PPRI PLAN DE PREVENTION DES RISQUES INONDATIONS DE LA Clarence

Phase 3 : Qualification de l'aléa de référence

Livrable 8 / Révision n°1

Date : 06/12/2017

- **www.ppri-clarence.fr**

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

Détermination de l'aléa : Rapport technique

Première partie : estimation des évènements de référence

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

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

SOMMAIRE

1 INTRODUCTION 12

2 SIMULATION HYDROLOGIQUE DES EVENEMENTS REELS 13

2.1 Rappel du modèle hydrologique utilisé 13

2.2 Découpage du bassin versant 15

2.3 Crues réelles de référence 15

2.4 Simulation au pas de temps journalier des Crues hivernales 16

2.4.1 Préambule 16

2.4.2 22 au 31 décembre 2012 19

2.4.3 25 au 29 décembre 1999 22

2.5 Simulation au pas de temps horaire 26

2.5.1 Préambule 26

2.5.2 Evènement de décembre 2012 27

2.5.3 3 au 5 juillet 2005 28

2.5.4 Evènement de mai-juin 2016 31

2.6 Conclusion 32

3 FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE DU SYSTEME 33

3.1 Préambule 33

3.2 Ordre de grandeur des débits et des transferts 34

3.2.1 Sur la Clarence 34

3.2.2 Sur la Nave 37

3.2.3 Cartes de synthèse 40

3.3 Conclusions 42

4 ALEA DEBORDEMENT 43

4.1 Rappel de la méthode 43

4.2 Présentation des logiciels 43

4.2.1 Telemac 2D 43

4.2.2 HEC RAS 44

4.3 Emprise du modèle et topographie utilisée 44

4.3.1 Emprise et topologie du modèle 44

4.3.2 Données topographiques et bathymétriques exploitées 46

4.3.3 Traitement des données topographiques 47

4.3.4 Prise en compte des ouvrages 50

4.4 Localisation et étendue des modèles 51

4.5 Construction du modèle Hec Ras 52

4.5.1 Topologie 52

4.5.2 Conditions limites 53

4.6 Construction du modèle Telemac 54

4.6.1 Construction du maillage du modèle 54

4.6.2 Intégration de la bathymétrie 57

4.6.3 Modélisation des ouvrages 58

4.7 Conditions aux limites 59

4.7.1 Conditions limites amont 59

4.7.2 Conditions limites aval 59

4.7.3 Prise en compte de ces conditions aux limites dans le modèle TELEMAC 61

4.7.4 Coefficients de frottements 62

4.8 Calage de la crue de mai 2016 sur la Clarence amont 64

4.8.1 Emprise 64
4.8.2 Topographie utilisée 65
4.8.3 CONDITIONS LIMITES 67
4.8.4 Données de calage disponibles pour mai 2016 68
4.8.5 RESULTATS 71
4.8.6 Conclusions concernant le calage de la Clarence amont sur la crue de mai 2016 80
4.9 Calage de la crue de décembre 2012 sur la Clarence amont 82
4.9.1 Conditions limites amont 82
4.9.2 Données de calage disponibles pour décembre 2012 82
4.9.3 Calage en lit mineur à la station de Marles-les-Mines 84
4.9.4 Conclusions concernant la simulation de la crue de décembre 2012 sur la Clarence amont 86
4.10 Calage de la crue de mai 2016 sur la Nave et le Grand Nocq 86
4.10.1 Maillage 86
4.10.2 Topographie utilisée 87
4.10.3 CONDITIONS LIMITES 87
4.10.4 Données de calage disponibles pour mai 2016 88
4.10.5 RESULTATS 88
4.10.6 Conclusions 102
4.11 Validation du modèle de la Nave sur la crue de décembre 2012 103
4.11.1 Données disponibles pour décembre 2012 103
4.11.2 RESULTATS 104
4.11.3 Conclusions 110
4.12 Estimation du débit de 1999 111
4.12.1 Approche du débit sur la Clarence amont 111
4.13 Scénarios de rupture 128

4.13.1 Préambule 128

4.13.2 Scénarios retenus 128

4.13.3 Précision sur la localisation des brèches 132

4.14 Choix de l'évènement de référence 140

4.14.1 Rappel de la méthodologie 140

4.14.2 Approche statistique sur les débits 140

4.14.3 Approche pluie-débit 145

4.14.4 Conclusion sur l'évènement de référence 149

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma de principe du modèle GR4J 13

Figure 2 : découpage du bassin versant 15

Figure 3 : Cumuls pluviométriques mensuels à Fiefs, Lillers, Ourton, Bruay-la-Buissière et Aire-sur-la-Lys aux mois d'octobre, novembre et décembre 2012 19

Figure 4 : Cumuls pluviométriques journaliers à Fiefs et Lillers d'octobre à décembre 2012 19

Figure 5 : Cumuls pluviométriques journaliers à Ourton, Fiefs et Lillers et hydrogrammes observés à Robecq et Marles-les-Mines (estimations faites à partir de la nouvelle courbe de tarage) lors de l'épisode du 22 au 31 décembre 2012 20

Figure 6 : Cumuls pluviométriques mensuels à Fiefs et Lillers en décembre 1999 22

Figure 7 : Cumuls pluviométriques journaliers à Aire-sur-la-Lys et Fiefs aux mois de novembre et décembre 2012 23

Figure 8 : Hydrogramme observé à Robecq lors de l'épisode du 25 au 29 décembre 1999 24

Figure 9 : pluies de bassin 26

Figure 10 : Cumuls pluviométriques horaires à Lillers lors de la nuit du 3 au 4 juillet 2005 28

Figure 11 : Hydrogramme observé à Robecq lors de l'épisode du 3 au 5 juillet 2005 29

Figure 12 : blocage des eaux en rive gauche au droit de la route du pont de l'Abbaye 35

Figure 13 : Fossé de récupération des eaux de la Nave pour évacuation vers la Busnes via le déversoir du Plâtrier 37

Figure 14 : Juillet 2005, Manqueville 38

Figure 15 : Emprise du modèle 45

Figure 16 : LIDAR (à gauche) et profils bathymétriques disponibles en lit mineur (à droite) 47

Figure 17 : Importation des linéaires et des profils 48

Figure 18 : Interpolation des profils 48

Figure 19 : Lit mineur sur le Turbeauté 49

Figure 20 : Vérification de la cohérence entre le LIDAR er le MNT du lit mineur 50

Figure 21 : Ouvrages intégrés au modèle hydraulique AMAJ 51

Figure 22 : Localisation et étendue des modèles 1D et 2D 52

Figure 23 : Représentation 3D d'un extrait de la géométrie du modèle hydraulique de la Nave 53

Figure 24 : Représentation d'un ouvrage hydraulique du ruisseau du Fossé Noir 53

Figure 25 : Lignes de structure du maillage 54

Figure 26 : Intégration des lignes de structure à MATISSE 55

Figure 27 : Maillage des zones – Zoom sur le hameau de la Busnette 56

Figure 28 : Zoom sur le maillage des zones 56

Figure 29 : Maillage 57

Figure 30 : Intégration de la bathymétrie au maillage – Zoom sur Gonnehem et Lapugnoy 58

Figure 31 : Confluence Clarence – Vieille Lys – Turbeauté 60

Figure 32 : Niveau de la Lys canalisée à l'aval de l'écluse de Merville et niveau de la Clarence à la confluence avec la Vieille Lys lors de l'épisode de décembre 2012 60

Figure 33 : Confluence Busnes – Lys canalisée 61

Figure 34 : Niveau de la Lys canalisée à l'aval de l'écluse de St Venant lors de l'épisode de mars 2012 61

Figure 35 : Conditions aux limites du modèle TELEMAC2D 62

Figure 36 : Coefficients de Strickler de référence retenus 63

Figure 37 : Emprise et maillage du modèle de la Clarence amont 64

Figure 38 : Zoom sur le maillage en aval du modèle 65

Figure 39 : Profil bathymétrique de la Clarence amont – Partie amont 66

Figure 40 : Profil bathymétrique de la Clarence amont – Partie aval 66

Figure 41 : hydrogrammes observé et simulé par GESRES 67

Figure 42 : Limnigramme observé à la station de Marles-les-Mines 68

Figure 43 : Hydrogramme observé à la station de Marles-les-Mines 68

Figure 44 : exemple de fiche de relevé de repère de crue 69

Figure 45 : Carte de situation des données collectées pour mai 2016 sur Lapugnoy (source photo : Cerema) 70

Figure 46 : Carte de situation des données collectées pour mai 2016 sur Calonne Ricouart (source photo : Cerema) 71

Figure 47 : Comparaison des hydrogrammes observés et simulés à la station de Marles 72

Figure 48 : Comparaison des limnigrammes observés et simulés à la station de Marles 73

Figure 49 : jaugeages rouge) et résultats du modèle (bleu) à la station de Marles 73

Figure 50 : Emprise de la zone inondable maximale – Etang de Quenehem 74

Figure 51 : repères à Lapugnoy – tableau des différences entre mesures et estimations 75

Figure 52 : ouvrages dans la traversée de Lapugnoy 76

Figure 53 : un point bas forme une concavité de la route sur une 50 aine de mètres – les eaux sont reprises par le réseau 77

Figure 54 : Simulation GESRES 82

Figure 55 : Limnigramme observé à la station de Marles-les-Mines 83

Figure 56 : Hydrogramme observé à la station de Marles-les-Mines 83

Figure 57 : Comparaison des hydrogrammes observés et simulés à la station de Marles 84

Figure 58 : Comparaison des limnigrammes observés et simulés à la station de Marles 85

Figure 59 : Courbe de tarage 85

Figure 60 : Emprise et maillage du modèle de la Clarence aval et de la Nave 86

Figure 61 : Cotes aux thalimèdes (mai 2016) 89

Figure 62 : cotes mesurées et simulées aux Thalimèdes 90

Figure 63 : différence topographie/observations au droit de Nav4 91

Figure 64 : Fossé de prise – Zec de Bourecq 96

Figure 65 : Cotes aux thalimèdes (mai 2016) 97

Figure 66 : Cotes aux thalimèdes (mai 2016) 101

Figure 67 : Cotes aux thalimèdes (décembre 2012) 104

Figure 68 : Cotes aux thalimèdes (mai 2016) 106

Figure 69 : Rive gauche immédiatement en amont du pont – situation actuelle 112

Figure 70 : Longueur de déversement lors de l'épisode de décembre 1999 113

Figure 71 : photographie du niveau atteint au pont de Marles en 1999 114

Figure 72: Hauteurs de surverse critiques 129

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : travaux réalisés à Marles et Gonnehem suite à la crue de 1999 34

Tableau 2 : Taille des mailles dans le modèle 55

Tableau 3 : Années non retenues dans l'ajustement n°2 141

Tableau 4 : Ajustement de Gumbel sur VC3 142

1 INTRODUCTION

Le présent livrable s'inscrit dans la phase 3 de l'élaboration du PPRI de la Clarence « détermination de l'aléa de référence » et fait suite au livrable 5 précisant la méthode.

Le PPRI de la Vallée de la Clarence est multirisque, c'est-à-dire qu'il convient d'étudier séparément les aléas débordement de cours d'eau, remontées de nappe, ruissellement afin de définir l'enveloppe maximale sur le territoire. Le présent rapport traitera de l'alea débordement et de l'alea ruissellement.

La première partie du rapport (chapitre 2) sera consacrée à une approche des évènements hydrologiques réels observés et la caractérisation des pluies et débits de chacun d'entre eux. Ceci permettra de valider le modèle hydrologique qui servira dans la seconde partie puisqu'il fournira les entrées de débits intermédiaires pour la simulation de la propagation hydraulique des débits.

Un descriptif du fonctionnement hydraulique du système est proposé au chapitre 3. Il introduit le chapitre 4 qui traite de l'alea débordement. Un modèle hydraulique est bâti afin de simuler la propagation de l'évènement de référence et ses conséquences sur les terrains avoisinant les cours d'eau. Un modèle hydraulique peut représenter convenablement une situation si les étapes de calage et validation démontrent sa capacité à reproduire les hauteurs d'eau et zones inondées d'évènements passés. Ces évènements doivent être bien documentés pour que l'exercice soit probant. Les évènements de mai 2016 et de décembre 2012 sont de ce fait retenus.

L'évènement de 1999, bien que plus fort que les deux précédents n'est connu que très partiellement : absence de suivi des niveaux d'eau, absence de station hydrométrique en amont du bassin (station de Marles actuellement en activité), les données non concordantes concernant les limites de zones inondées, les incertitudes liées à la création de brèches.

Une fois le modèle calé et validé et les transferts entre bassins compris et estimés, il est nécessaire de faire des hypothèses sur les conséquences en cas de crue centennale sur les ouvrages existants. Par le passé, des digues ont cédé. Ces ruptures ont des conséquences sur les niveaux d'eau atteints à proximité mais aussi sur les niveaux atteints à l'aval. Une rupture d'ouvrage réduit le transfert des débits vers l'aval. Un sous chapitre identifiera les secteurs pour lesquels une rupture de digue est possible et caractérisera les brèches probables. La dernière partie du chapitre 4 caractérisera les évènements de référence du Plan de Prévention des Risques. Plusieurs méthodes permettront de consolider dans une première approche les évènements retenus.

Les résultats issus de ce travail sont présentés dans un second rapport.

.

2 SIMULATION HYDROLOGIQUE DES EVENEMENTS REELS

2.1 Rappel du modèle hydrologique utilisé

Au vu de l'importance du niveau de saturation du sol mis en évidence par l'analyse des évènements historiques, la conception d'un modèle à réservoir est justifiée.

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

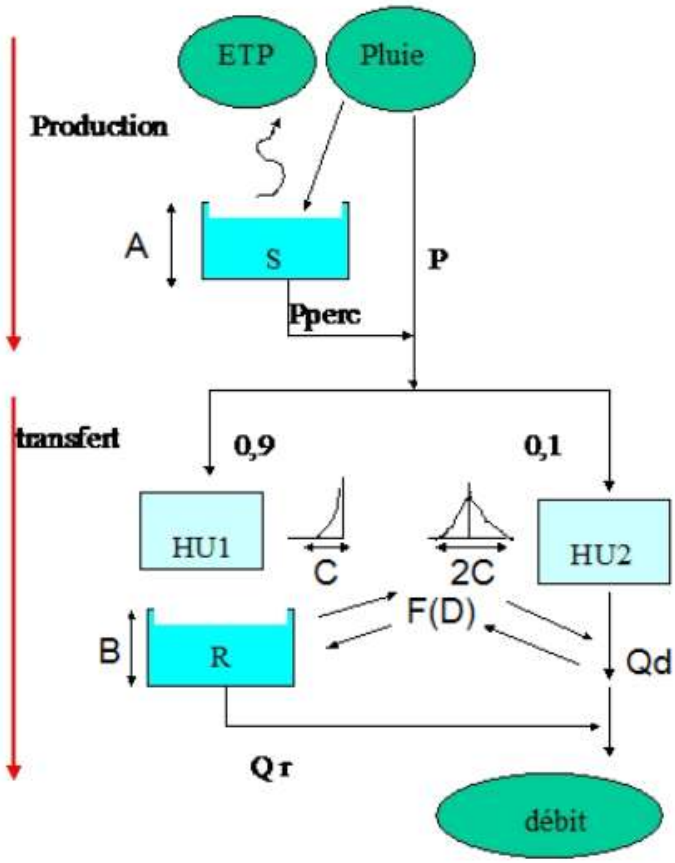


Figure 1 : Schéma de principe du modèle GR4J

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

- Une première partie souvent appelée "production", qui consiste à déterminer la répartition de la pluie "brute" observée en pluie "nette" (la proportion de la pluie

brute qui participe au débit du bassin versant étudié), en quantité d'eau évapotranspirée et en quantité d'eau stockée par le bassin versant.

- Une deuxième partie souvent appelée le "transfert" ou "le routage", qui consiste à répartir dans le temps la quantité d'eau participant au débit du bassin versant étudié.

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

Le modèle GR4J a quatre paramètres à optimiser en calage :

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

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

C : temps de base de l'hydrogramme unitaire ;

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

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

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

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

Le modèle GR4 présente les avantages suivants :

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

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

2.2 Découpage du bassin versant

Le bassin versant a été découpé en sous bassins homogènes. Le découpage prend en compte le caractère très artificiel du système par exemple la déconnexion de la Clarence avec le lit majeur gauche à partir de Chocques :

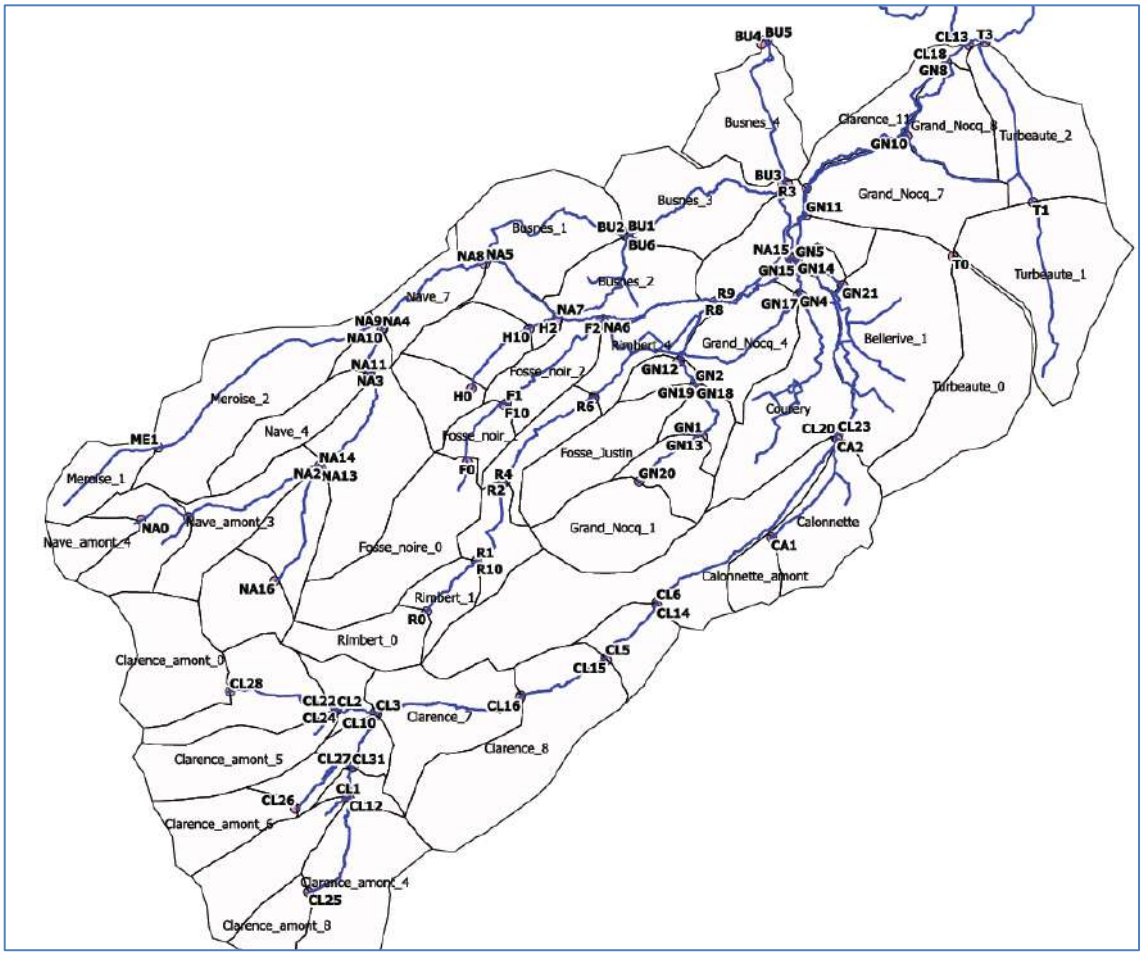


Figure 2 : découpage du bassin versant

2.3 Crues réelles de référence

Aux chapitres suivants, ne seront présentées que les crues réelles que nous jugeons de référence. Le lecteur se reportera au livrable 2 pour une analyse hydrologique plus complète.

