ln F)$).

Différentes étapes permettent d'obtenir ce coefficient:

- Détermination de la loi Gumbel pour les périodes de retour $T=5$ ans, $T=10$ ans, $T=20$ ans, $T=50$ ans et $T=100$ ans

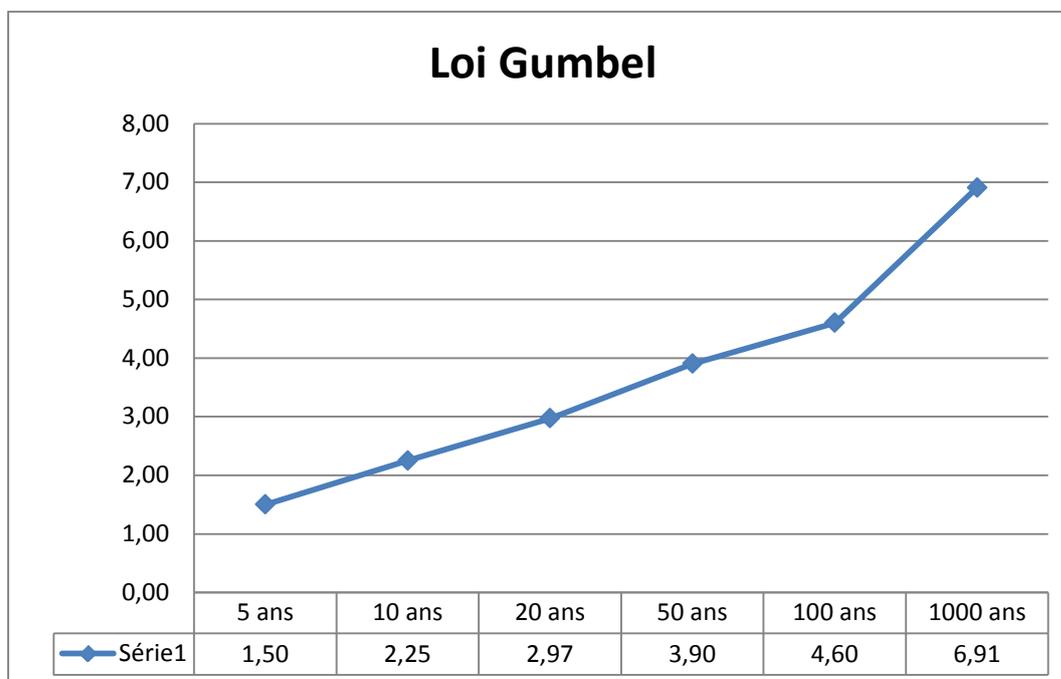


Figure 73 : Loi Gumbel applicable pour l'extrapolation des débits extrêmes

- Calcul des intensités en mm/h de la période de retour T=1000ans sur la base des intensités des précipitations de la période de retour pivot (soit : T=100ans) pour une durée de 1 heure (durée de pluie la plus défavorable) et des valeurs obtenues par la Loi Gumbel.

	100 ans	1000 ans
Loi de Gumbel	4,60	6,91
1 heure (durée de la pluie la plus défavorable sur le TRI)	0,655	0,925

Tableau 41 : Détermination de l'intensité en mm/h pour T=1000ans sur une durée de 1 heure

- Grâce à l'obtention de l'intensité des précipitations par l'ajustement de la distribution des pluies à la Loi Gumbel, le Gradex des pluies est obtenu par la formule suivante :

$$\text{Gradex des pluies} = \text{Intensité}_{T=1000\text{ans}} / \text{Intensité}_{T=100\text{ans}}$$

$$\text{Soit : } 1,41 = 0,027 / 0,033$$

Le Gradex des pluies permettant le calcul des débits extrêmes sur le TRI Béthune-Armentières est donc de 1,41.

Remarque : Le coefficient multiplicateur obtenu (1,41) sur le TRI Béthune-Armentières est relativement bas, en comparaison avec d'autre secteur au droit du Nord-Pas-de-Calais. Toutefois cela est justifiable par le fait que le calcul réalisé pour l'ajustement de la droite prend comme référence la période de retour 100ans. Or la hauteur de pluie au droit de la station météorologique de Lille-Lesquin pour T=100ans est relativement faible en comparaison avec la lame d'eau T=50 ans. Il est donc logique que le prolongement de la droite ne marque pas une progression remarquablement élevée pour T=1000ans.

4.4 Détermination des débits extrêmes GRADEX / SHYREG

4.4.1 Points de calculs pour la comparaison des débits extrêmes GRADEX/SHYREG

Il s'agit de tenter de comparer les débits de pointe calculés par la méthode Gradex, avec les débits calculés par la méthode Shyreg (donnés par la DREAL).

A priori, les débits extrêmes « hydrologiques » (qui ne prennent pas en compte l'hydraulique) ne peuvent être comparés qu'au niveau des cours d'eaux pour lesquels les phénomènes d'expansion de crue, de débordements et stockage sont limités.

De ce fait, les débits Gradex/Shyreg seront comparés au niveau de noeuds hydrologiques, en amont de la plaine de la Lys.

La carte ci-dessous positionne les points sur lesquels une première comparaison a été faite entre les débits SHYREG / Gradex.