Les crues de références sont celles qui sont documentées ou/et d'importance à l'échelle des 20 dernières années :

- L'évènement de mai 2016 est le plus récent,
- La crue de décembre 2012 est assez bien documentée et des enquêtes en communes permettent des renseignements complémentaires d'ordre qualitatif ;

elle est peu débordante ce qui réduit les incertitudes liées aux transferts et ruptures de digue,

- La crue de mai 2005 a fait l'objet d'un suivi sur la Nave dans la traversée de Lillers,
- La crue de 1999 bien que peu documentée est la crue la plus forte des 40 dernières années.

Les crues de 2012 et 1999 sont hivernales tandis que 2005 et 2016 sont estivales.

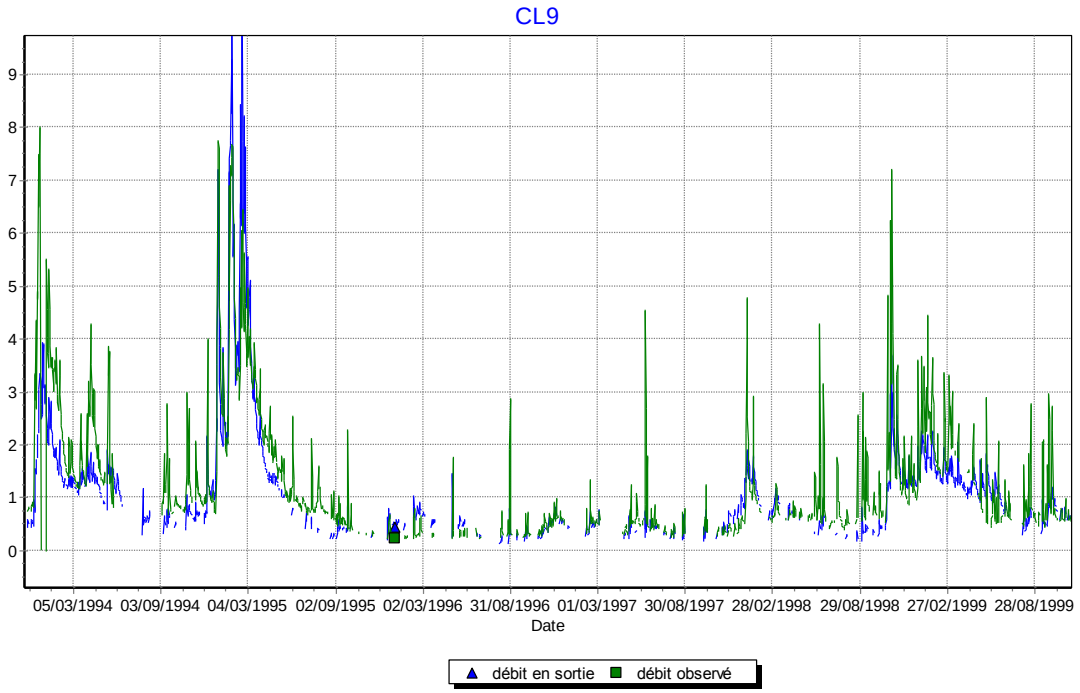
2.4 Simulation au pas de temps journalier des Crues hivernales

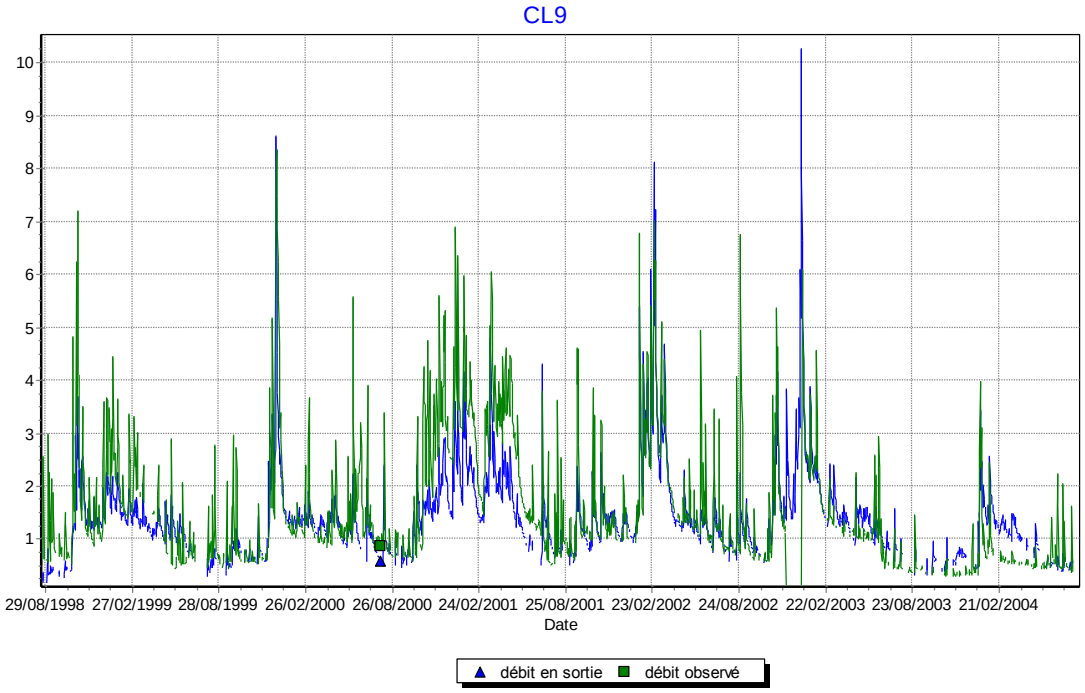
2.4.1 Préambule

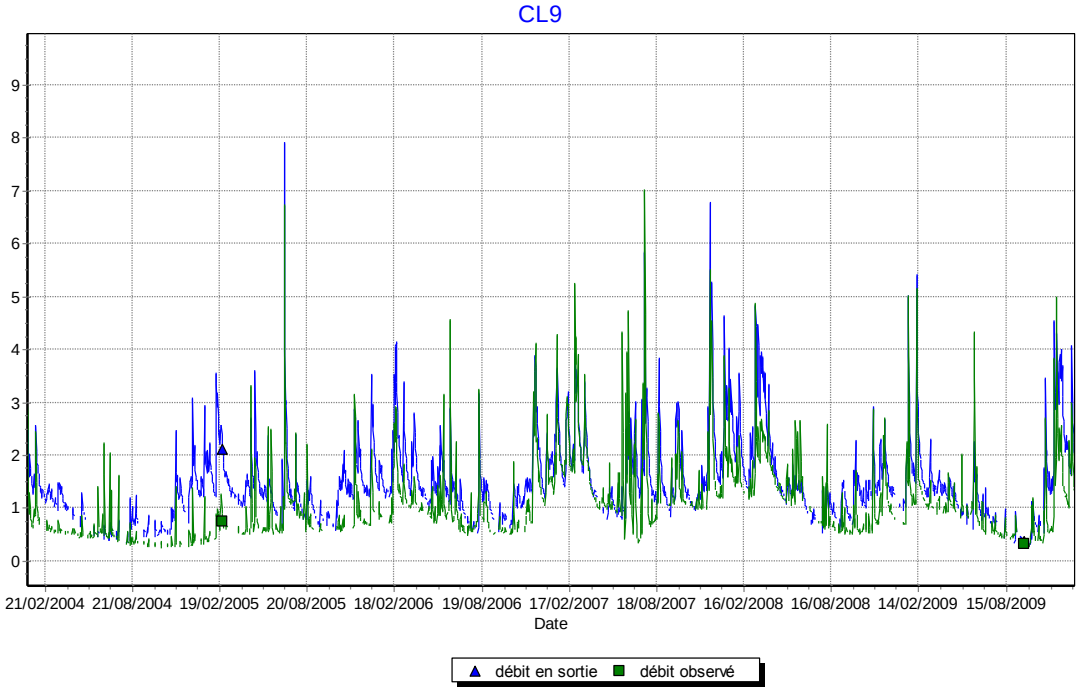
Les entrées du modèle sont l'ETP et la pluie. La pluie est une pluie de bassin global. Le modèle comprend deux sous bassins afin de vérifier le calage au droit des deux stations hydrométriques.

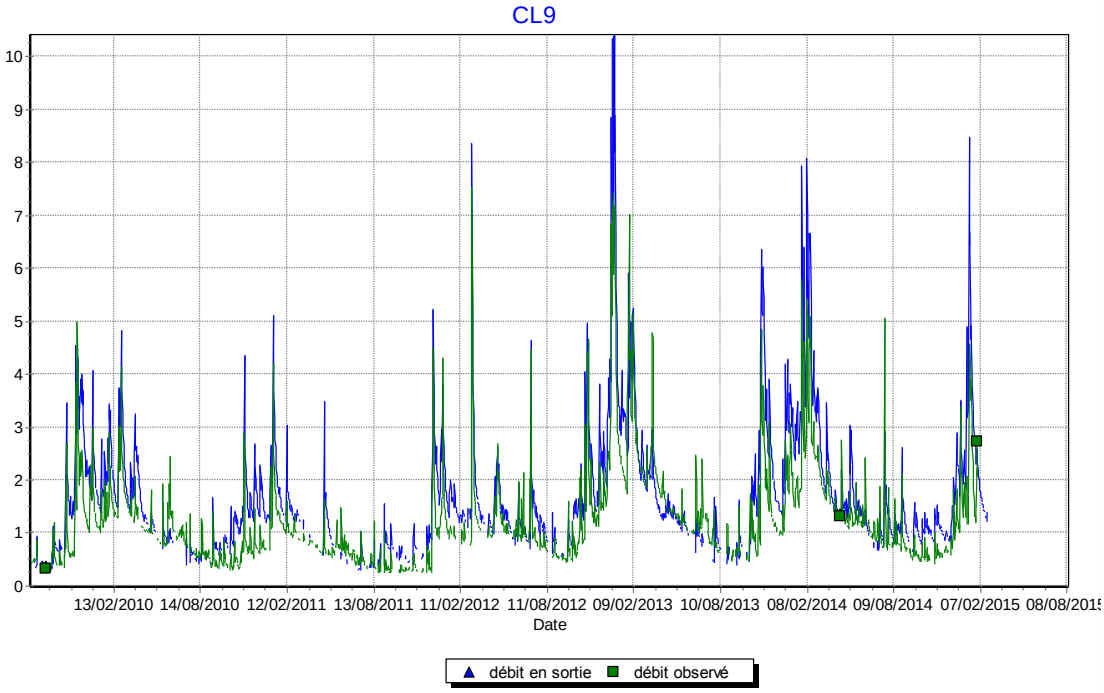
Le modèle est calé sur l'ensemble de la chronique de débits. Globalement, il donne satisfaction. Dans un second temps, chaque pluie de bassin correspondant aux crues est estimée à partir des pluies à Fiefs et à Lillers ainsi qu'à partir des images radar. De manière générale, la pluie à Fiefs est supérieure à celle enregistrée à Lillers.

Dans la suite les notations « CL9 » et « CL5 » sur les graphes de sortie de GESRES feront référence aux stations de Robecq et de Marles respectivement.




CL9
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
29/08/1998 27/02/1999 28/08/1999 26/02/2000 26/08/2000 24/02/2001 25/08/2001 23/02/2002 24/08/2002 22/02/2003 23/08/2003 21/02/2004
Date
débit en sortie
débit observé


CL9
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
21/02/2004 21/08/2004 19/02/2005 20/08/2005 18/02/2006 19/08/2006 17/02/2007 18/08/2007 16/02/2008 16/08/2008 14/02/2009 15/08/2009
Date
débit en sortie
débit observé


CL9
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
13/02/2010
14/08/2010
12/02/2011
13/08/2011
11/02/2012
11/08/2012
09/02/2013
10/08/2013
08/02/2014
09/08/2014
07/02/2015
Date
débit en sortie
débit observé

2.4.2 22 au 31 décembre 2012

2.4.2.1 Contexte météorologique

On observe lors des mois d'octobre, novembre et décembre 2012 des précipitations supérieures à la moyenne mais non exceptionnelles. Ces précipitations sont reportées sur la figure suivante.

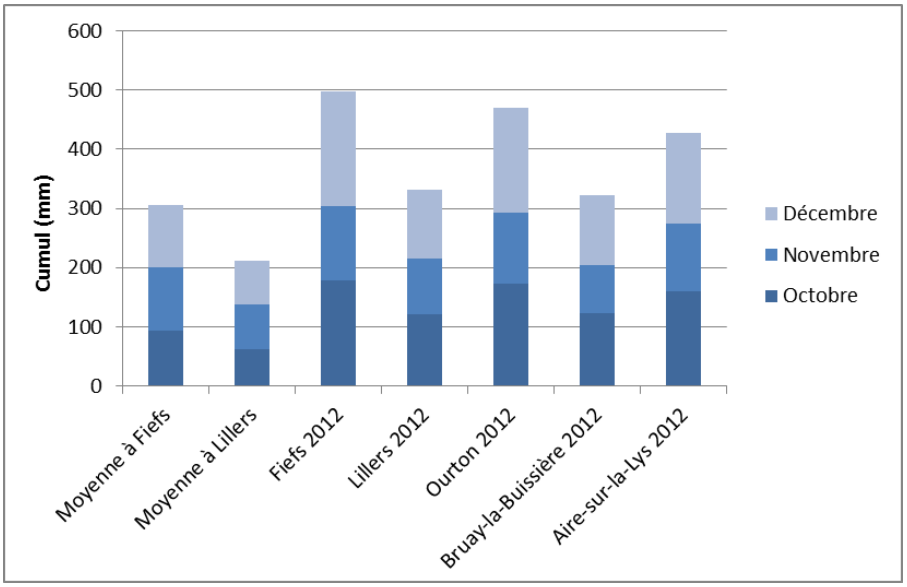


Figure 3 : Cumuls pluviométriques mensuels à Fiefs, Lillers, Ourton, Bruay-la-Buissière et Aire-sur-la-Lys aux mois d'octobre, novembre et décembre 2012

Il pleut de façon continue d'octobre à décembre, ce qui sature les sols.

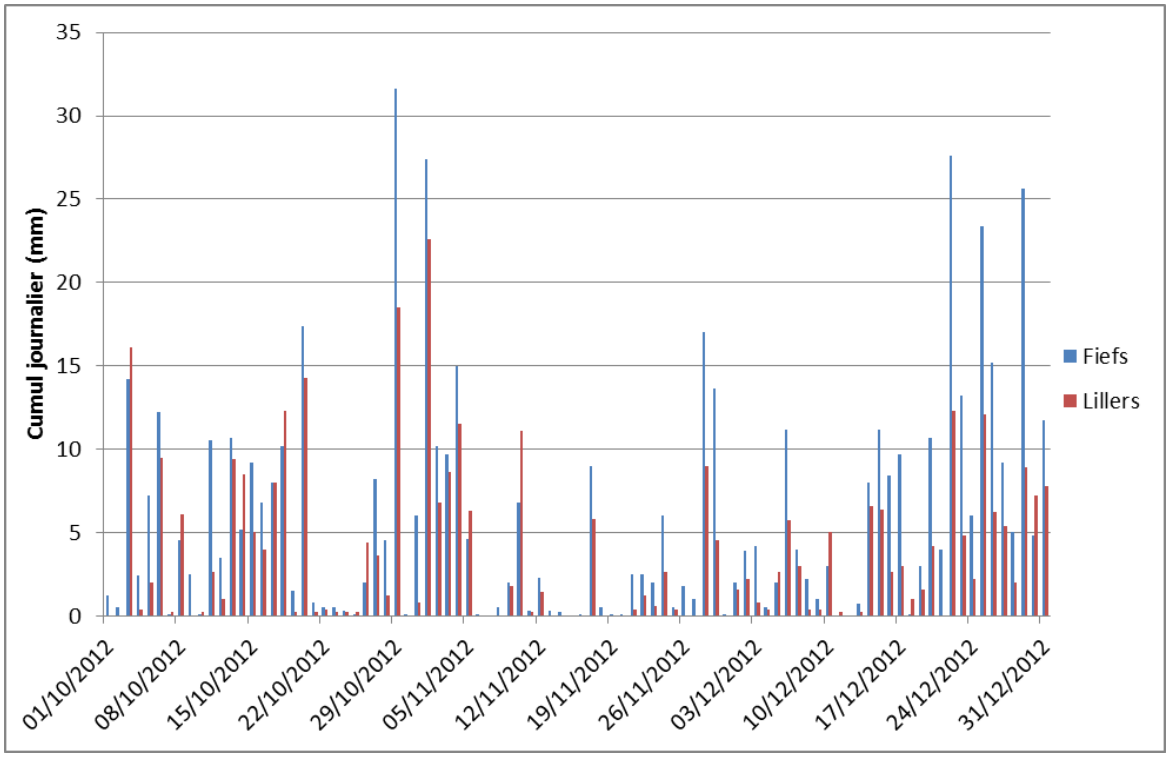


Figure 4 : Cumuls pluviométriques journaliers à Fiefs et Lillers d'octobre à décembre 2012

Les informations radar permettent de préciser la lame d'eau de bassin. On note en particulier une intensité de pluie supérieure le 23 décembre 2012, ce qui explique la première pointe de crue.

2.4.2.2 Hydrologie

Les hyétogrammes enregistrés à Ourton, Fiefs et Lillers au pas de temps journalier ainsi que les hydrogrammes de crues à Robecq et Marles-les-Mines sont représentés sur la figure suivante.