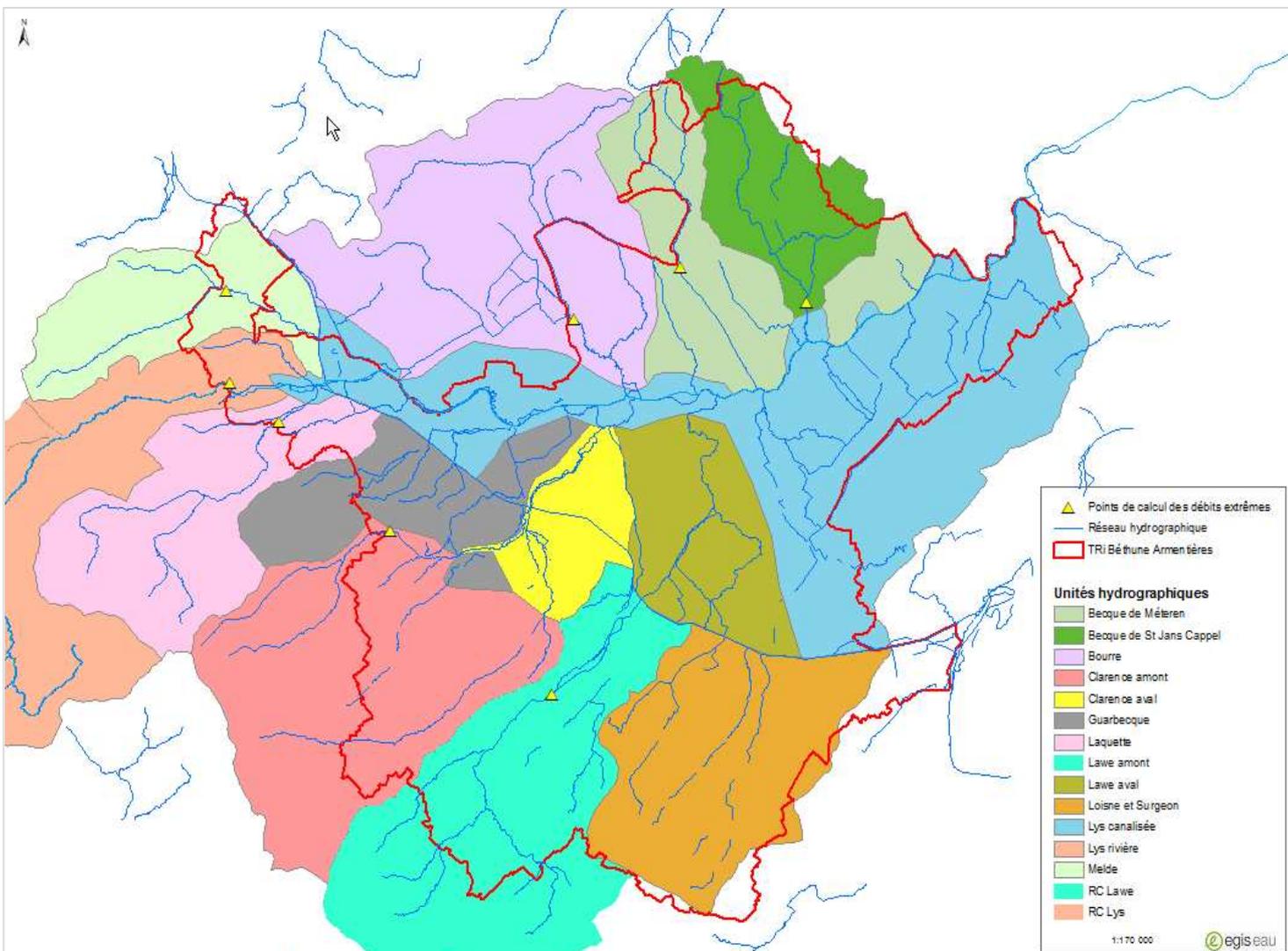


Figure 74 : Localisation des points de calcul des débits extrêmes GRADEX / SHYREG

4.4.2 Caractérisation de la pluie hivernale centennale de référence

4.4.2.1 Justification et choix des périodes de retour et évènements étudiés pour l'étude d'Inondabilité

La réalisation de cartes aléa inondation, étendue sur un si vaste secteur, pose le problème du choix des conditions hydrologiques simulées (forme de la pluie, taux de saturation des sols considérés jouant sur les coefficients de ruissellement...), pour rendre compte des évènements pénalisants propre à chaque sous bassin versant.

La connaissance du secteur d'études à travers notamment les études antérieures a montré qu'en général :

- L'amont de chacun des bassins versants est très sensible à une précipitation orageuse, alors que,
- L'aval de chacun des bassins versants, est plus sensible à des précipitations hivernales d'une durée de plusieurs jours. Ces dernières engendrent des crues dont le volume est capable de submerger les casiers de la plaine de la Lys qui imposeront à leur tour une contrainte aval importante sur l'aval de chacun des bassins versants élémentaires.

Pour autant, il s'agit de rendre compte d'hypothèses hydrologiques les plus homogènes entre elles, afin d'éviter de démultiplier les hypothèses et formes de pluies.

De ce fait, la carte des zones inondables, pour l'évènement centennal (mais aussi pour l'évènement vicennal) est la superposition des deux cartes obtenues :

- à partir de l'orage de projet centennal (au niveau des bassins versants amont)
- à partir de la pluie hivernale centennale (au niveau de la plaine de la Lys).

Dans le cadre de l'étude propre au TRI, la cartographie des zones d'inondation concernent globalement l'aval du territoire Symsagel (Bas-Pays et Plaine de la Lys). De ce fait, l'évènement extrême sera construit sur la base de l'évènement centennal de type hivernal (pluie longue sur sols saturés), générateur de volumes et de zones d'expansion de crues maximum. Cet évènement sera réparti de manière homogène sur l'ensemble du bassin versant de la Lys.

4.4.2.2 Définition de la pluie hivernale centennale de référence

La caractérisation d'une période de retour d'une crue d'un cours d'eau ne doit généralement pas être associée directement à une pluie d'une même période de retour.

Les conditions de saturation des sols et de remplissage/ vidange des nappes (soit les conditions hydrologiques) jouent un rôle fondamental dans la génération des volumes de crue et viennent se rajouter aux volumes de ruissellement propres directement imputables à la pluie.

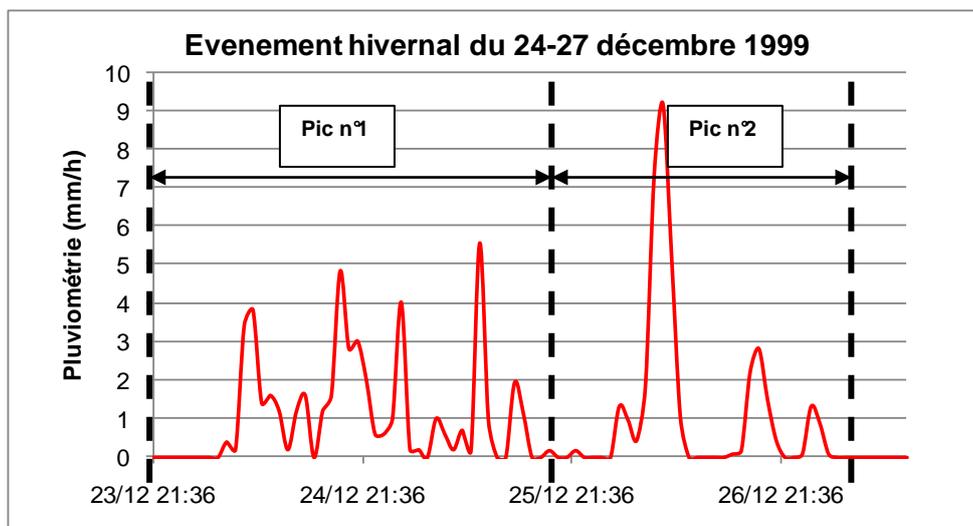
Dans le cadre de l'étude Inondabilité, il s'agit de définir les caractéristiques de la pluie hivernales et des conditions hydrologiques associées, qui engendrent une crue centennale.