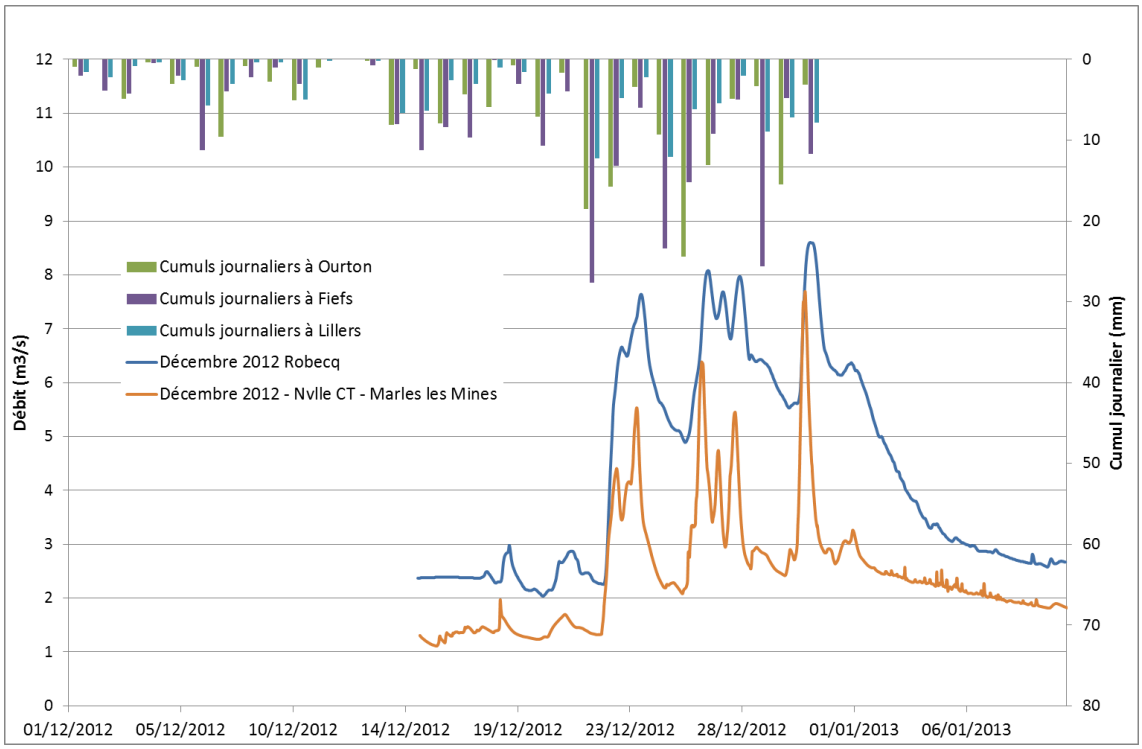


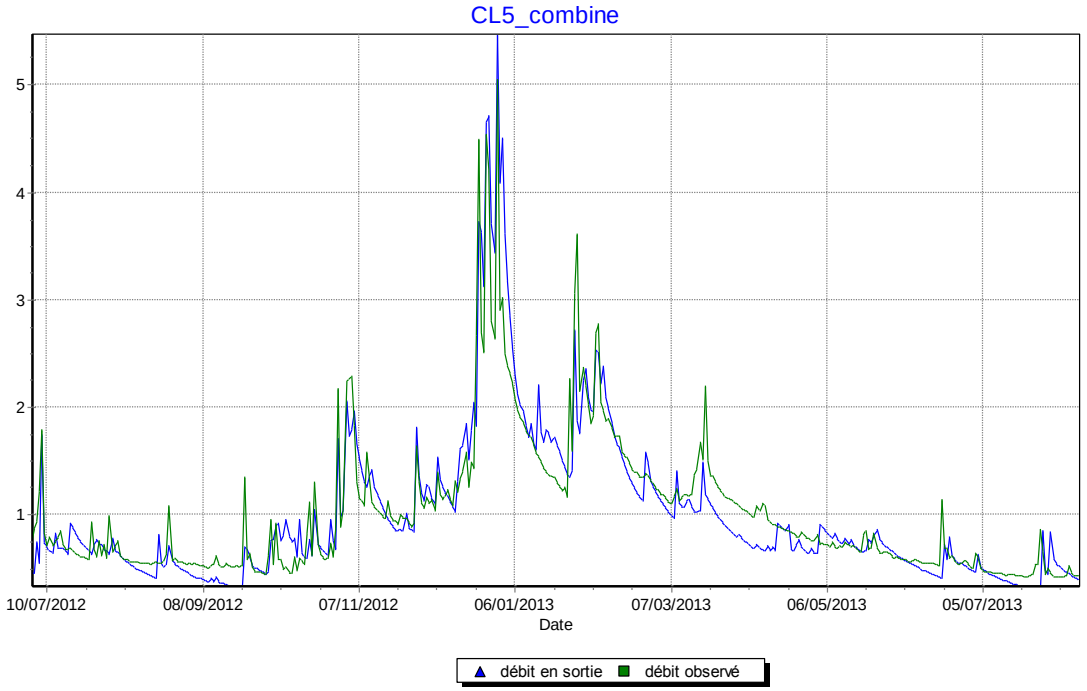
Figure 5 : Cumuls pluviométriques journaliers à Ourton, Fiefs et Lillers et hydrogrammes observés à Robecq et Marles-les-Mines (estimations faites à partir de la nouvelle courbe de tarage) lors de l'épisode du 22 au 31 décembre 2012

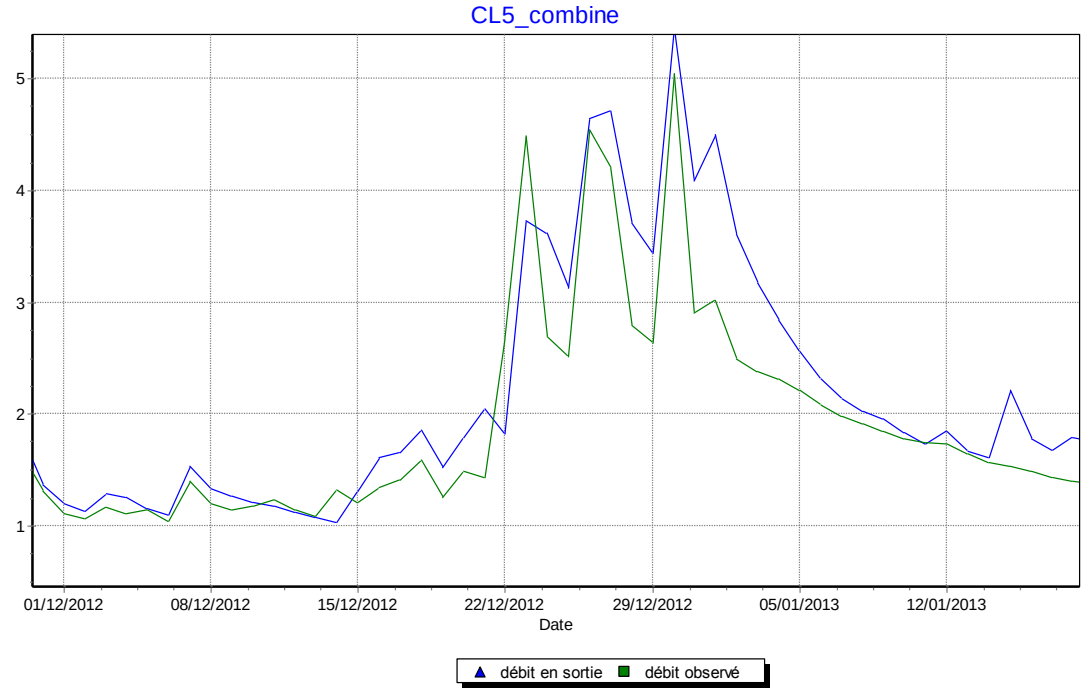
L'épisode de crue dure environ quatorze jours, du 22 décembre au 4 janvier.

En comparant les cumuls journaliers de pluie et les hydrogrammes de crue, on constate que, lors de cet évènement, la Clarence réagit en fonction de l'apport pluviométrique le jour même. En effet, fin décembre, le bassin versant a déjà été saturé lors des pluies précédentes et toute pluie supplémentaire engendre une réponse du cours d'eau en termes d'augmentation de débit. Ainsi, aux pics de précipitations des 22-23, des 25-26 et des 29-30 décembre correspondent des pics de crues à Robecq respectivement de 7,6 m^3/s, 8 m^3/s et 8,6 m^3/s.

2.4.2.3 Résultats du modèle

Le graphe ci après présente l'hydrogramme à Marles issu de la pluie radar :





Les pointes sont bien reproduites. La décrue enregistrée pour chacun des pics est plus nette.

2.4.3 25 au 29 décembre 1999

2.4.3.1 Contexte météorologique

Le mois de novembre 1999 est un mois plutôt sec mais le mois de décembre enregistre des forts cumuls de précipitation, plus du double de la moyenne calculée sur environ 50 ans de données à la fois à Fiefs et à Lillers.

A Fiefs, il tombe 239 mm au total lors du mois de décembre 1999 alors que la moyenne des précipitations cumulées pendant ce mois est de 106,2 mm. A Lillers, plus en aval, il tombe 160,6 mm alors que la moyenne vaut 73,7 mm.

La figure suivante présente les cumuls mensuels.

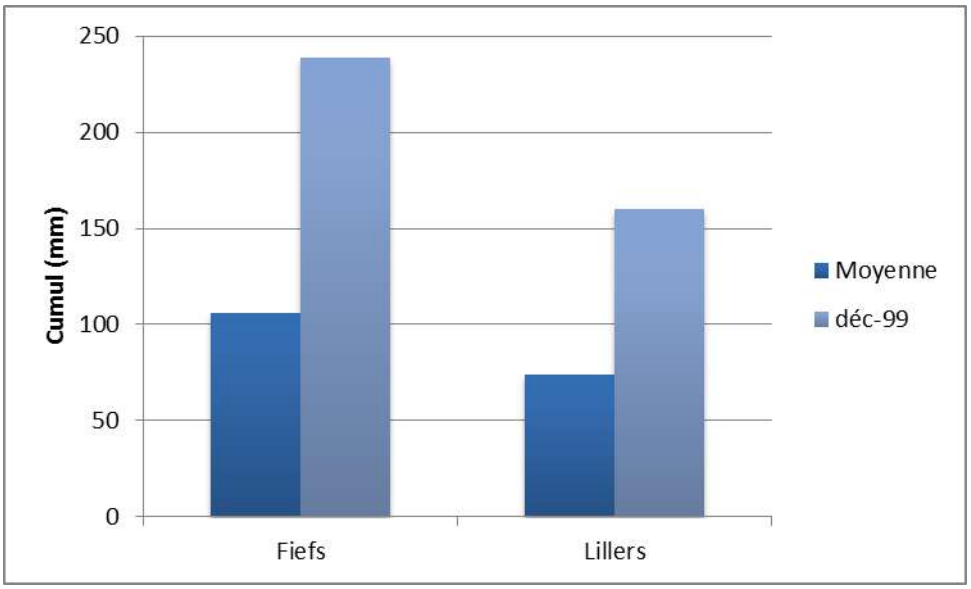


Figure 6 : Cumuls pluviométriques mensuels à Fiefs et Lillers en décembre 1999

Le mois de décembre est effectivement très arrosé, comme le montre la figure ci-dessous. Du 6 au 19 décembre, il pleut 132,1 mm à Fiefs et 66,5 mm à Aire-sur-la-Lys.

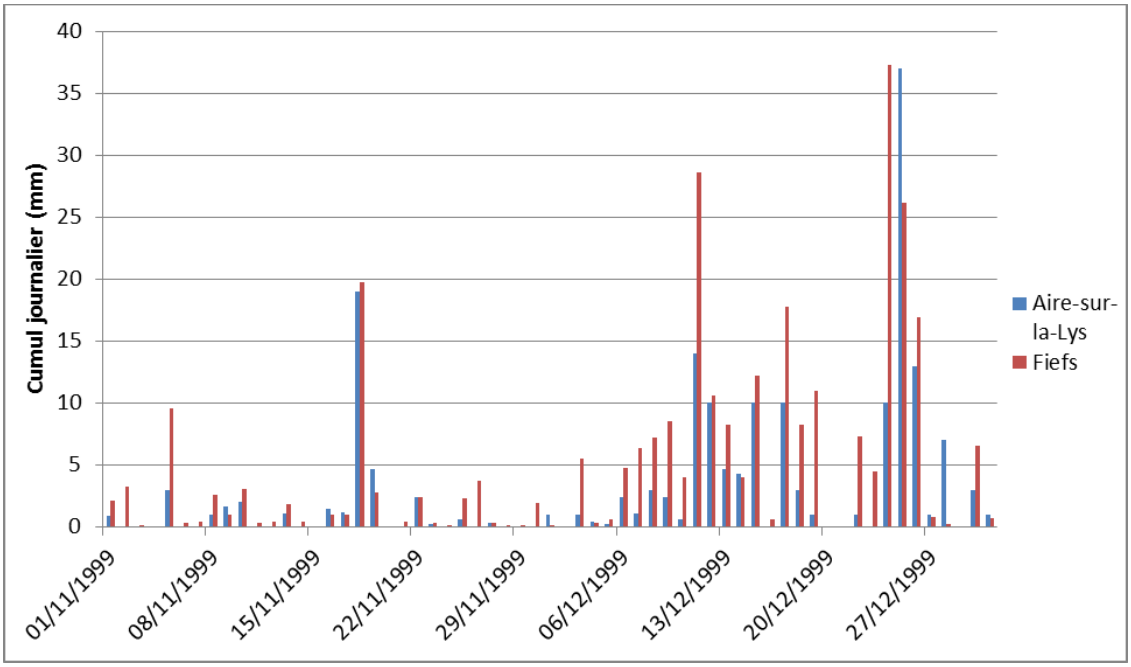


Figure 7 : Cumuls pluviométriques journaliers à Aire-sur-la-Lys et Fiefs aux mois de novembre et décembre 2012

Après une accalmie de quelques jours, de gros volumes de pluie s'abattent sur la région.

Les 24, 25 et 26 décembre il tombe en 72 heures :

- 80,6 mm à Fiefs,
- 60 mm à Aire-sur-la-Lys,
- 58,4 mm à Lillers.

Les images radar montrent que la station de Fiefs est davantage représentative de la pluie de bassin que celle de Lillers. Nous imposerons en entrée du modèle les pluies à Fiefs.

2.4.3.2 Hydrologie

L'hydrogramme observé à Robecq lors de l'épisode de décembre 1999 est représenté sur la figure suivante.

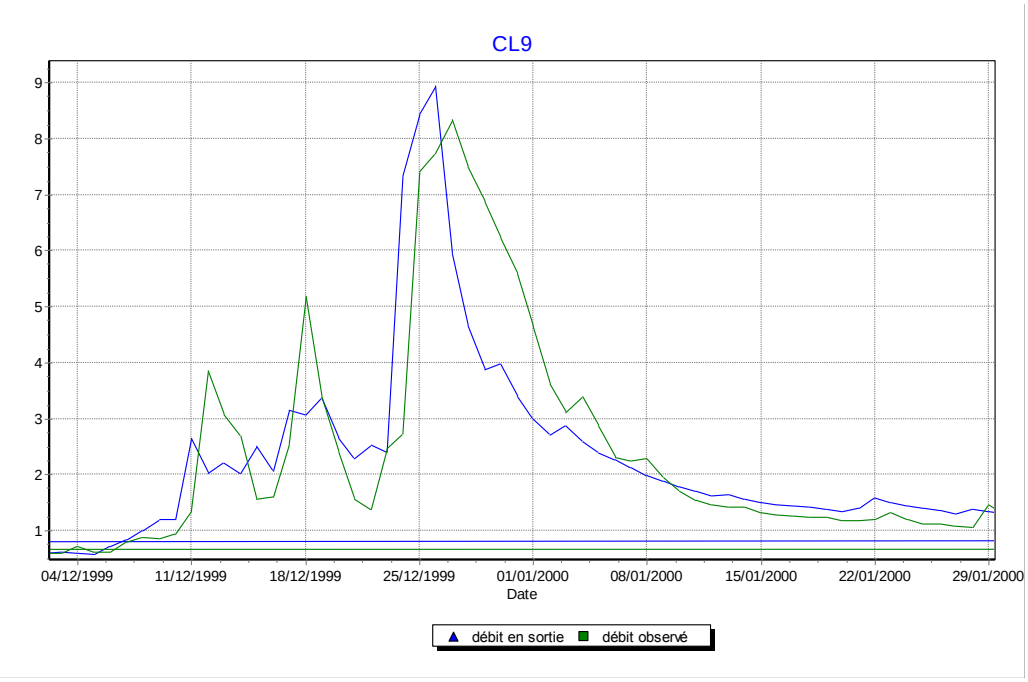
Figure 8 : Hydrogramme observé à Robecq lors de l'épisode du 25 au 29 décembre 1999

Le temps de montée de la crue est de plus de 4,5 jours et la durée de la décrue est d'environ 7,5 jours. Le débit de pointe mesuré à Robecq vaut 8,46 m^3/s.

L'hydrogramme dépasse 7 m^3/s pendant 4 jours, du 25 au 29 décembre. On constate une forme de décrue inhabituelle qu'on rencontrera sur d'autres crues : une forme bombée alors que les pluies ont cessé. Cela suggère un délestage du Grand Nocq vers la Clarence à la décrue. On rencontrera ces cas de figure sur d'autres crues (les plus importantes).

2.4.3.3 Résultats du modèle

Le graphe ci après présente l'hydrogramme à Robecq issu de la pluie à Fiefs (le décalage est lié au pas de temps choisi):



Le débit de pointe est bien représenté mais la forme de la décrue n'est pas reproduite (pas de prise en compte de la décharge du Grand Nocq dans la Clarence à la décrue). La forme simulée est tout à fait standard (vidange exponentielle).

2.5 Simulation au pas de temps horaire

2.5.1 Préambule

Nous considérons deux pluies de bassin, l'une s'appliquant sur les sous bassins en amont de Marles et l'autre sur les sous bassins aval. Nous pourrions discrétiser davantage mais cela ajouterait de la complexité et n'amènerait aucune plus value pour l'objectif recherché d'estimation de l'évènement de référence pour le PPRi.