Précipitation de Décembre 1999

Parmi les événements ayant engendré des arrêtés de Catastrophe Naturelle, nous avons retenu la pluie du **24-27 décembre 1999**, qui présente les avantages d'être relativement récente (encore très présente dans la mémoire des riverains et élus), de forme « double triangle successifs » et avec des cumuls pluviométriques élevés.

La pluie de Décembre 1999 est ainsi composée globalement de deux pics successifs dont les caractéristiques sont synthétisées ci-dessous :

Figure 75 : Hyétogramme de la pluie hivernale, du 24 au 27 Décembre 1999



Les occurrences de la pluie ont été estimées sur la base des données Intensité/Durée/Fréquence à la station de Lille-Lesquin pour les durées inférieures à 24 heures et sur celles de Fiefs pour les durées supérieures à 1 jour.

Le hyétogramme hivernal par bassin versant, est créé par homothétie à partir des précipitations réelles, jusqu'à générer des hydrogrammes de pointe centennale

Figure 76 : Caractérisation de la pluie hivernale, du 24 au 27 Décembre 1999

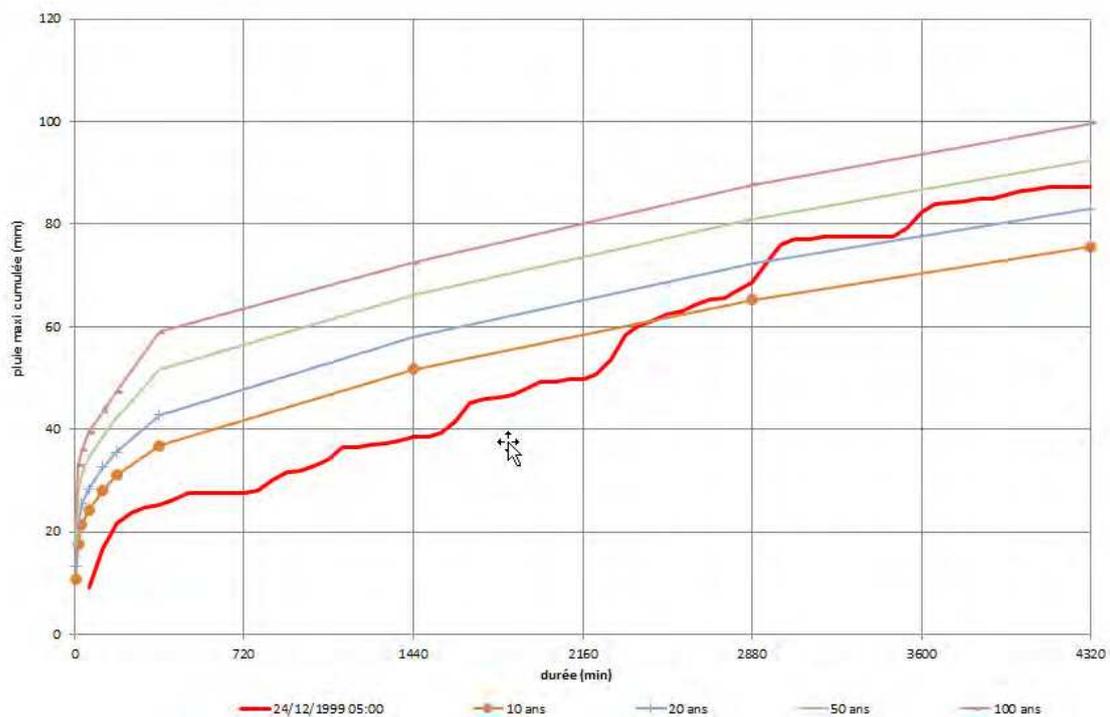


Tableau 42 – Intensité-durée-Fréquence à la station de Fiefs

Valeurs extrêmes de précipitations à Fiefs (en mm)			
	T=10 ans	T=20 ans	T=50 ans
1 jour	47,4	52,5	59
2 jours	65,3	72,2	81
3 jours	75,6	83	92,5

Tableau 43 – Intensité-durée-Fréquence à la station de Fiefs

	Cumul pluviométrique (mm)						Total (mm)	
	1h	2h	3h	6h	12h	24h	2jrs	3jrs
Pic N°1	5,6	7,7	10,7	15,6	23,4	38,4	68,6	87,2
Pic N°2	9,2	16,6	21,8	25,2	27,5	37,0		

Nous constatons que :

- le cumul pluviométrique (87.2 mm) sur l'intégralité de la durée de l'événement (ici 3 jours) a **une période de retour comprise entre 20 et 50 ans** (et de l'ordre de 10 – 20 ans pour le cumul sur 2 jours) ;
- Le premier pic de pluie est d'occurrence inférieure à 2 ans quelle que soit la durée de cumul considérée (à l'exception de la durée 24 ans avec une occurrence comprise entre 2 et 5 ans) ;
- Le second pic de pluie est d'occurrence faible également : inférieure à 2 ans pour les durées de cumul inférieures à 2 heures et de l'ordre de 2-5 ans pour les durées supérieures.

Crue Décembre 1999 et la crue centennale

Il s'agit désormais de vérifier si la crue de 1999, en termes de débits de pointe instantanés et/ou journaliers, peut être qualifiée de crue centennale.

Cette vérification a été réalisée au niveau des stations hydrométriques listées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 44 – Stations hydrométriques

Cours d'eau	Station hydrométrique	Caractéristiques
Laquette	Witternesse	Station peu précise en hautes eaux
Lawe	Bruay-la-Buissière	Station ultra son implantée pour une bonne connaissance du débit
Lys rivière	Lugy	Données hydrologiques de synthèse (1971-2012)
	Delettes	Données hydrologiques de synthèse (1954-2012)
	Aire-sur-la-Lys	Station ultra-sons installée en 2004 pour la connaissance des débits
Lys canalisée	Armentières	Données non disponibles
	Saint-Venant	Données non disponibles

Concernant la Lys, les débits centennaux qui servent de référence aux services de l'état sont ceux calculés par SOGREAH pour le PPRI.

Le Tableau 11 est une synthèse des débits maximum instantanés et journaliers mesurés lors de la crue de Décembre 1999, et des débits cinquantennaux et centennaux estimés.

Les données sont issues de :

- Station hydrométriques du SRPC ;
- L'étude SOGREAH pour le PPRI ;
- Modèles d'Egis Eau face à la crue 1999.

Conclusion

Il apparaît que :

- **Le débit instantané centennal** du PPRI à Delettes est égal au débit instantané cinquantenal de la Banque Hydro à Delettes et il **est légèrement supérieur à la crue Décembre 1999 instantané mesuré**.
- Pour le reste, peu de données restent comparables sur ce bassin versant de plus de 1500 km².

La pluie tombée entre le 27 et le 29 décembre 1999, d'une période de retour inférieure à 50 ans engendre une crue dont le débit de pointe instantané est inférieur au débit centennal.

La pluie hivernale de projet d'une période de retour centennale est créée par homothétie à partir des précipitations réelles de Décembre 1999, en appliquant un coefficient multiplicateur de 1,20 de sorte à obtenir une crue centennale. L'évènement pluviométrique centennial, d'une durée de 10 jours et d'une intensité moyenne journalière de 0,60 mm/h est affecté uniformément à l'ensemble du bassin versant de la Lys.

Tableau 45 – Synthèse des débits maximaux instantanés et journaliers enregistrés et/ou estimés aux station principales sur le bassin versant de la Lys

COURS D'EAU			Lys Rivière		Lys canalisée	Clarence	Laquette	Lawe
STATION / POINT DE REFERENCE			Lugy	Delettes	Aire-sur-la-Lys	Robecq	Wittemesse	Bruay-la-Buissière
données hydrométriques SRPC	Débit cinquantennal Banque Hydro - Q50	Q journalier (m3/s)	13	24	NC	11	NC	NC
		Q instantané (m3/s)	25	33	NC	13	NC	NC
	Débit centennal Banque Hydro - Q100	Q journalier (m3/s)	NC	NC	NC	NC	NC	NC
		instantané (m3/s)	NC	NC	NC	NC	NC	NC
	Débit mesuré - 1999	Qjmax (m3/s) (m3/s)	10,10*	21,20*	ND	8,35*	4,99*	ND
		Q journalier (m3/s)	7.18	19.6	ND	7.75	4.3	ND
		instantané (m3/s)	ND	29,10*	ND	ND	8.09	ND
	Débit maximum mesuré	Qjmax (m3/s) (m3/s)	11,40*	22,70*	24.8	8,35*	8,07*	5.71
		date	31/12/1994	01/11/1998	09/12/2006	27/12/1999	04/07/2005	02/01/2003
		Qimax (m3/s) (m3/s)	16,50*	29,10*	31.4	8,58*	12,4*	16.4
date		09/12/1994	27/12/1999	04/12/2006	06/03/2012	04/07/2005	23/07/2007	
données débits calculés pour PPRI	Débit décennal - Q10	Q journalier (m3/s)						
		Q instantané (m3/s)		24.4	42.5	10.6		9.25
		Réalisé par		SOGREAH	SOGREAH	SOGREAH		SOGREAH
		méthode		modèle CARIMA	modèle CARIMA	modèle CARIMA		modèle CARIMA
	Débit centennal - Q100	Q journalier (m3/s)						
		Q instantané (m3/s)		31.25	46.5	13.75		10.6
		Réalisé par		SOGREAH	SOGREAH	SOGREAH		SOGREAH
		méthode		modèle CARIMA	modèle CARIMA	modèle CARIMA		modèle CARIMA
débits issus des modèles Egis eau	Débit issu de la modélisation - crue 1999	Qmax (m3/s) (m3/s)	à présent ND	à présent ND	à présent ND	en attente	8.2	20.5
		date				en attente	26/12/1999	26/12/1999
	Débit issu de la modélisation - orage T=100 ans	Qmax (m3/s) (m3/s)	à présent ND	à présent ND	à présent ND	10.5	12.85	32.76

* : valeur estimée (mesurée ou reconstituée) que le gestionnaire juge incertaine
 NC : non calculé
 ND : non disponible

4.4.3 Extraction des débits de pointe pour T=100ans

Afin d'obtenir les débits extrême les plus pénalisants au droit du TRI Béthune-Armentières, les simulations des différents modèles ont été réalisées avec une pluie d'une période de retour T=100ans de type hivernale pour simuler une saturation complète des sols.

A partir de ces simulations les hydrogrammes au droit des secteurs stratégiques ont été extrait pour chaque bassin.

■ Hydrogramme sur la Laquette

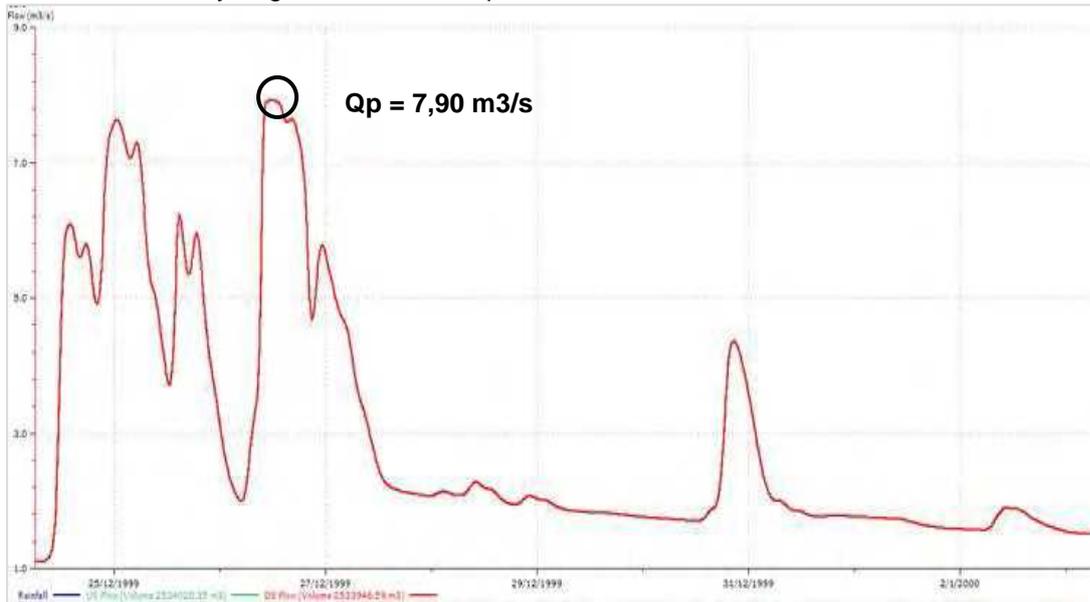


Figure 77 : Hydrogramme au droit de la Laquette pour T=100ans en situation hivernale