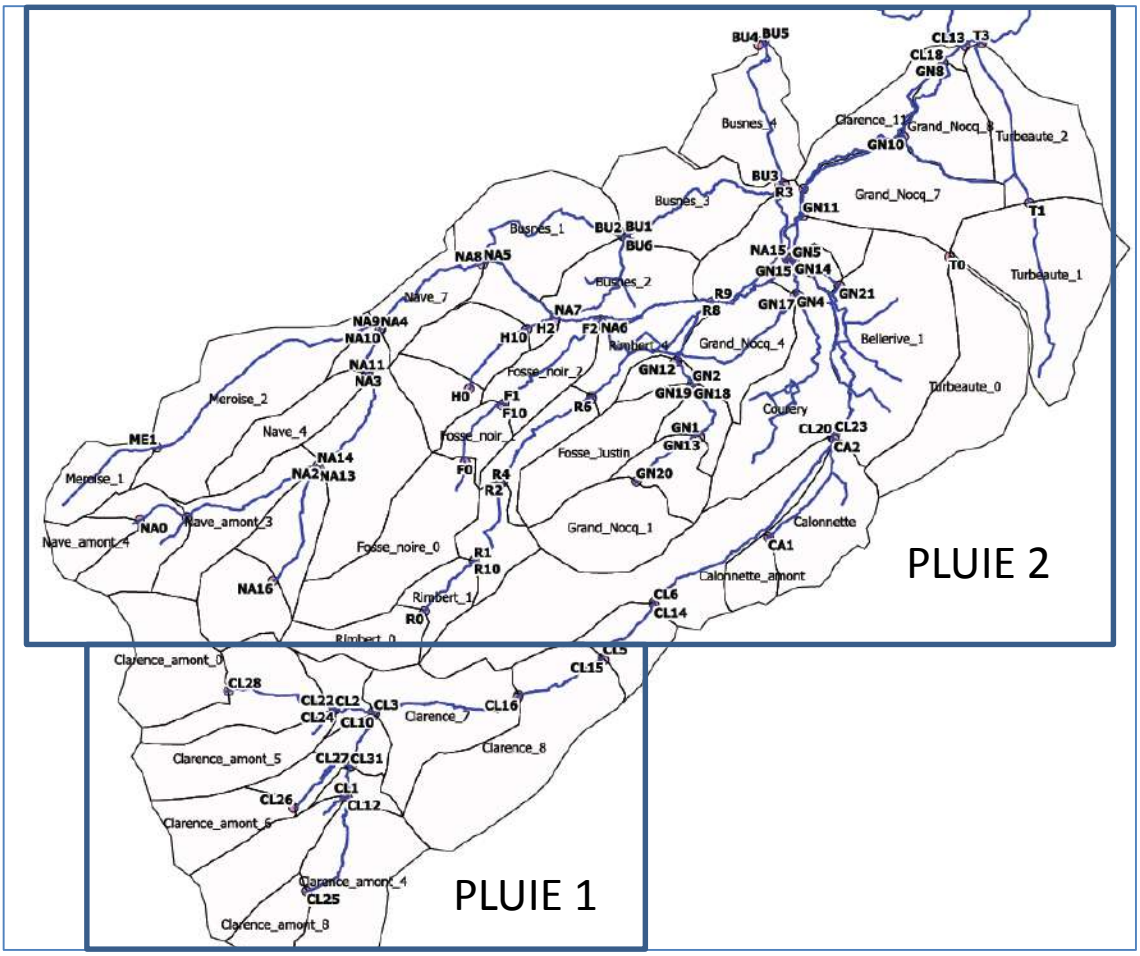


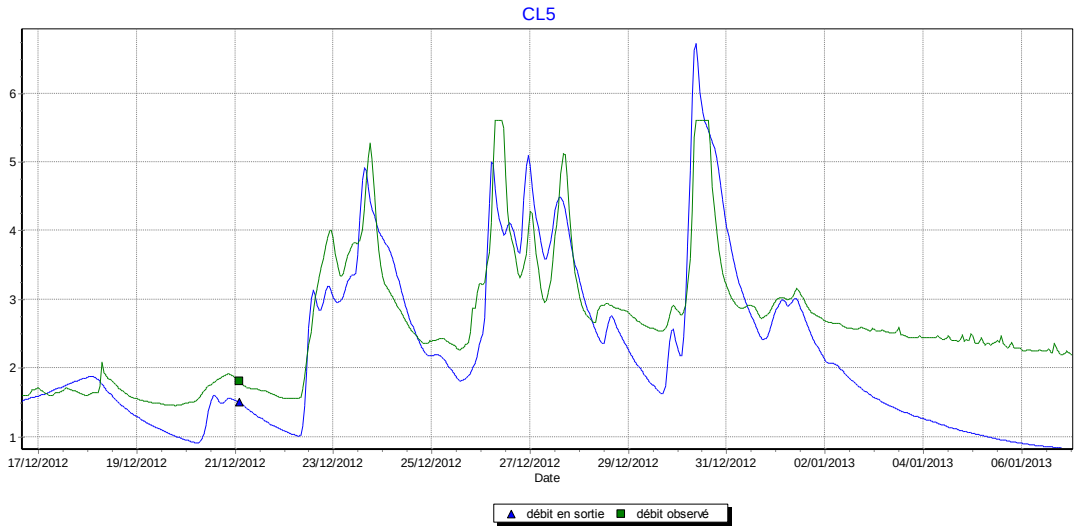
Figure 9 : pluies de bassin

Le paramètre A n'est pas modifié (production). Pour retrouver les formes des hydrogrammes, le paramètre B est modifié (B passant de 100 à 60 ou de 60 à 30).

2.5.2 Evènement de décembre 2012

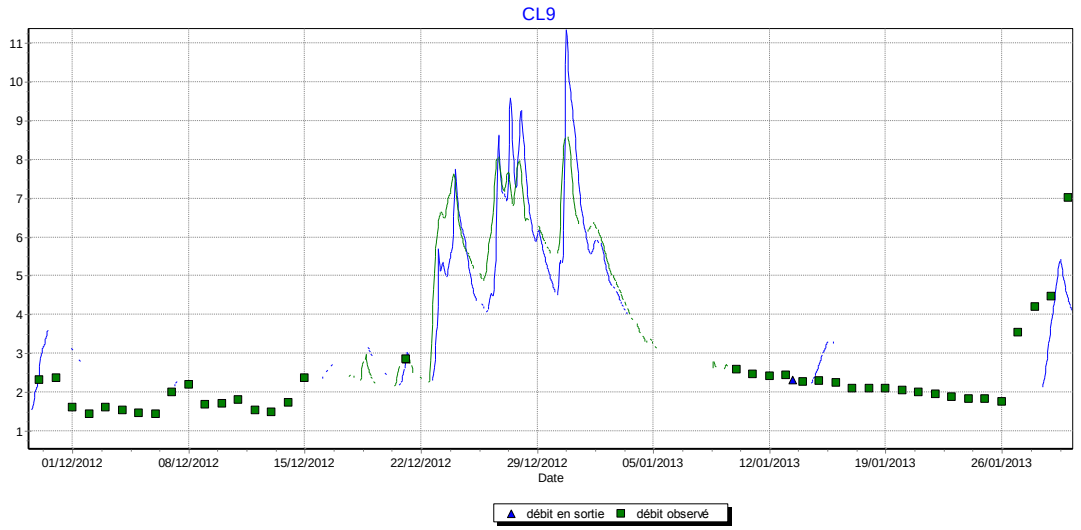
A partir des données radar, nous construisons deux pluies de bassin horaire. Nous appliquons ces deux pluies de bassins.

Le résultat sur Marles est fourni ci-après :



Nous retrouvons les ordres de grandeur des débits déduits de la courbe de tarage ainsi que les volumes ruisselés.

A Robecq, le modèle donne des débits maxima supérieurs à ceux issus de la courbe de tarage. Le débit maximal simulé est de 10,5 m3/s davantage en adéquation avec les coefficients de forme usuels en hiver (1.2 à 1.4 pour les débits moyens inférieurs à 6 m3/s) et avec les hydrogrammes observés à Marles. Cependant, pour les débits supérieurs à 6 m3/s, des transferts de la Nave vers la Busnes existent et l'expansion des eaux sur la plaine à l'aval de Chocques est conséquente ce qui explique le plafonnement des débits à Robecq et la réduction du coefficient de forme plus le débit augmente.



2.5.3 3 au 5 juillet 2005

2.5.3.1 Contexte météorologique

Sur le bassin versant de la Clarence, la station Météo-France de Lillers a enregistré les cumuls horaires suivants.

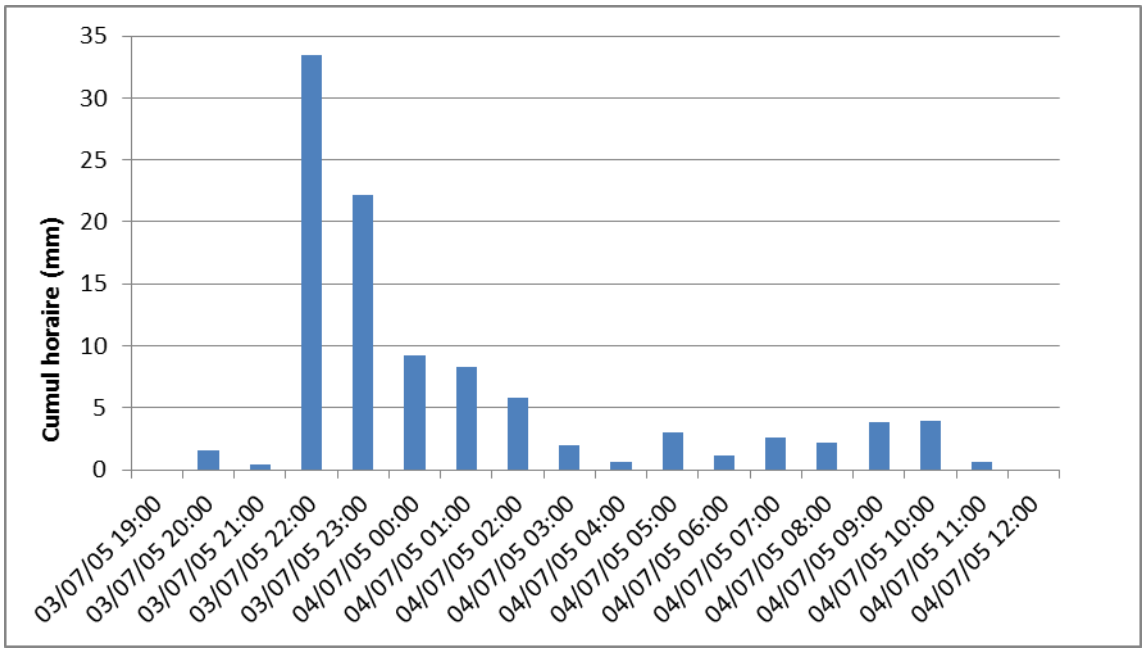


Figure 10 : Cumuls pluviométriques horaires à Lillers lors de la nuit du 3 au 4 juillet 2005

Il tombe au total 100,9 mm à Lillers en 16 heures, dont 79 mm entre le 3 juillet à 21h et le 4 juillet à 2h.

La hauteur de précipitations relevée à Fiefs le 3 juillet est de 123 mm.

D'après les images radar, un coefficient d'abattement de 0.85 est à appliquer aux enregistrements à Lillers. Le sud du bassin versant a été moins touché (70% environ de la lame d'eau ayant affecté la partie aval). Le graphe ci-après présente l'hydrogramme horaire à Robecq. On constate une bonne représentation (le décalage est lié à la moyenne journalière réalisée pour la partie observée).

2.5.3.2 Hydrologie

L'hydrogramme mesuré à Robecq est présenté ci-dessous.

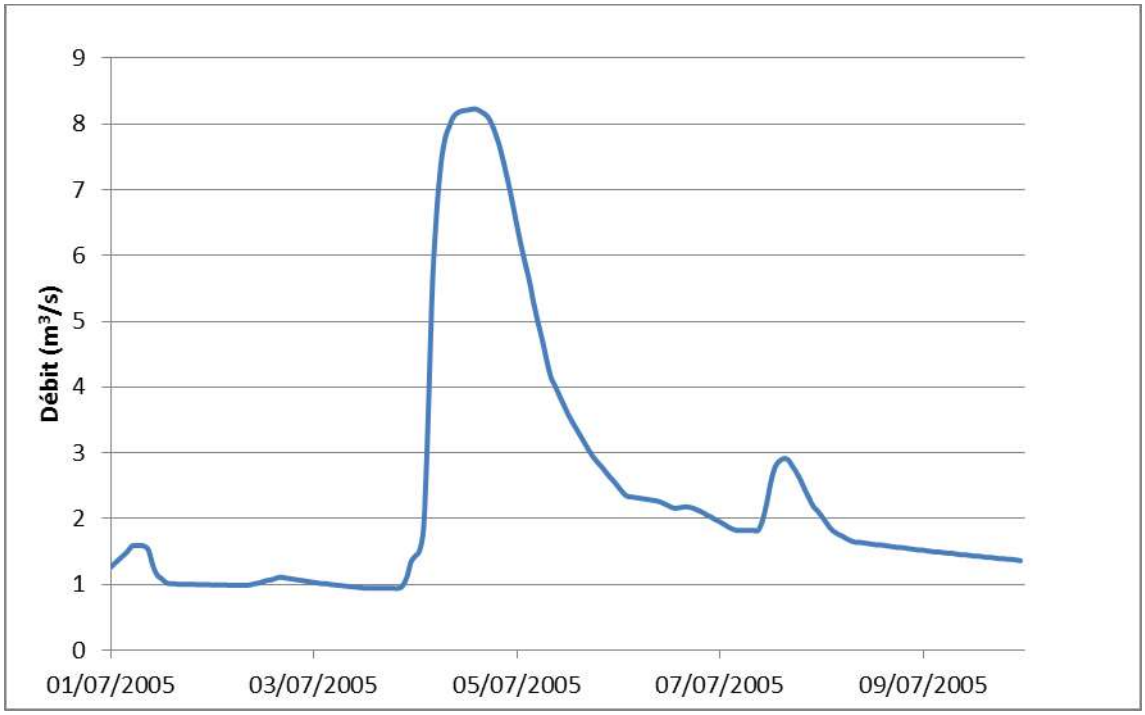


Figure 11 : Hydrogramme observé à Robecq lors de l'épisode du 3 au 5 juillet 2005

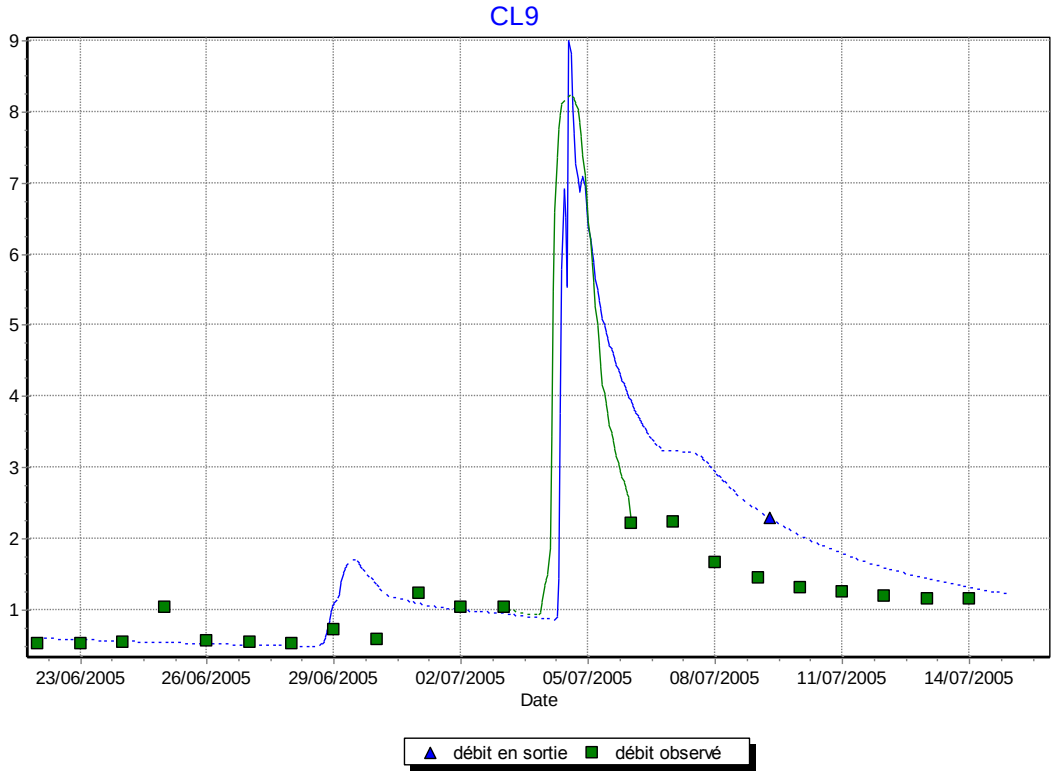
La crue dure environ 50 heures.

Le temps de montée de l'hydrogramme est de 17 heures, et son temps de décrue de 33 heures. Le temps de réponse est d'environ 17 heures également.

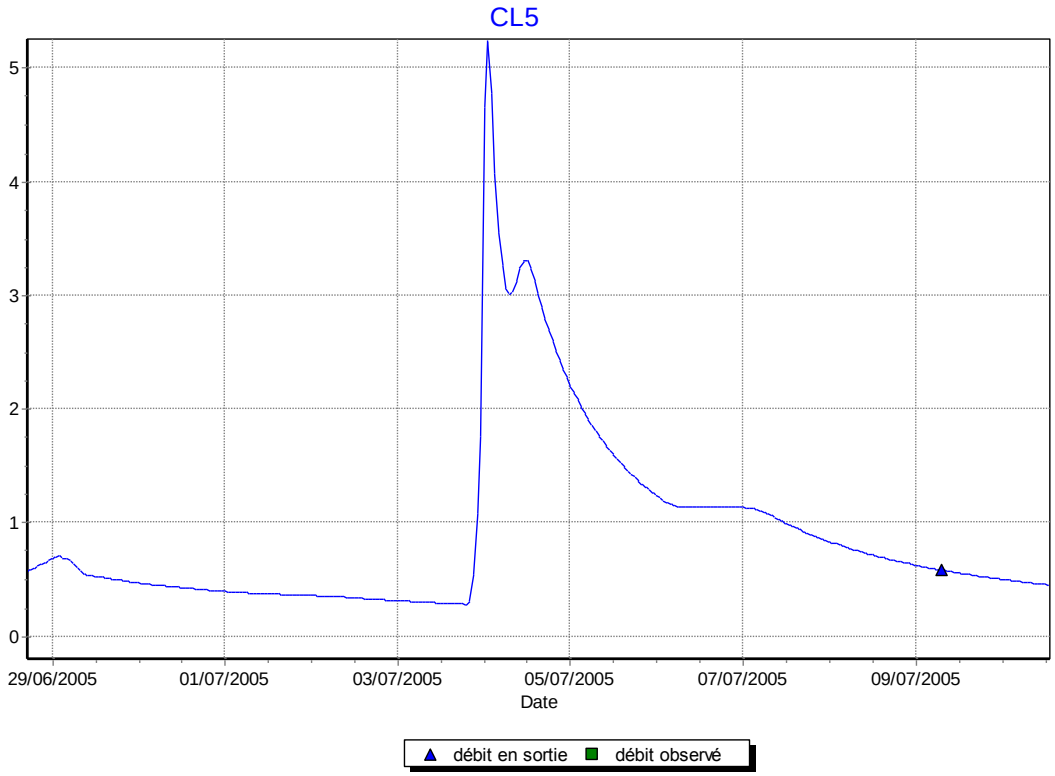
Le débit de pointe est de 8,23 m^3/s.

2.5.3.3 Résultats du modèle au pas de temps horaire

Le graphe ci-après présente l'hydrogramme horaire à Robecq. On constate une représentation satisfaisante.



Pour information, le graphe ci-après présente l'hydrogramme à Marles :

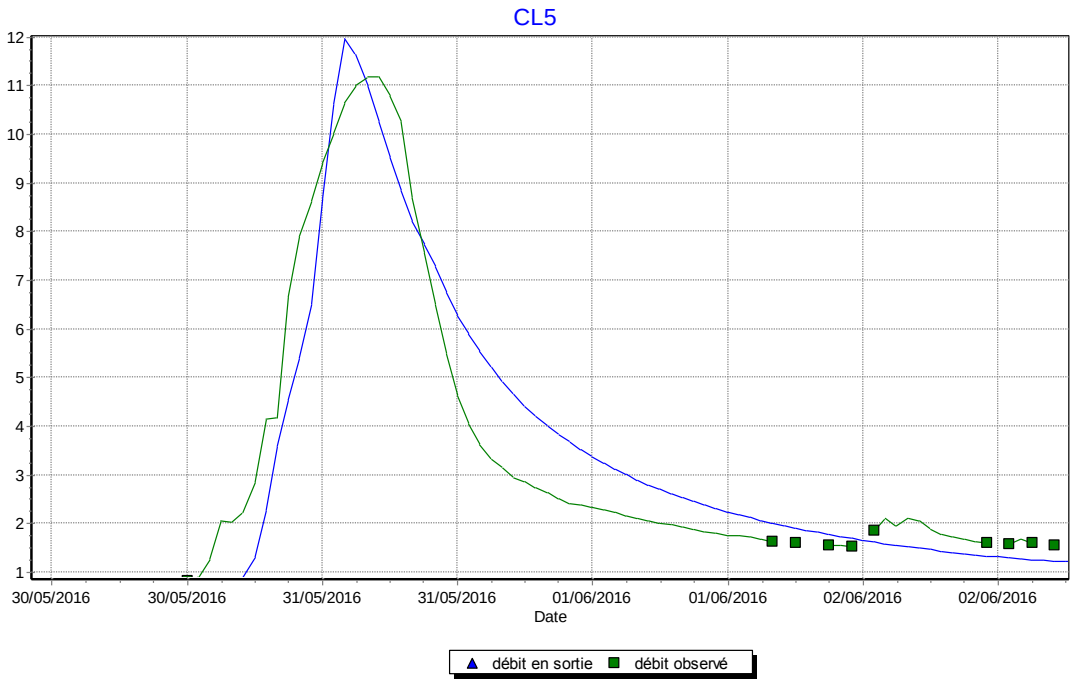


Notons que pour cette crue, le transfert à Chocques des débits de la Clarence vers le Grand Nocq a été bloqué ce qui pourrait expliquer une plus faible déformation de l'hydrogramme à Robecq.