■ Hydrogramme sur la Météren Becque

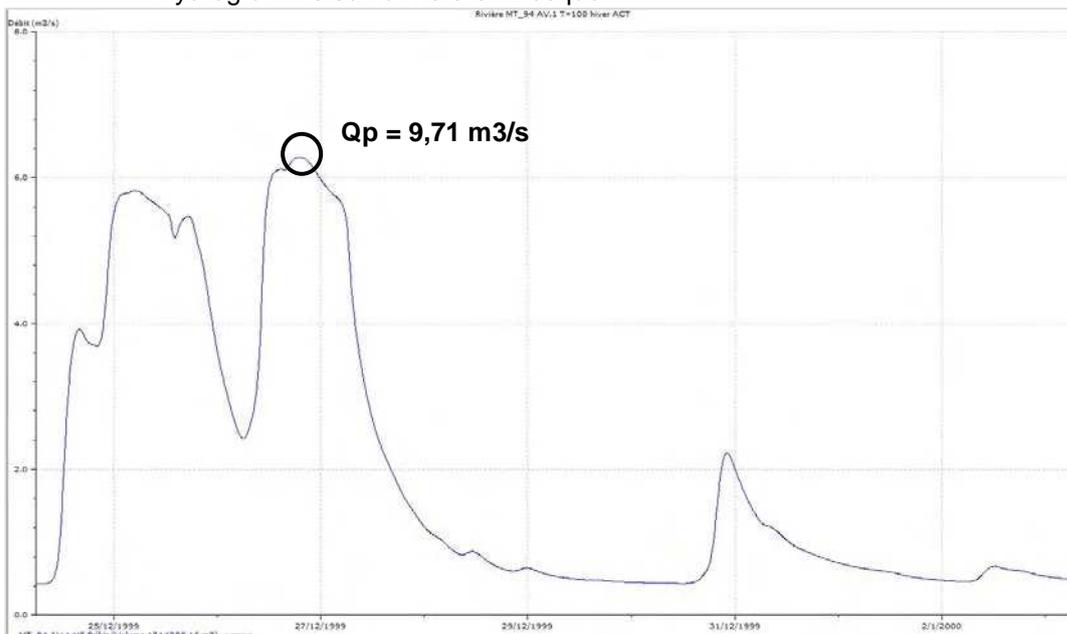


Figure 78 : Hydrogramme au droit de la Météren becque

■ Hydrogramme sur la Bourre

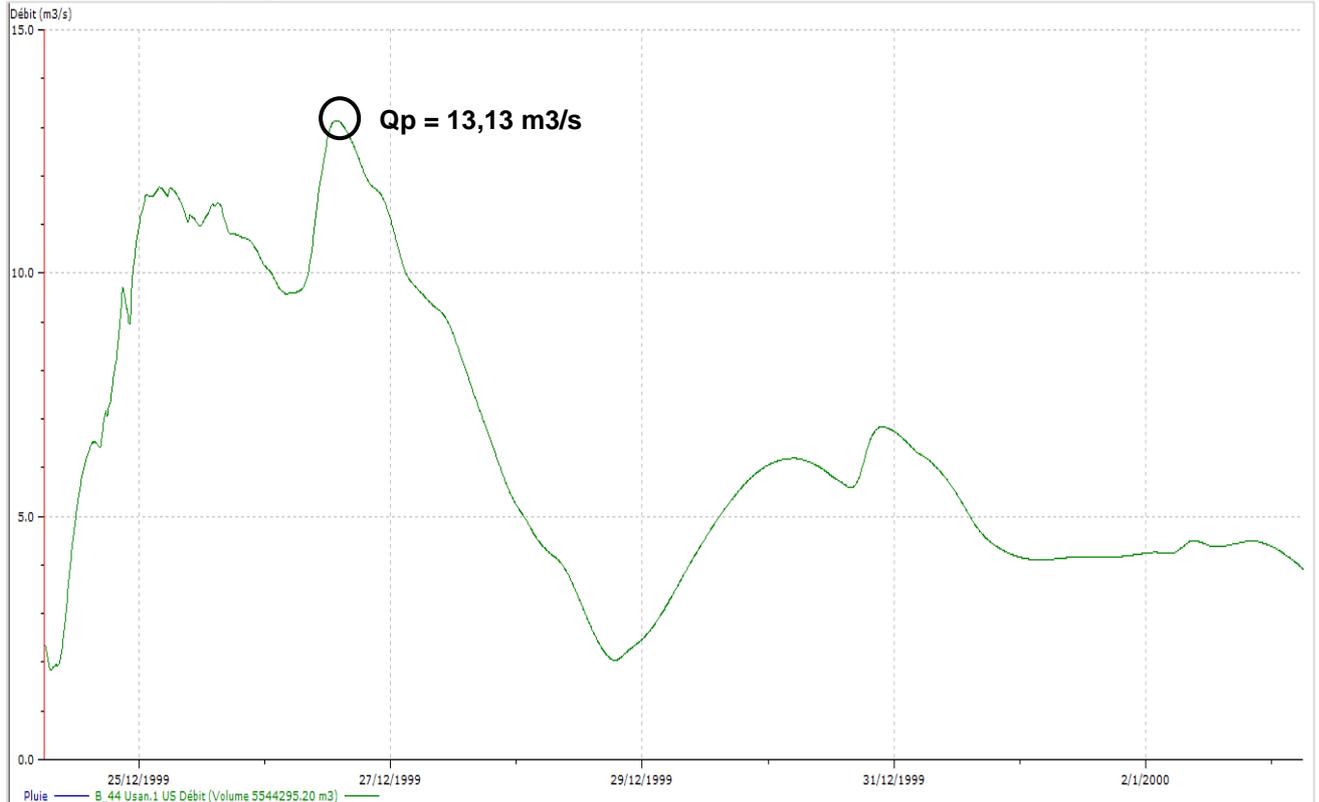


Figure 79 : Hydrogramme au droit de la Bourre

■ Hydrogramme sur la Grande Becque de Saint-Jans-Cappel

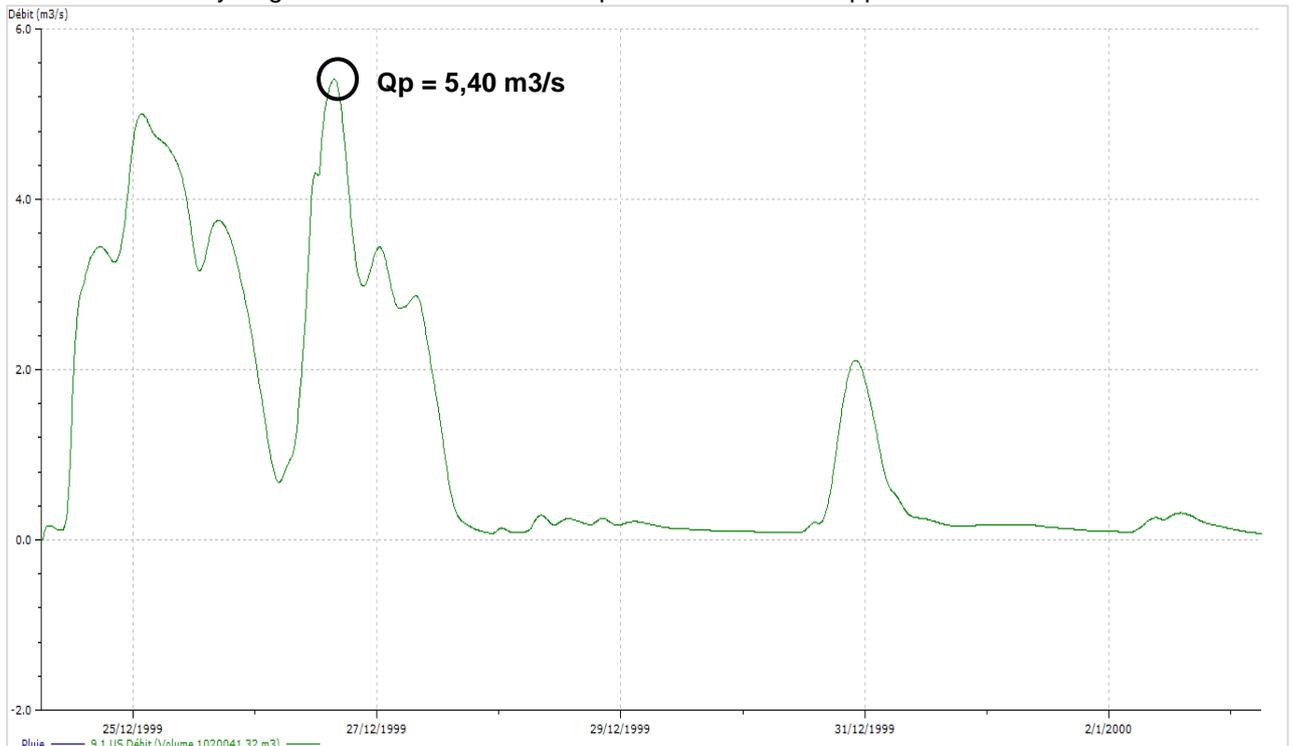


Figure 80 : Hydrogramme au droit de la Grande Becque de Saint-Jans-Cappel

■ Hydrogramme sur la Melde

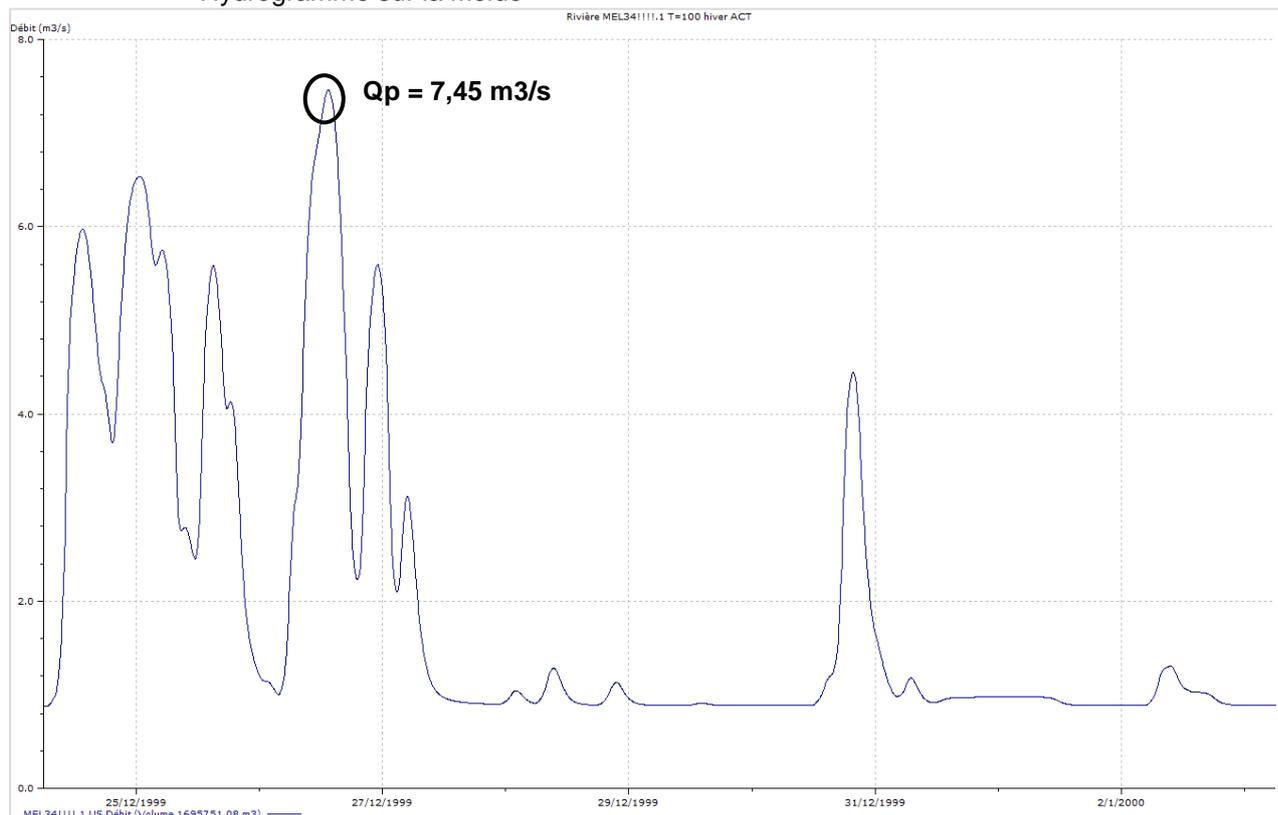


Figure 81 : Hydrogramme au droit de la Melde

■ Hydrogramme sur la Lys rivière