2.5.4 Evènement de mai-juin 2016

La pluviométrie est tirée des images radar. Comme pour décembre 2012, deux pluies de bassin sont appliquées.

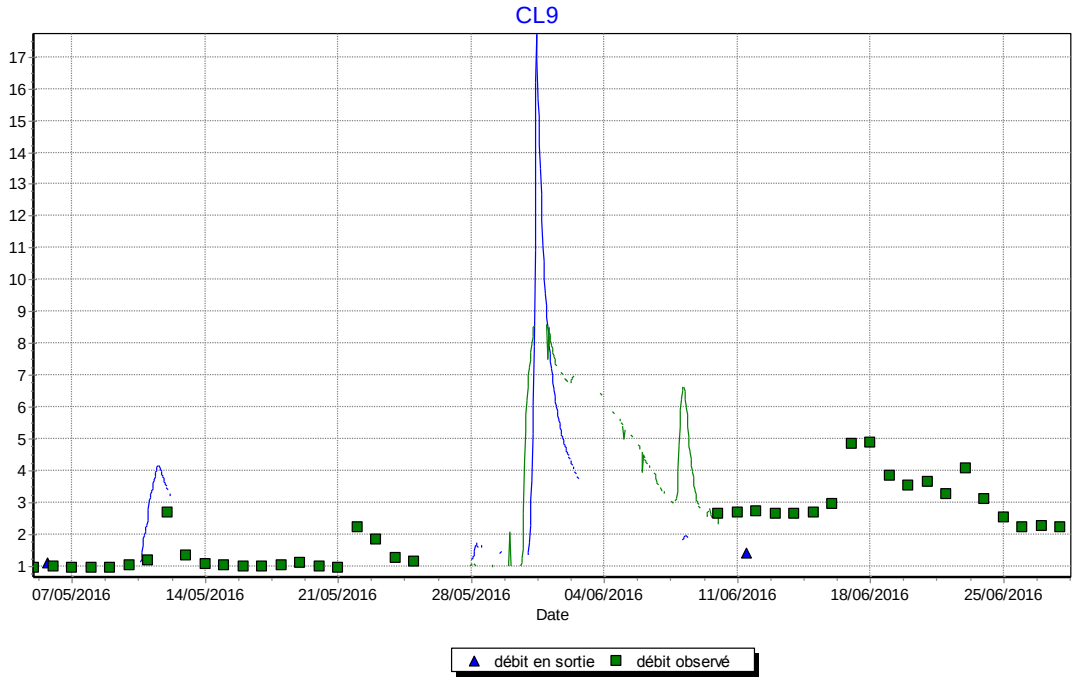
Le graphe ci-après présente le résultat à Marles :



La représentation est correcte.

La propagation vers l'aval de l'hydrogramme occasionne un débit maximum important à Robecq (17 m3/s). On met ici en évidence le fort laminage qui intervient sur la Nave en amont de la sortie de Lillers et de la Clarence aval (Chocques et Gonnehem) . Le volume compris entre 13 et 17 m3/s à Robecq est de 50 000 m3.

On remarque par ailleurs un délestage de 3 à 4 m3/s du Grand Nocq vers la Clarence.



2.6 Conclusion

Le modèle hydrologique donne des résultats satisfaisants que ce soit au pas de temps horaire ou journalier. D'une part concernant l'ensemble de la chronique, d'autre part pour les évènements de 2005, 2012, 2016 et 1999. Pour les débits de la Clarence supérieurs à 6 m3/s, le modèle ne prend en compte ni les transferts entre bassins ni les volumes stockés dans les vastes plaines d'inondation. Ceci explique les écarts importants au pas de temps horaire à Robecq alors qu'à Marles, les débits sont bien estimés.

Le modèle permet de rendre compte des apports intermédiaires. Les effets de stockage et les transferts seront par la suite simulés par le modèle de propagation hydraulique.

3 FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE DU SYSTEME

3.1 Préambule

Le système hydraulique est rendu complexe pour les raisons suivantes :

- Le réseau de drainage est artificiel et dans plusieurs cas perché par rapport au lit majeur ; un linéaire conséquent est ceinturé par des digues,
- Le lit majeur est large et constitue une zone de stockage capable d'écrêter la crue à Robecq,
- Par le passé, pour les crues significatives, les transferts d'eau ont été variables du fait de brèches intervenues dans les parties fragiles des digues (2002, 1999),
- Les transferts d'un cours d'eau à l'autre sont de manière générale relativement mal maîtrisés. Ces transferts peuvent s'établir par surverse au-dessus des digues sans rupture (cas de juillet 2005).

Il résulte de ce fonctionnement un laminage des débits vers l'aval. A la station de Robecq, les débits sont laminés à 8 ou 9 m3/s pour les grandes crues voire 10 m3/s en prenant en compte une incertitude sur la courbe de tarage. Si ce laminage est effectif pour toutes les crues connues depuis 1985, il est bien difficile de l'estimer a priori pour un évènement exceptionnel. En effet, les ruptures de digues ont un effet significatif sur le laminage. Lors de l'évènement de 1999, les ruptures à Lillers on eu pour conséquence une réduction des débits à Robecq.

Des ruptures ont eu lieu par le passé sur les digues. Il s'agit de ruptures « naturelles » ou bien provoquées. Des travaux ont dans bien des cas suivi ces ruptures : cas de Lillers, de Gonnehem. Les ouvrages sont en général de mauvaise facture : talus raides, galeries d'animaux fouisseurs, a priori matériaux hétérogènes. Les seuls points positifs sont : l'absence de végétation sur la digue, un bon enherbement et une crête large (au regard de la charge en eau temporaire en crue). Des signes de glissement côté rivière sont manifestes, des galeries profondes sont présentes, les talus ont des pentes variables. Aucun plan ni aucune information sur la nature des matériaux n'est disponible.

Des travaux ont eu lieu depuis 1999.

Communes	Cours d'eau	Date	Commentaire
Gonnehem	Nave	2002	Curage de la Nave
	GN et Clarence	2002	Création de la liaison GN - Clarence
	Clarence	2002	Renforcement des digues de la Clarence de Chocques à Gonnehem
	Clarence	2004	Renforcement des digues de la Clarence à Gonnehem
	Nave	2007	Renforcement des digues de la Nave
	Fossé justin	2013-2014	Création de la Zec des Bonniers
	Clarence	2013	Les 4 siphons de la Clarence sont nettoyés et refaits
	GN	1996	Les 2 siphons du GN sont nettoyés et refaits en 1996
Marles	Clarence	?	digue rehaussée de 1m en amont et aval du pont de la rue du Marais + Clarence curée

Tableau 1 : travaux réalisés à Marles et Gonnehem suite à la crue de 1999

D'un point de vue pratique, cela veut dire que les digues peuvent céder partout car le processus d'érosion interne est pernicieux : la migration des matériaux est lente mais au fur et à mesure des crues, le processus s'amplifie. La largeur de crête et l'enherbement sont des éléments favorables pour la résistance à la surverse. Globalement, une lame d'eau de 20 centimètres est sans doute nécessaire pour qu'il y ait rupture.

3.2 Ordre de grandeur des débits et des transferts

Le laminage des débits d'amont vers l'aval est variable en fonction des évènements du fait d'interventions humaines et de ruptures.

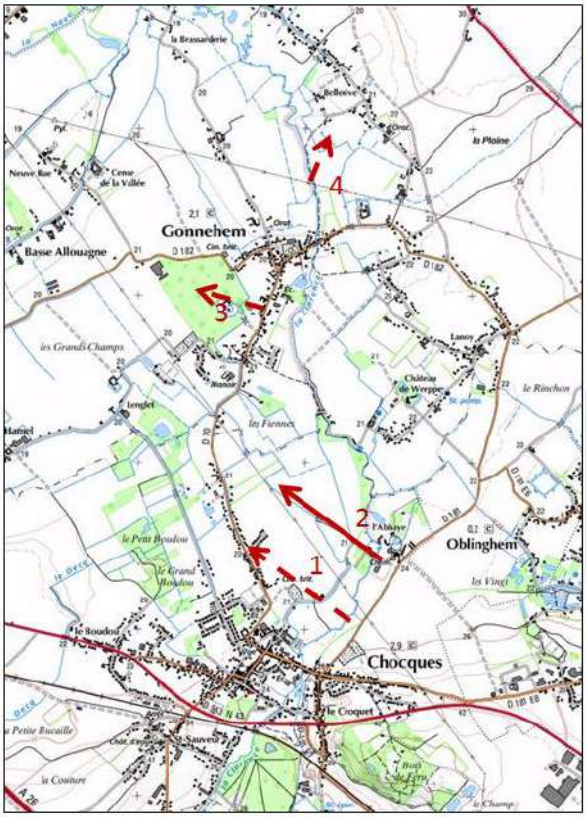
3.2.1 Sur la Clarence

A Chocques, un débit important peut passer au droit du pont de l'Abbaye dès 7 m3/s. Cependant, pour certains évènements, des interventions humaines empêchent ce passage. En amont de Chocques, des témoignages font ainsi état d'ouverture de digue volontaire lors de certains évènements.

Figure 12 : blocage des eaux en rive gauche au droit de la route du pont de l'Abbaye

Ce laminage sur la Clarence est du au passage à Chocques, à de possibles ruptures de digue et à un remplissage des plaines (vaste zone entre la Clarence et le ruisseau de Bellerive notamment). Le débit est ainsi écrêté à partir de 7 m3/s.

Le deuxième transfert en crue se situe à l'aval du pont de Robecq avec la présence d'une buse de diamètre 600 mm reliant Clarence et Grand Nocq.

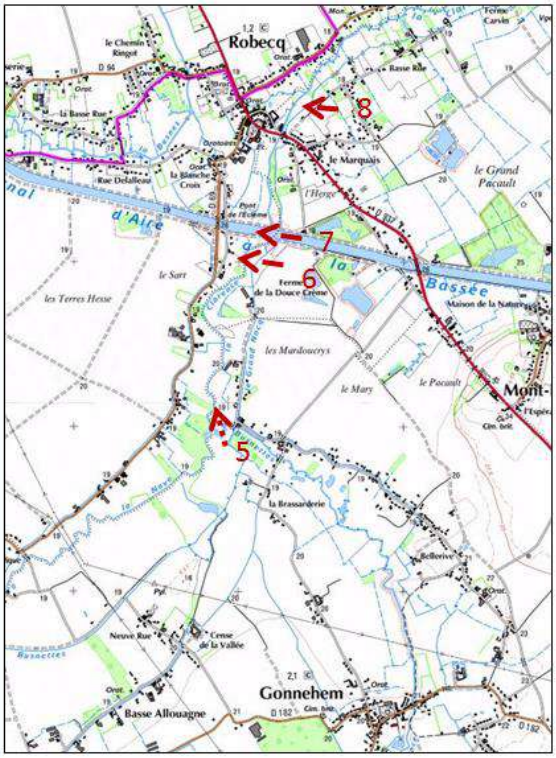


4 : Passage possible de la Clarence vers le ruisseau de Bellerive (expansion)

3 : Passage possible de la Clarence vers le Grand Nocq par rupture de digue

2 : Passage via pont de l'Abbaye vers Grand Nocq à partir de 7 m3/s – route 4-5 mètres de large

1 : Passage possible de la Clarence vers le Grand Nocq par rupture de digue



8 : Passage possible du Grand Nocq vers la Clarence ou l'inverse (buse diamètre 600 mm)

7 : pompage Grand Nocq vers canal d'Aire (deux pompes 0,5 m3/s)

6 : Passage en décrue du Grand Nocq vers la Clarence (fossé et conduite vannée 800 mm)

5 : Passage en décrue du Grand Nocq vers Clarence (cadre vanné 2m²)

3.2.2 Sur la Nave

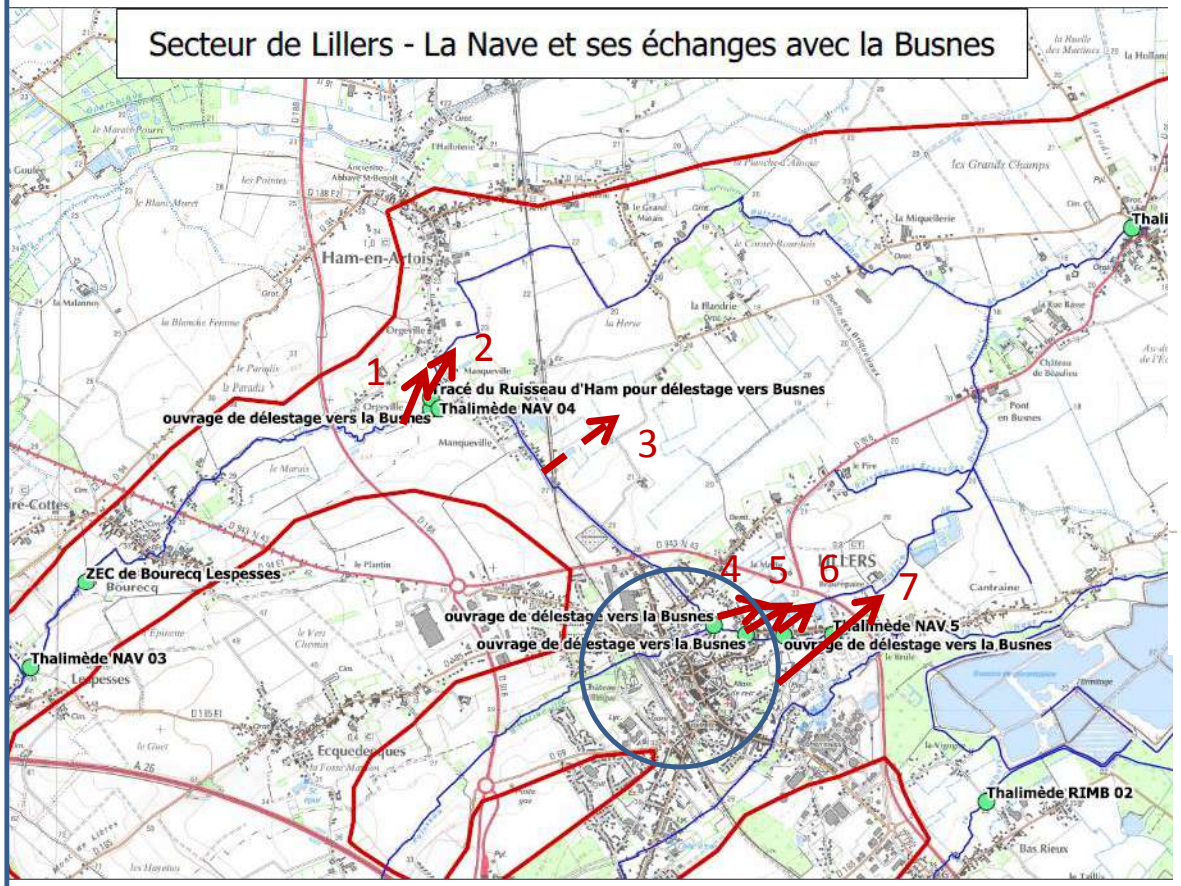
Sur la Nave de nombreux échanges entre la rivière et la Busnes sont constatés. Ceci par déversement au dessus de la digue (Manqueville), par passage par des ouvrages (4 ouvrages sur Lillers), par stockage dans les plaines d'inondation. Le débit est écrêté à 3-4 m3/s en sortie de Lillers.

Le déversoir du Plâtrier permet un transfert via un réseau de fossé des eaux vers la Busnes.

Figure 13 : Fossé de récupération des eaux de la Nave pour évacuation vers la Busnes via le déversoir du Plâtrier

Trois autres systèmes sont en place : un de diamètre 200 mm, deux de diamètres 500 mm.