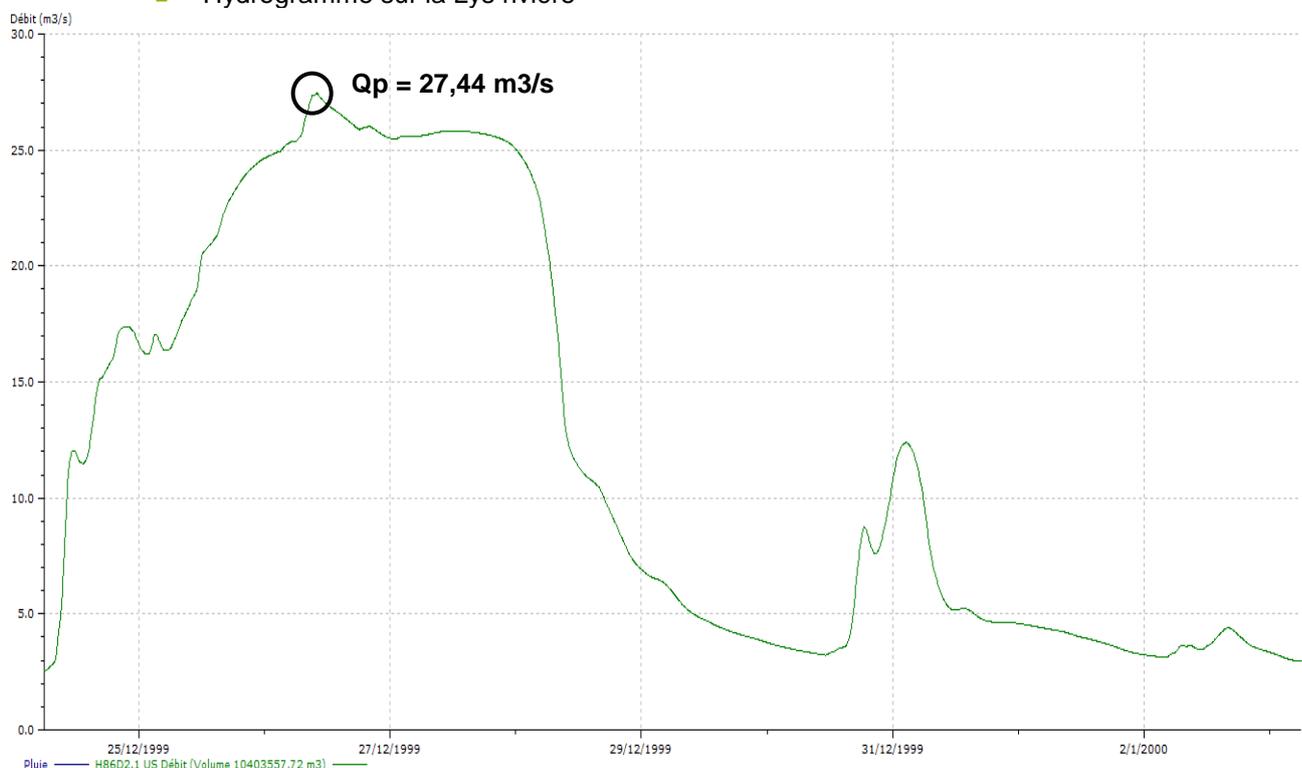


Figure 82 : Hydrogramme au droit de la Lys rivière

■ Hydrogramme sur la Clarence

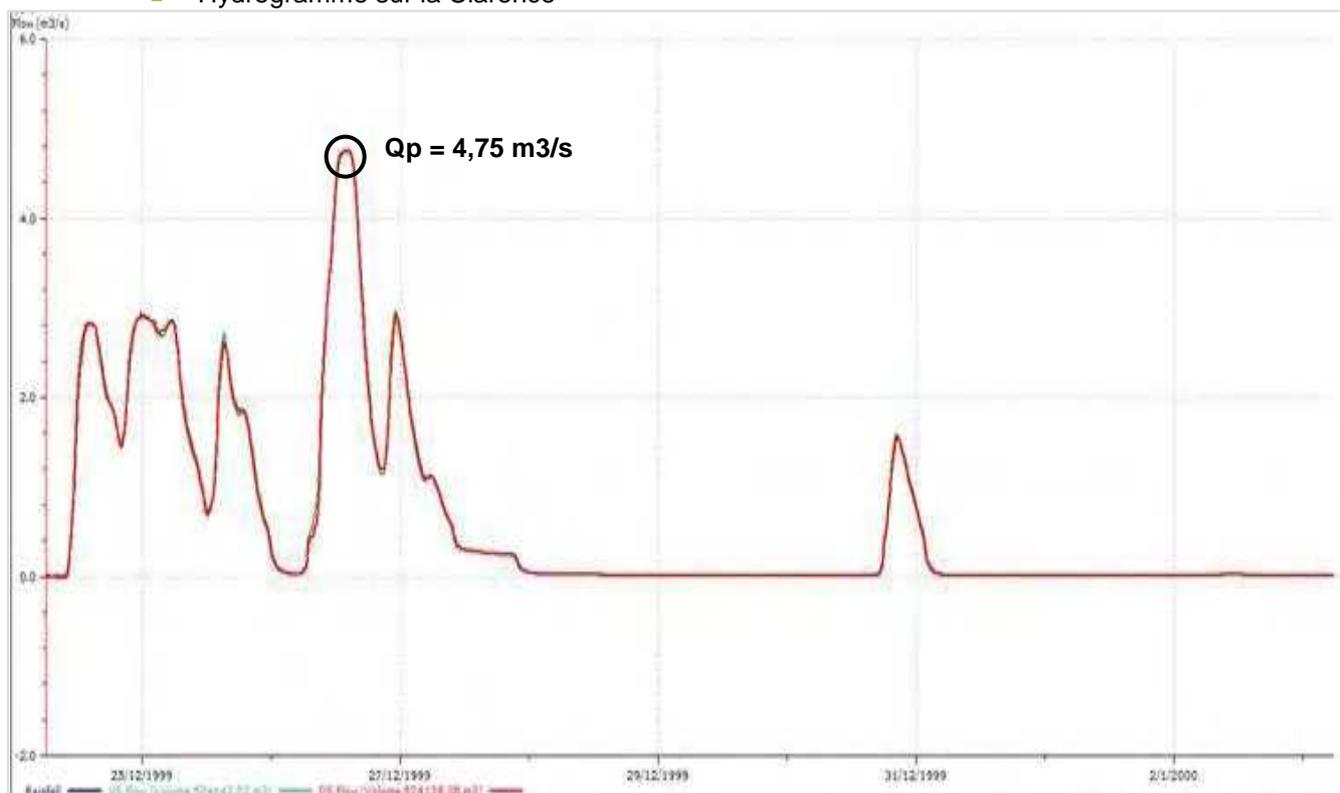


Figure 83 : Hydrogramme au droit de la Clarence

Les débits de pointe ont été identifiés pour chaque modèle.