Figure 14 : Juillet 2005, Manqueville



7 : renvoi eaux pluviales vers Busnes

6 : Passage Nave Busnes buse 500 mm

5 : Passage Nave Busnes buse 500 mm

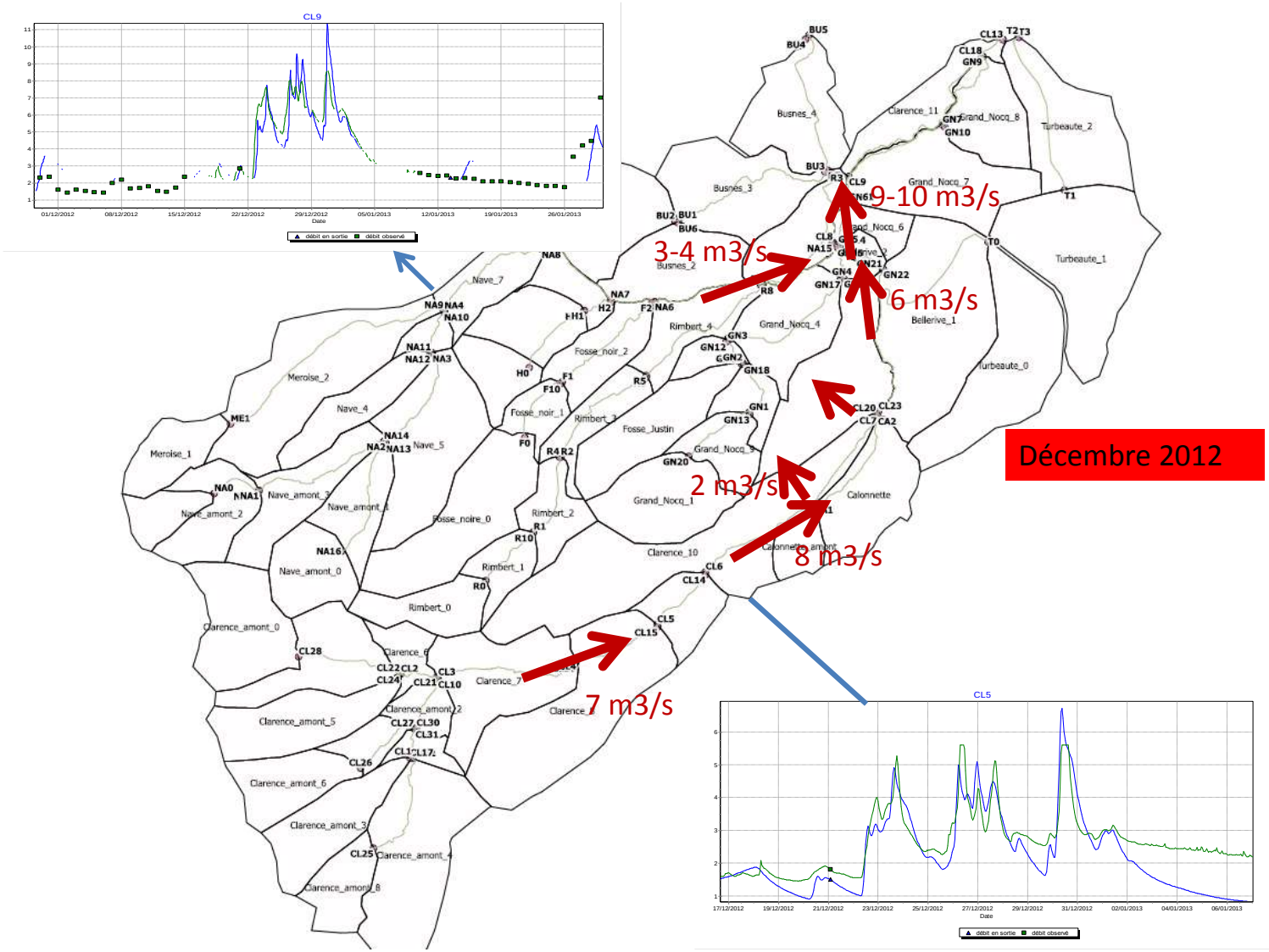
4 : Passage Nave Busnes buse 200 mm

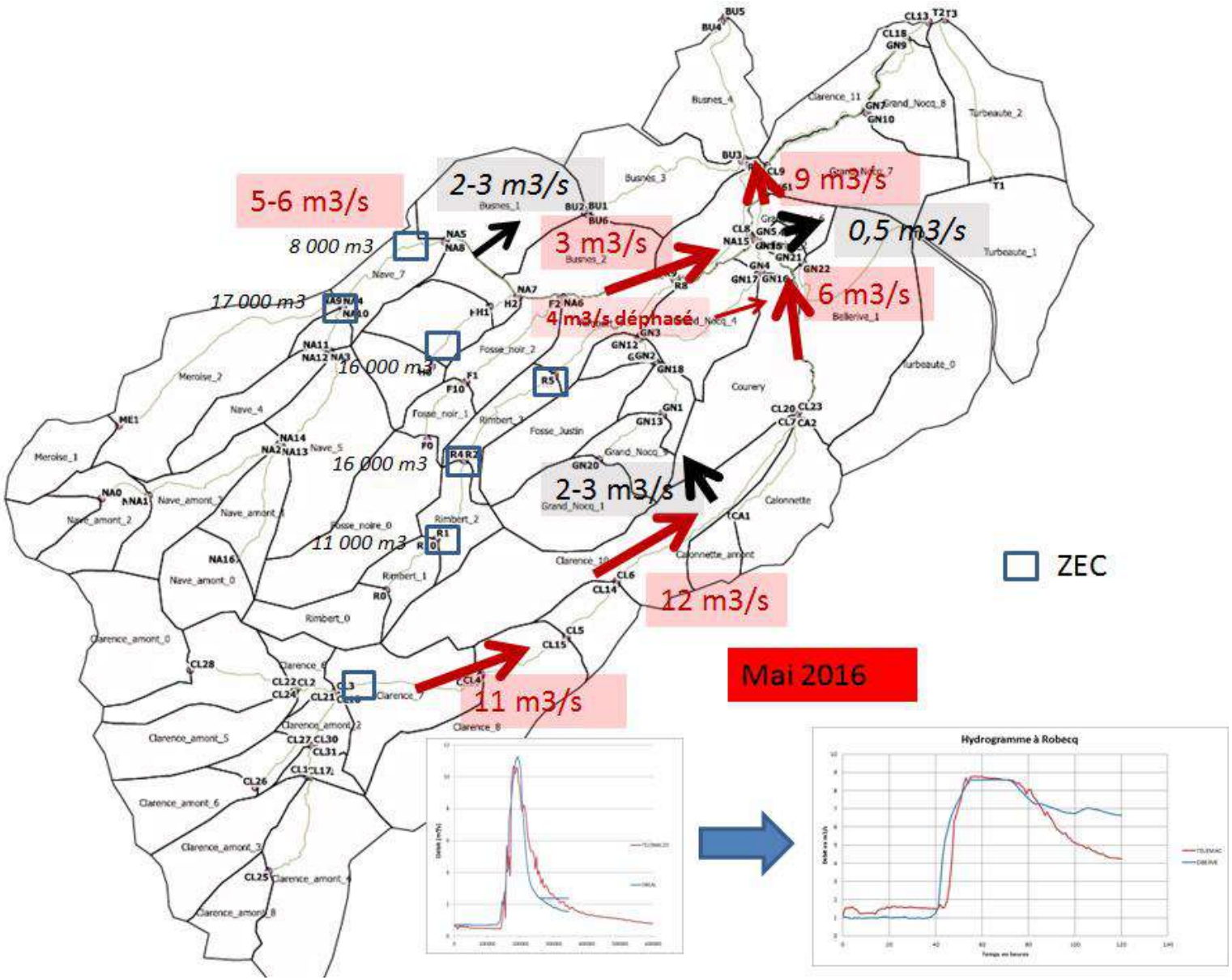
3 : Passage Nave Busnes rupture digue

2 : Passage Nave Busnes déversoir du Plâtrier

1 : Passage Nave Busnes par déversement au-dessus des digues ou rupture

3.2.3 Cartes de synthèse




5-6 m3/s
2-3 m3/s
9 m3/s
0,5 m3/s
3 m3/s
6 m3/s
4 m3/s déphasé
8 000 m3
17 000 m3
16 000 m3
16 000 m3
11 000 m3
2-3 m3/s
12 m3/s
11 m3/s
ZEC
Mai 2016
Hydrogramme à Robecq

3.3 Conclusions

La déformation des hydrogrammes de crue au cours de leur propagation dans la Clarence et la Nave est très importante pour plusieurs raisons :

Le lit mineur est souvent perché par rapport au lit majeur,

Le lit majeur à l'aval est très large et constitue une vaste zone de stockage,

Des transferts entre la Nave et la Busnes d'une part, entre la Clarence le Grand Nocq d'autre part ont lieu,

Ces transferts peuvent être considérablement augmentés en cas de brèches dans les digues.

Il en résulte un écrêtement des débits qui n'ont pas dépassé à Robecq la valeur de10 m3/s par le passé, quelle que soit la crue (hiver ou été).

4 ALEA DEBORDEMENT

4.1 Rappel de la méthode

Pour estimer l'alea, les étapes suivantes sont réalisées :

- Calage et validation d'un modèle 2D sur les crues de décembre 2012 et mai 2016,
- Estimation du débit de la crue de décembre 1999,
- Estimation d'évènements pluviométriques de référence,
- Simulation des évènements de référence,
- Confrontation des résultats à d'autres méthodes d'estimation des débits de référence,
- Simulation de scénarios de rupture.

Le modèle 2D est choisi car il permet de mieux prendre en compte les vastes champs d'expansion. Le logiciel Telemac permet également de simuler dans des conditions satisfaisantes des ruptures de digues. Pour les fossés et parties amont à forte pente, nous réaliserons des modèles avec le logiciel Hec-Ras.

4.2 Présentation des logiciels

Deux logiciels ont été utilisés: le modèle Telemac 2D, le modèle Hec Ras.

4.2.1 Telemac 2D

Le logiciel TELEMAC2D a été élaboré par EDF et est en libre accès aujourd'hui.

TELEMAC2D résout les équations de Barré de Saint-Venant à deux dimensions horizontales. Il trouve ses applications en hydraulique à surface libre, maritime ou fluviale, et est capable de prendre en compte les phénomènes physiques suivants :

- propagation des ondes longues avec prise en compte des effets non linéaires,
- frottement sur le fond,
- influence de la force de Coriolis,
- influence de phénomènes météorologiques : pression atmosphérique et vent,
- turbulence,
- écoulements torrentiels et fluviaux,
- influence de gradients horizontaux de température ou de salinité sur la densité,
- coordonnées cartésiennes ou sphériques pour les grands domaines,
- zones sèches dans le domaine de calcul : bancs découvrant et plaines inondables,
- entraînement par le courant et diffusion d'un ou plusieurs traceurs, avec des termes de création ou de disparition,
- suivi de flotteurs et dérives lagrangiennes,
- traitement de singularités : vannages, digues, ponts,
- prise en compte des forces de traînée des structures verticales,

- prise en compte des phénomènes de porosité,

La dernière version du logiciel dispose d'un module de brèches pour simuler les ruptures d'éléments structurants tels que les digues et les barrages.

Des couplages avec les logiciels SIG et un logiciel de post et pré-traitement (FUDAA) facilitent son utilisation.

4.2.2 HEC RAS

Afin de réduire les temps de calcul, nous choisissons de modéliser les secteurs amont de la Nave et le Rimbert à l'aide du logiciel Hec Ras. HEC-RAS prend en compte aussi bien les défluences que les confluences (réseaux dendritiques).

Le logiciel simule les fonctionnements unidimensionnels en utilisant les équations simplifiées de Barré de Saint Venant. Les équations sont résolues en régime permanent ou transitoire fluvial, torrentiel ou mixte.

HEC-RAS décompose le système de rivière en biefs interconnectés en un réseau maillé. Les biefs sont composés d'une succession de sections elle-même divisées en 3 zones principales : lit mineur, lit majeur rive gauche et lit majeur rive droite.

Les pertes de charges au niveau des ouvrages peuvent être finement déterminées, à l'aide de l'équation de la quantité de mouvement, le logiciel permet entre autre de modéliser la perte de charge due à des seuils transversaux :

- seuils transversaux et seuils latéraux,
- ponts à ouverture multiples,
- ouvrages vannés et ponceaux multiples,
- couvertures de glaces,
- calculs d'estimations de l'érosion au droit des piles de ponts,
- zones inondables connectés par des ouvrages type seuil ou ponceau.

HEC-RAS est un logiciel de référence dans son domaine ; il a été utilisé et validé par ses créateurs et l'ensemble des ingénieurs hydrauliciens du Hydrological Engineering Center sur un grand nombre de bassins hydrographiques, de rivières, de fleuves.

4.3 Emprise du modèle et topographie utilisée

4.3.1 Emprise et topologie du modèle

Etant donnée l'étendue du secteur d'étude, qui couvre une surface de bassin versant d'environ 240 km² et qui comptabilise plus de 150 km de linéaire de cours d'eau sans compter les nombreux fossés, le choix a été fait de ne pas prendre l'ensemble du secteur dans l'emprise du modèle hydraulique et ce afin de limiter le nombre de mailles et donc le temps de calcul.

L'emprise du modèle a été définie de telle sorte qu'elle permet de tenir compte :

- de l'ensemble des cours d'eau jouant un rôle (constaté ou présumé) dans les phénomènes d'inondation,
- du relief de la zone d'étude (courbe de niveau et LIDAR) et des sous découpages en sous-bassins versants,
- des enjeux situés à proximité des cours d'eau,
- du précédent zonage issu du PPRI et des zones d'inondation constatées (ZIC).

La Figure 15 : Emprise du modèle représente en rouge l'emprise de la modélisation hydraulique.

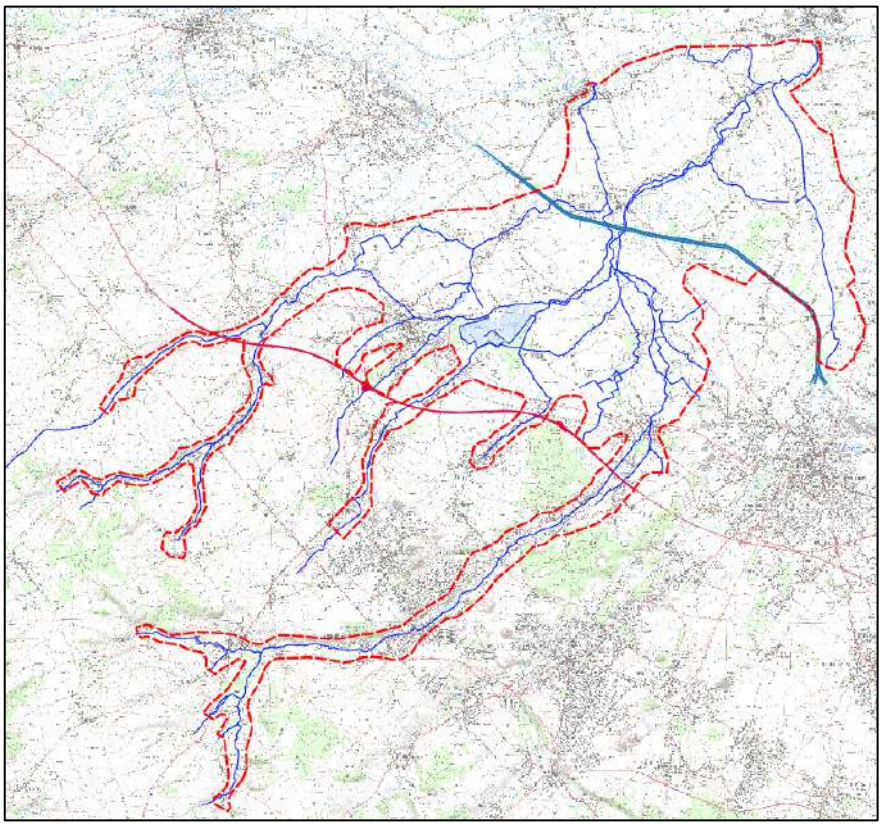


Figure 15 : Emprise du modèle

Cette modélisation prend en compte les cours d'eau du secteur ainsi que leurs principaux affluents dont la liste est la suivante.

Sur le bassin versant de la Clarence

- La Nave et ses affluents le Ravin de la Méroïse, la Coqueline, le ruisseau d'Hurionville et le Fossé noir,
- Le Grand Nocq et son affluent le Decq,
- La Clarence ainsi que le Ruisseau du Pressy, celui du Marest, la Calonnette, le Becq, le Courant de Bellerive, le Courant d'Oblinghem et le courant de la Plaine.

Sur le bassin versant de la Busnes

La Busnes et son principal affluent le Rimbert sont modélisés. Le Courant d'Ham, le ruisseau des Ecussons ainsi que le Fossé de Cantrainte sont également pris en compte.

Sur le bassin versant du Turbeauté

En complément du Courant du Turbeauté, le Courant d'Hannebecque qui permet la liaison entre le Turbeauté et le Grand Nocq est également modélisé.

Les lignes de structure du modèle vont permettre d'affiner localement le maillage autour des centres d'intérêts (centres urbains, digues, …) mais également autour d'éléments qui peuvent canaliser, bloquer ou dévier les écoulements en cas d'inondation en lit majeur (route, voies ferrées, remblais, …). Les éléments structurants intégrés à la modélisation sont les suivants :

- les axes routiers : A26, routes nationales et départementales
- le Canal d'Aire à la Bassée
- les voies ferrées
- les digues
- les zones d'expansion des crues (ZEC) présentes en bordure de cours d'eau

4.3.2 Données topographiques et bathymétriques exploitées

L'ensemble des données récoltées sont rassemblées sous un SIG via le logiciel QGIS. Le système de coordonnées est le suivant :

- Réseau Géodésique Français (RGF) Lambert 93 en planimétrie
- Nivellement Général de la France (NGF) IGN 69 en altimétrie

Les données topographiques et bathymétriques utilisées sont les suivantes :

- le MNT Lidar datant de 2009, doté d'une précision de l'ordre de 10 cm en altimétrie ;
- les levés de profils bathymétriques en lit mineur issus des diverses études :
  - ◊ Profils à l'approche des stations de Marles-les-Mines, Gonnehem et Robecq (DREAL),
  - ◊ Profils sur le Grand Nocq (BRL),
  - ◊ Profils sur la Calonnette (ISL) ;
- Les compléments topographiques réalisés en 2015 pour les besoins de la présente étude :
  - 308 profils bathymétriques levés en lit mineur sur l'ensemble du secteur d'étude,
  - 266 ouvrages levés,
  - 29 repères de crue, une plaque et une échelle de crue levés.

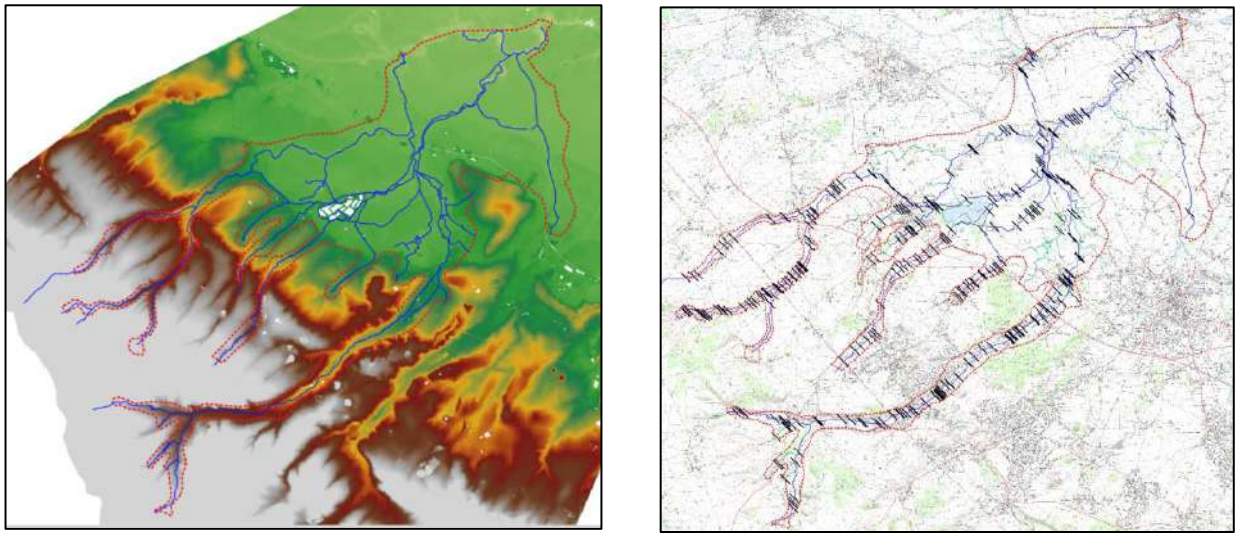


Figure 16 : LIDAR (à gauche) et profils bathymétriques disponibles en lit mineur (à droite)

4.3.3 Traitement des données topographiques

4.3.3.1 Lit majeur

Pour la représentation du lit majeur, les données topographiques du LIDAR sont utilisées. Les zones non couvertes par le MNT Lidar (notamment au droit des zones humides et des habitations) ont été interpolées par rapport à la cote du terrain naturel avoisinant

En revanche, du fait de la hauteur d'eau en lit mineur, la précision du MNT Lidar y est fortement altérée. Ce MNT ne sera donc pas utilisé pour représenter le lit mineur des cours d'eau.

4.3.3.2 Lit mineur

L'ensemble des profils en travers levés lors de la campagne de 2015 sont pris en compte dans la création d'un MNT du lit mineur.

L'interpolation des profils est réalisée sous le logiciel HEC-Ras.

- Dans un premier temps, les linéaires de cours d'eau, préalablement saisis sur QGIS et géo référencés, sont intégrés au logiciel HEC-Ras.
- Par la suite l'ensemble des profils géo référencés sont intégrés au modèle. Ces deux étapes sont illustrées figure page suivante.
- Enfin, l'ensemble des profils sont interpolés le long des linéaires tous les 2 mètres, comme l'illustre la figure page suivante.

L'ensemble des profils est ensuite réexporté sous le format d'un fichier de points exploitable avec le logiciel QGIS. Le MNT du lit mineur est créé à partir de ce fichier de points en utilisant un outil de triangularisation qui va permettre d'interpoler les valeurs entre les points avec un pas de 0,5 m.

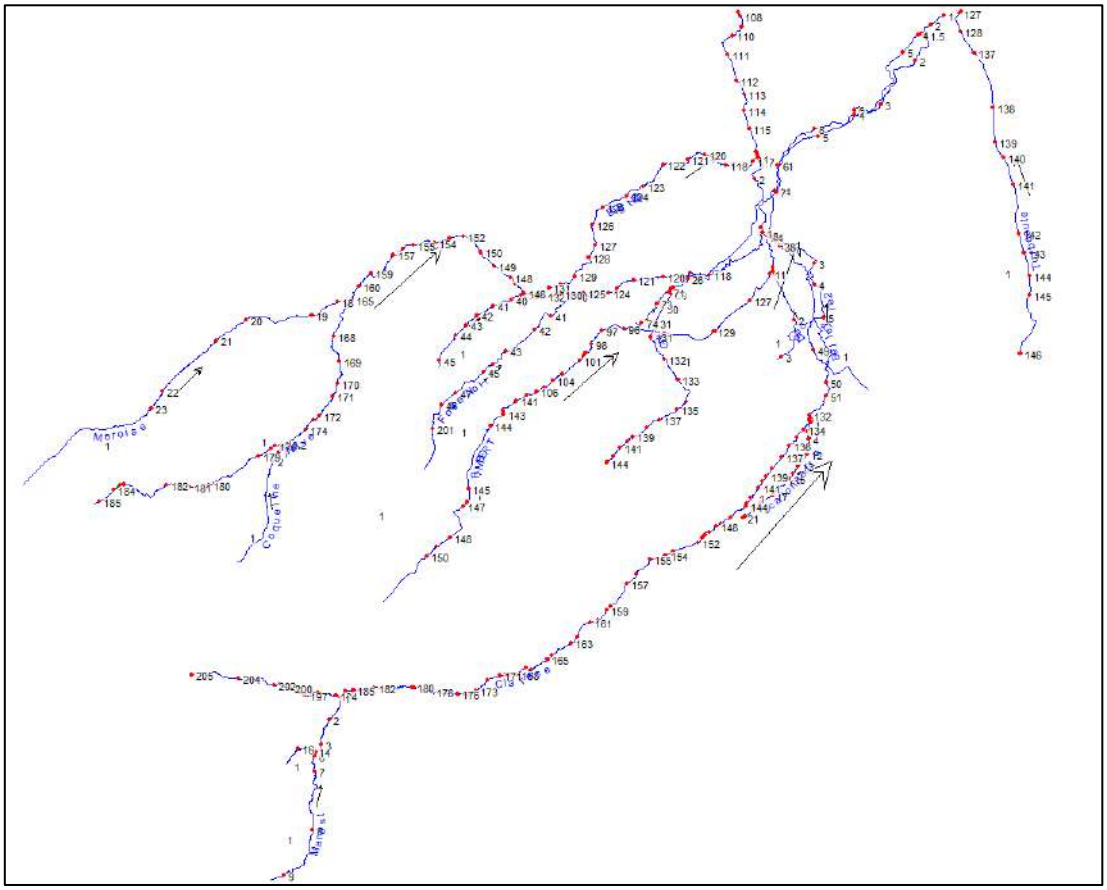


Figure 17 : Importation des linéaires et des profils

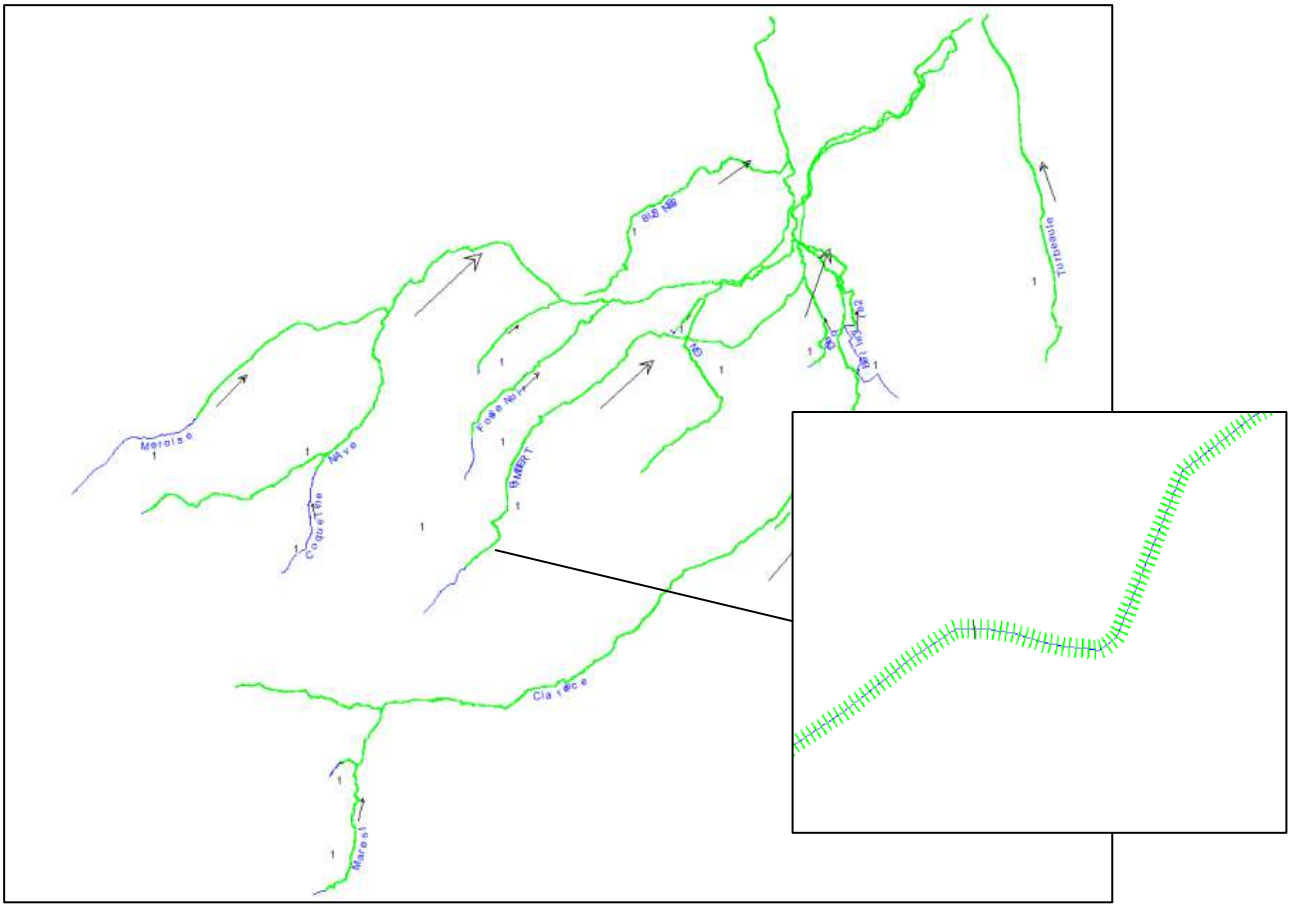


Figure 18 : Interpolation des profils

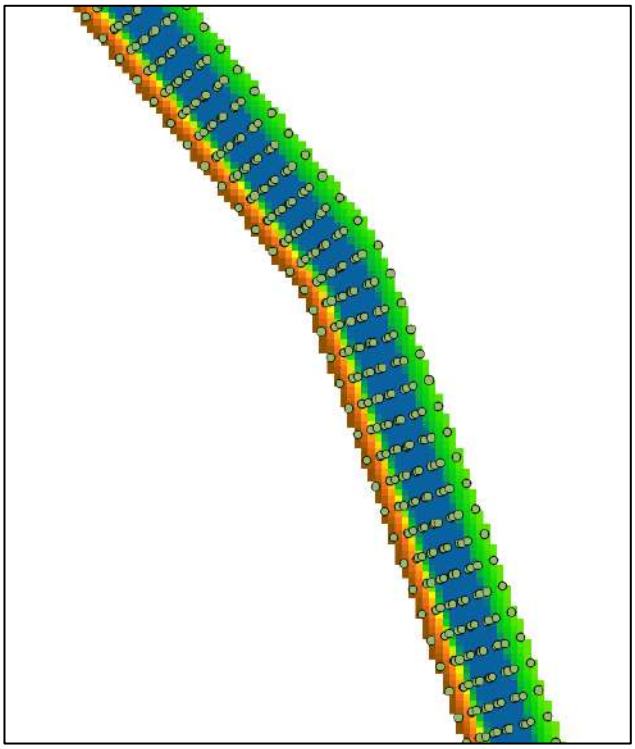


Figure 19 : Lit mineur sur le Turbeauté

4.3.3.3 Vérification et construction du Modèle Numérique de Terrain

Lorsque les interpolations sont terminées, les MNT des lits mineurs du bassin versant de la Clarence et de la Busnes sont fusionnés.

Une vérification est ensuite réalisée pour s'assurer que l'interpolation a été correctement réalisée.

La superposition du LIDAR avec le MNT du lit mineur du Rimbert est illustrée sur la figure ci-après. La coupe transversale montre bien que le LIDAR (en rouge) ne représente pas correctement le lit mineur du cours d'eau. Le MNT du lit mineur du Rimbert (en vert), issu de l'interpolation des profils, permet de corriger ces erreurs.

Si, à proximité des profils levés par le géomètre, l'interpolation colle au plus près avec la réalité, entre les profils, qui sont parfois espacés de 1 à 2 kilomètres, l'interpolation linéaire des profils ne permet pas de tenir compte de toutes les variations de sections du lit.

Cependant, il est important de noter que ces erreurs possibles d'interpolation n'auront des incidences que très localement et en aucun cas n'auront de répercussions globales sur les écoulements, qui plus est, en période de crue.

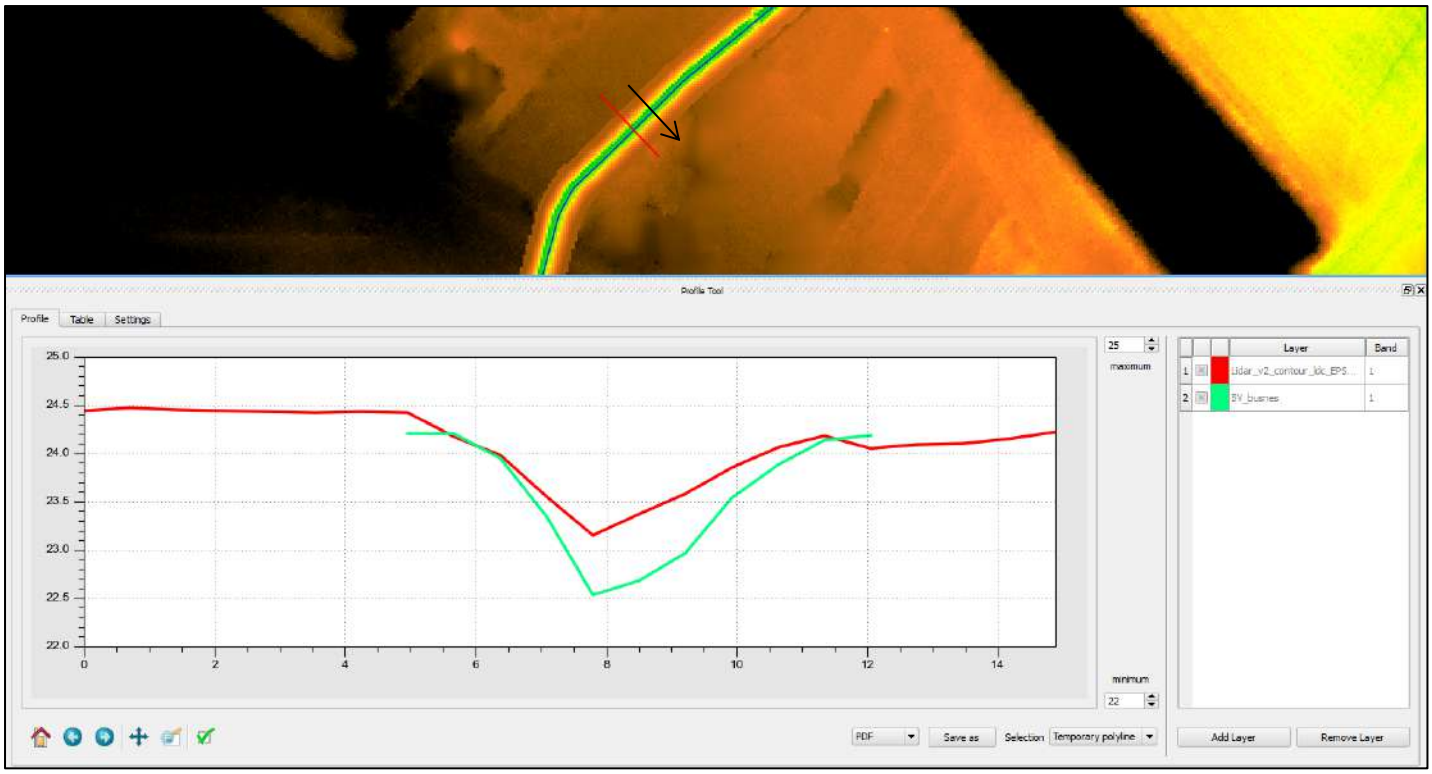


Figure 20 : Vérification de la cohérence entre le LIDAR er le MNT du lit mineur

Les seuils en rivière présents sur le territoire ont été directement intégrés à la bathymétrie du lit mineur. De manière analogue, les profils au droit des seuils et juste en aval sont intégrés à l'interpolation et permettent ainsi de représenter la chute liée au seuil.

4.3.3.4 Les lignes de structure

Les remblais routiers ou d'infrastructures et les digues sont représentés dans le modèle via des lignes de structure qui permettent de mailler finement au niveau de la crête.

4.3.4 Prise en compte des ouvrages

La prise en compte des singularités hydrauliques comme les ponts en charge, les organes mobiles (clapets, vannes) peut être délicate sous modèle 2D TELEMAC tandis qu'Hec Ras gère mieux ces singularités.

L'ensemble de ces 260 ouvrages ne sont pas intégrés et modélisés par le modèle hydraulique. Un travail minutieux de catégorisation des ouvrages a été réalisé. Il permet de classer les différents ouvrages en fonction de leur nature (vanne, siphon, pont, buses) et d'estimer à priori l'impact de chaque ouvrage lors d'une crue majeure. Ainsi, un ouvrage qui ne présente pas d'obstacle majeur à l'écoulement, et qui en période de hautes eaux est très vite submergé et effacé, est à distinguer d'un ouvrage plus conséquent dont la mise en charge peut avoir de grosses conséquences en amont.

Concernant les ouvrages de franchissement de grande taille, type ponts non mis en charge, ils sont représentés par leurs remblais et leurs culées et leurs piles mais sans leur tablier. En annexe, est reportée la liste des ouvrages pris en compte.

Un total de 46 ouvrages a été intégré au modèle hydraulique comprenant les 6 siphons du territoire (4 sous le canal, celui du Grand-Nocq sous la Clarence et celui du Rimbert sous la Nave). Cette sélection s'est effectuée sur la base des retours auprès des communes sur les ouvrages dits « limitants », sur l'analyse du territoire, l'identification des secteurs busés importants et des ouvrages charnières (sous l'A26 par exemple).

La figure suivante illustre le positionnement des ouvrages intégrés.

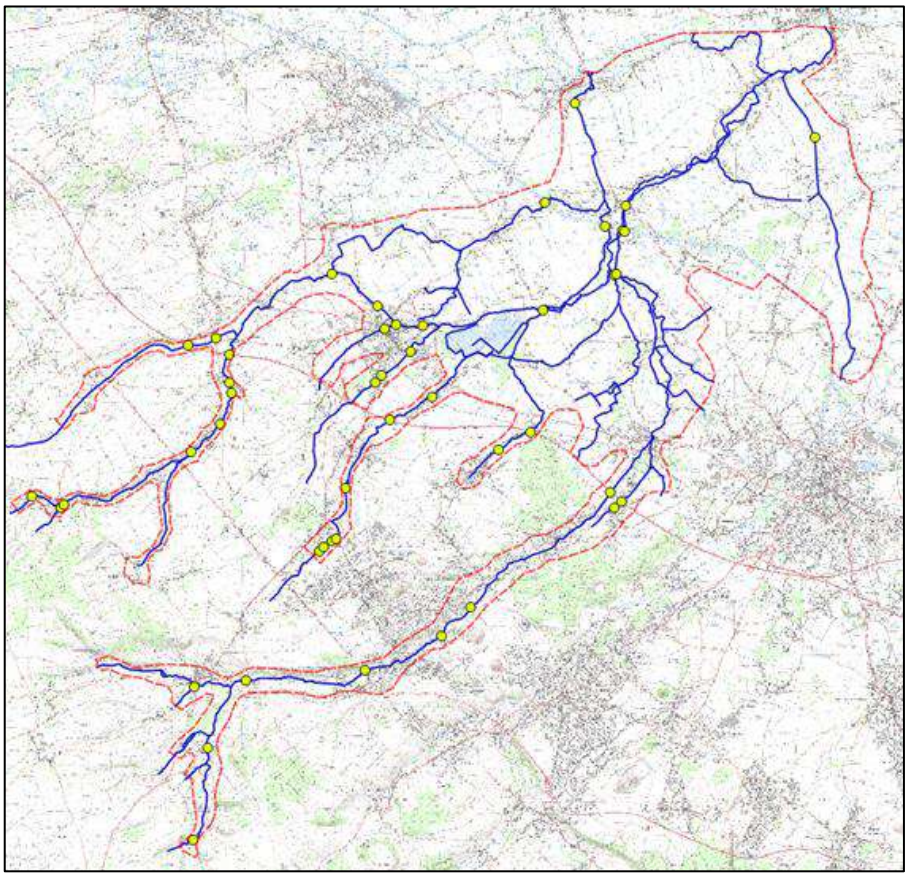


Figure 21 : Ouvrages intégrés au modèle hydraulique AMAJ

4.4 Localisation et étendue des modèles

Du fait de leur faible largeur (2 à 4 mètres), certains tronçons de cours d'eau ont fait l'objet d'une modélisation hydraulique monodimensionnelle. Il s'agissait ainsi :

- de réduire les temps calcul du modèle bidimensionnel (suppression des mailles de petites tailles du modèle 2D),
- d'avoir une meilleure représentation du lit mineur (pas assez de mailles dans le modèle 2D pour bien représenter le lit mineur).

Les cours d'eau concernés sont :

- La Nave et ses affluents :
  - Le ruisseau de la Coqueline,
  - Le ruisseau de la Méroise
  - Le ruisseau d'Hurionville,
  - Le ruisseau du Fossé Noir.

- Le Rimbert.
- Le Grand Nocq.

La figure ci-après précise les zones de modélisation 1D et 2D.