Le tableau ci-dessous présente les débits de pointe extraits des modèles hydrauliques pour T=100ans en situation hivernale (positionnement des points de calculs sur la figure 74)

Bassins d'apport	Débit de pointe : Qp (m3/s)
Clarence	4,75 m3/s
Lys rivière	27,44 m3/s
Laquette	7,90 m3/s
Météren Becque	9,71 m3/s
Grande Becque de Saint-Jans-Cappel	5,40 m3/s
Melde	7,45 m3/s
Bourre	13,13 m3/s

Tableau 46 : Débits de pointe des bassins versants pour une pluie T=100ans de type hivernale

4.4.4 Détermination des débits extrêmes à partir des débits T=100 ans issus des modèles

Les débits extrêmes sont donnés dans une première approche, en multipliant par le gradex, le débit de pointe issus des simulations de la pluie hivernale T= 100 ans.

Les débits extrêmes pour les différents bassins versants sont donc présentés dans le tableau ci-dessous.

Bassins d'apport	Débit extrêmes (m3/s)
Clarence	6,70 m3/s
Lys rivière	38,69 m3/s
Laquette	11,14 m3/s
Météren Becque	13,69 m3/s
Grande Becque de Saint-Jans-Cappel	7,61 m3/s
Melde	10,50 m3/s
Bourre	18,51 m3/s

Tableau 47 : Débits extrêmes - (amont) TRI Béthune-Armentières

4.5 Comparaison avec les valeurs obtenus par la méthode Shyreg

Le premier tableau compare les débits T= 100 ans, débits extraits des modélisations calées de chaque bassin versant sur le territoire du TRI Béthune-Armentières à ceux calculés via la méthode Shyreg au droit des mêmes secteurs.

Bassins d'apport	Débit de pointe (m3/s) T=100ans – Hydrologie calée	Débits de pointe (m3/s) T=100ans – Méthode Shyreg
Lawe		19,83
Clarence	4,75	8,73
Lys rivière	27,44	45,24
Laquette	7,90	18,11
Météren Becque	9,71	14,42
Grande Becque de Saint-Jans-Cappel	5,40	16,93
Melde	7,45	13,19
Bourre	13,13	21,78

Tableau 48 : Comparaison des débits T = 100 ans entre les méthodes Gradex et Shyreg

Le tableau ci-dessous présente les débits extrêmes obtenus grâce à la méthode Gradex et ceux calculés par la méthode Shyreg au droit des mêmes secteurs.

Bassins d'apport	Débit extrêmes (m3/s) - Méthode Gradex	Débit extrêmes (m3/s) - Méthode Shyreg
Lawe		35,70
Clarence	6,70	16,59
Lys rivière	38,69	77,24
Laquette	11,14	32,57
Météren Becque	13,69	28,48
Grande Becque de Saint-Jans-Cappel	7,61	32,70
Melde	10,50	24,37
Bourre	18,51	42,86

Tableau 49 : Comparaison des débits extrêmes entre les méthodes Gradex et Shyreg

4.6 Synthèse de la détermination des débits extrêmes

Dès la période de retour $T=100$ ans, la méthode Shyreg propose des débits largement supérieurs (les débits de pointe doublent), au niveau des différents points de comparaison.

On notera toutefois, que ces valeurs de débits de pointe restent très difficiles à comparer, dans le sens où les débits de pointe SHYREG peuvent être considérés comme des débits « hydrologiques » (qui ne prennent pas en compte les verrous hydrauliques qui écrêtent les débits et provoquent des zones de débordement), tandis que le débit calculé $T=100$ ans est qualifié de débit « hydraulique » (il est issu des simulations du modèle qui prennent en compte l'écrêtement du système hydraulique).

Le premier chapitre de cette étape a eu pour objet de démontrer la rigueur du travail hydrologique et de calage des différents modèles pour des pluies de période de retour comprises entre 20 et 50 ans.

De ce fait, il est possible d'imaginer que l'extrapolation de ces modèles, vers les débits centennaux, reste très vraisemblable. En parallèle, les cartes d'aléas vicennales et centennales (dans le cadre de l'étude d'Inondabilité sur le bassin versant de la Lys), ont été soumises à validation au SYMSAGEL pour un calage ajusté.

Les débits centennaux donnés par la méthode SHYREG apparaîtraient, de ce fait, surestimés selon des débits centennaux calculés et justifiés.

Logiquement, les débits extrêmes SHYREG s'en retrouvent largement surestimés en regard des débits extrêmes Gradex calculés à partir des débits centennaux.

De ce fait, pour la modélisation hydrologique, il sera proposé et validé une augmentation des hydrogrammes qui soit un compromis entre les débits issus de la méthode Gradex et les débits Shyreg.

Dans le cadre de cette étude, il s'agit toutefois garder à l'esprit que, plus que les débits de pointe, les volumes générés, transités puis éventuellement débordés puis accumulés, sont les paramètres les plus importants, dans le cadre de l'élaboration des cartes d'inondations.

S'il a été tenté de chercher à comparer en plusieurs points du système hydraulique les deux méthodes, à noter que ces deux approches purement hydrologiques ne doivent être utilisées qu'au niveau des bassins versants élémentaires, soit à la plus petite échelle hydrologique.

Dans le cadre de la modélisation et l'étape suivante, la prise en compte de l'évènement extrême consistera en l'augmentation des hydrogrammes, au niveau de chacun des bassins versants élémentaires qui composent les 14 modèles hydrauliques, afin de positionner au plus juste les apports et de modéliser les zones d'expansions de crues ou zones de débordement au plus près de la réalité.

Le modèle hydraulique retravaillera les débits d'entrée pour aboutir à une succession d'hydrogrammes d'amont à l'aval, hydrogrammes qui s'autoriseront à être différents (et plus vraisemblables avec prise en compte notamment des volumes stockés et restitués dans les zones d'expansion de crue), des hydrogrammes qui pourraient être calculés à grande échelle par les seules méthodes Gradex ou Shyreg.