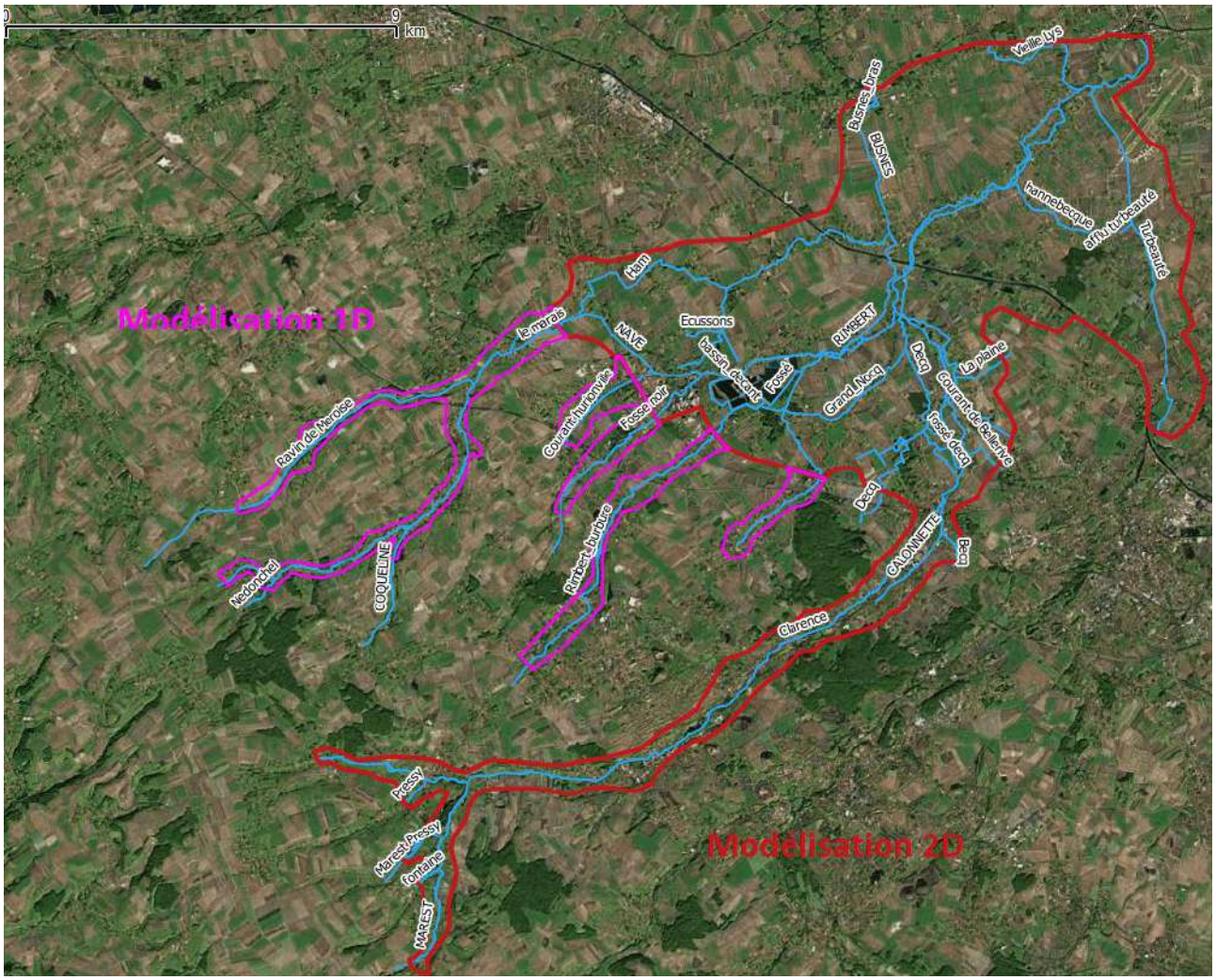


Figure 22 : Localisation et étendue des modèles 1D et 2D

4.5 Construction du modèle Hec Ras

4.5.1 Topologie

La géométrie d'un modèle HEC-RAS est définie par une série de profils en travers du cours d'eau et de son lit majeur dont la représentativité dépend de la qualité et de la densité des données topographiques et bathymétriques disponibles.

La géométrie des ouvrages est également précisée dans le modèle et des lois d'hydraulique assurent le transfert de débit de l'amont vers l'aval de l'ouvrage moyennant un coefficient de débit à renseigner.

La géométrie du modèle a été élaborée à partir des données suivantes :

- Les profils en travers du lit mineur des différents cours d'eau et des ouvrages hydrauliques présents par le cabinet de géomètres experts GEO SOLUTIONS de décembre 2015 à février 2016. Ces données ont été utilisées pour la définition du lit mineur et des ouvrages au sein de la géométrie du modèle.
- Le levé lidar sur l'ensemble de la zone d'étude de densité 1 points tous les m^2. Il a été utilisé pour étendre les profils en travers du modèle sur le lit majeur.

La figure ci-après représente en 3D la géométrie du modèle réalisé à partir des données topographiques disponibles.

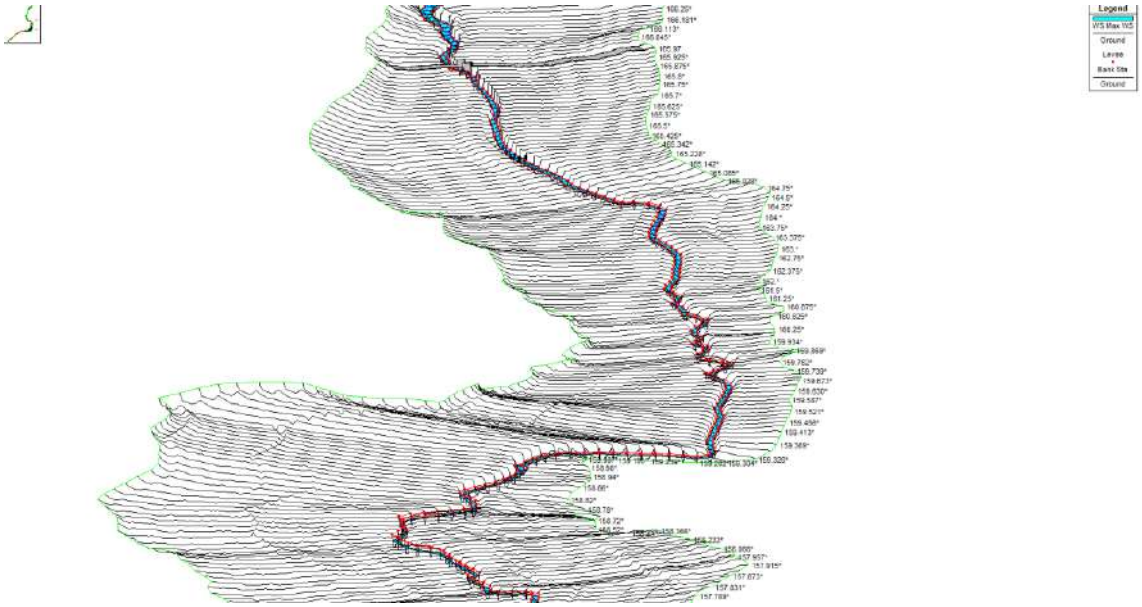


Figure 23 : Représentation 3D d'un extrait de la géométrie du modèle hydraulique de la Nave

Figure 24 : Représentation d'un ouvrage hydraulique du ruisseau du Fossé Noir

4.5.2 Conditions limites

Les calculs sont menés en régime transitoire.

Les hydrogrammes injectés en entrée des modèles ainsi que les hydrogrammes des bassins intermédiaires sont issus des calculs hydrologiques menés avec GESRES.

Les limites aval des modèles de la Nave et du Rimbert sont suffisamment éloignées de la limite de modélisation 1D/2D pour éviter tout problème d'influence.

4.6 Construction du modèle Telemac

4.6.1 Construction du maillage du modèle

Dans un premier temps, tous les éléments structurants du modèle sont saisis sous QGIS.

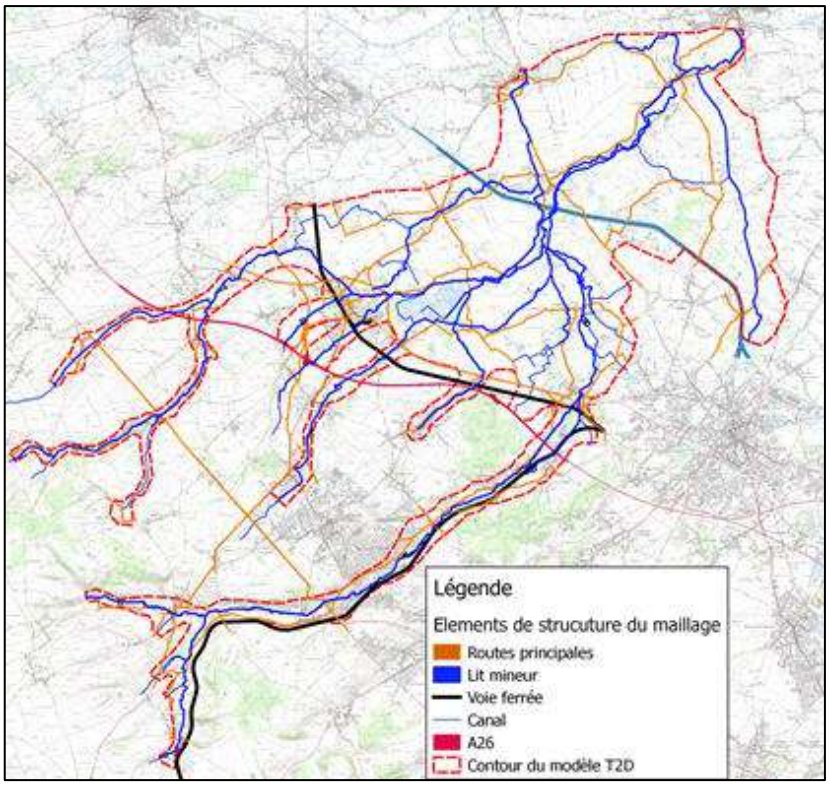


Figure 25 : Lignes de structure du maillage

Par la suite, ces éléments structurants permettent d'adapter la taille des mailles en fonction de l'importance donnée à la zone considérée. Ainsi pour s'assurer d'obtenir le point haut des routes ou digues en remblais par exemple, une densification des mailles est effectuée à ces endroits.

Le critère de maille est défini en fonction de la taille caractéristique des éléments structurant l'écoulement (largeur des rues, des voiries, d'un canal, etc.). Dans les zones ne présentant pas de variations altimétriques brusques ou ne présentant pas d'intérêt au sens hydraulique, la taille des mailles est beaucoup plus lâche.

Le tableau suivant précise les différentes tailles de mailles en fonction des zones.

Types de zone	Taille des mailles
Digues	5 m
Remblais routiers, infrastructures ferroviaires	10 m
Canal	15 m
Frontière du modèle	15 m
Zones jugées sans enjeux	50 m

Tableau 2 : Taille des mailles dans le modèle

Une fois l'ensemble des critères de mailles définis, les éléments structurants sont intégrés au logiciel de maillage appelé MATISSE. La figure suivante illustre l'intégration de l'ensemble des lignes de structure au mailleur MATISSE.

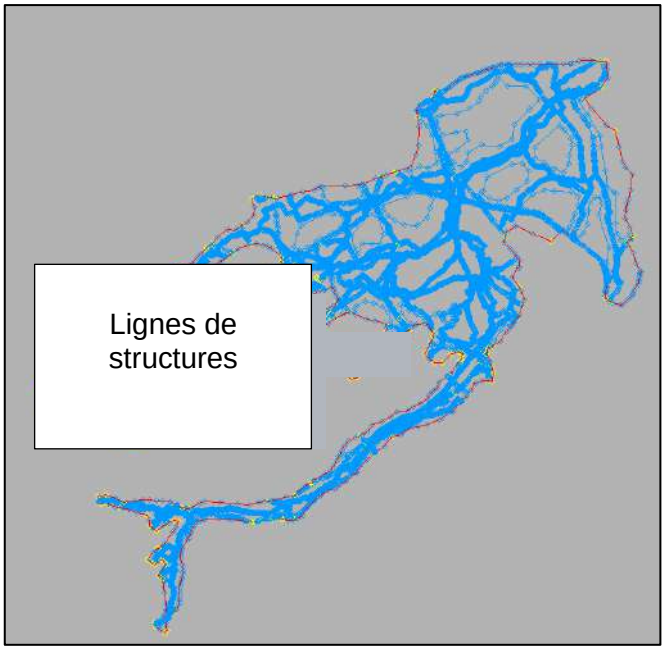


Figure 26 : Intégration des lignes de structure à MATISSE

Un traitement particulier est accordé au maillage **des lits mineurs**. Ils sont définis en tant que zones, ce qui permet de mailler finement et de manière régulière le lit mineur : un nombre de maille constant en largeur et des mailles étirées en longueur, dans le sens de l'écoulement pour réduire le nombre de maille globale.

De manière générale, la dimension des mailles en largeur est inférieure à **2 m voire 1,5 m** avec un minimum requis de **3 mailles en largeur.**

Les maillages des zones sont effectués avant le maillage global du modèle.

Les figures suivantes montrent le maillage préalable des zones sur le Grand Nocq et le Rimbert. Les lignes de structure des RD 182, RD 187 et des digues sont également visibles.

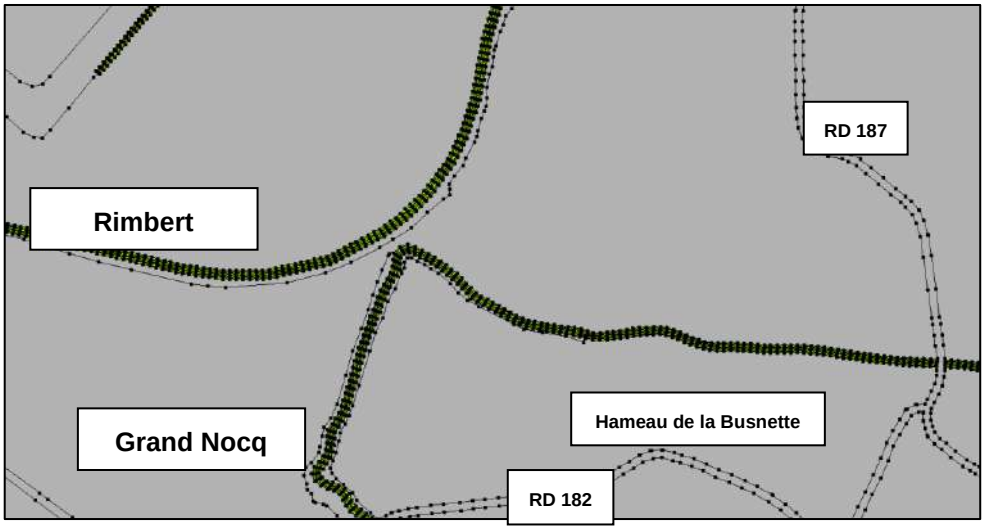


Figure 27 : Maillage des zones – Zoom sur le hameau de la Busnette

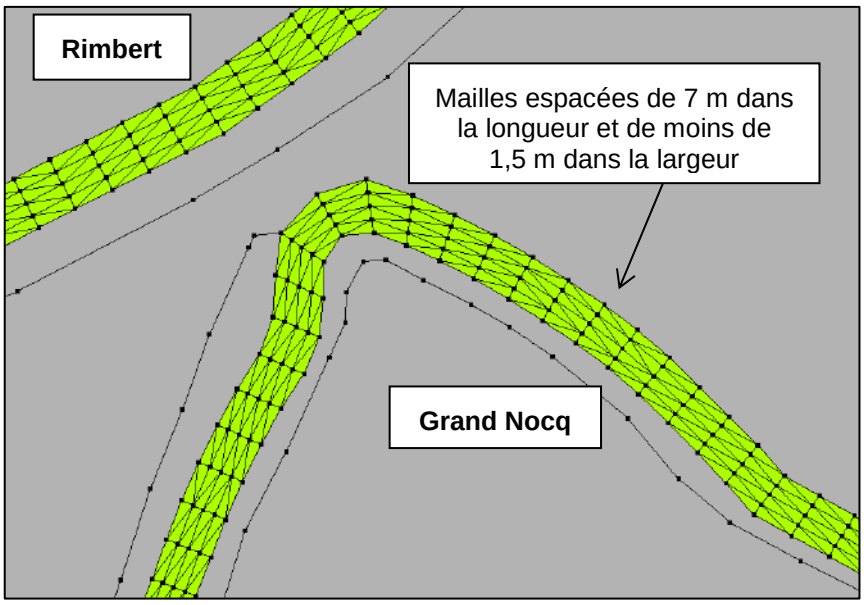


Figure 28 : Zoom sur le maillage des zones

Une fois l'ensemble des zones maillées, le maillage global du modèle est réalisé, contraint par les mailles des zones déjà existantes. Le maillage final compte 642 136 nœuds.

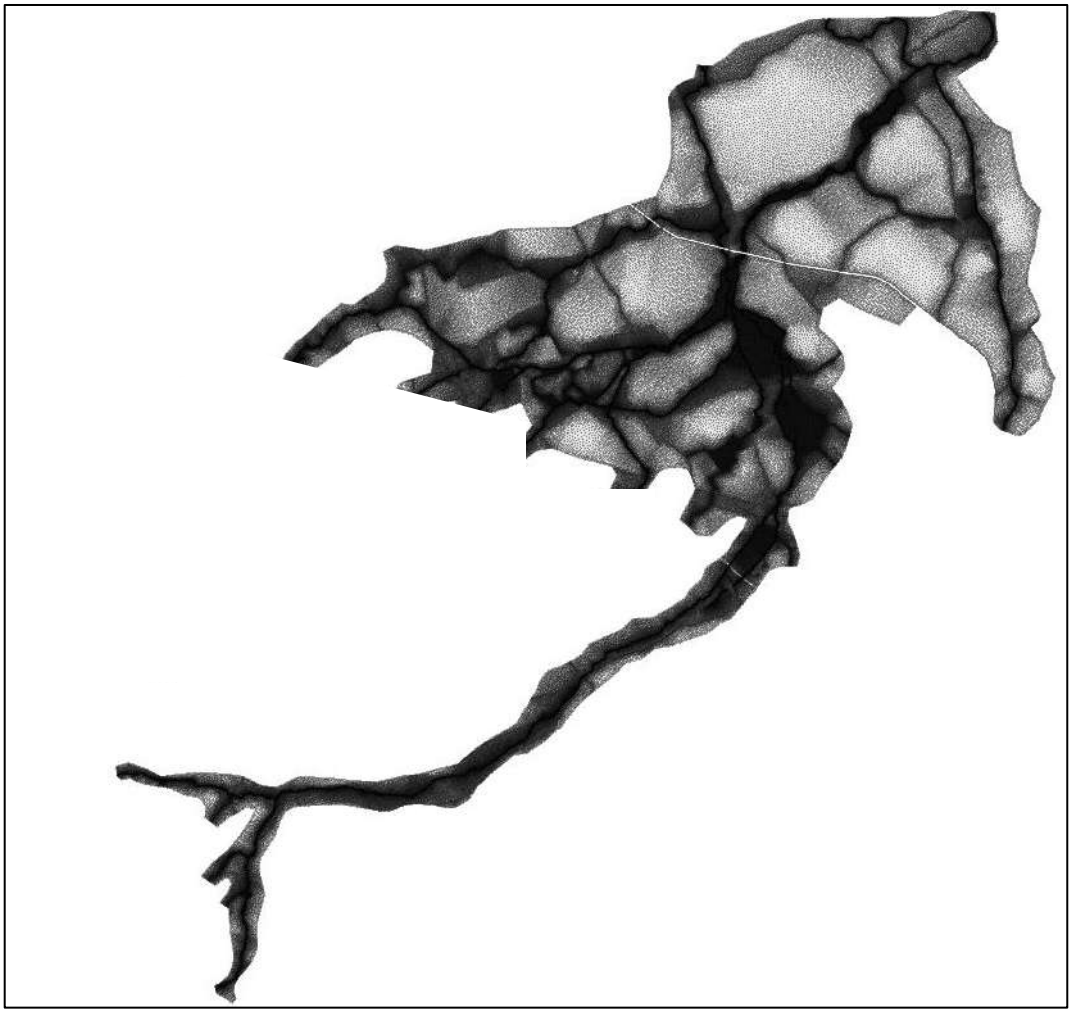


Figure 29 : Maillage

4.6.2 Intégration de la bathymétrie

L'intégration de la bathymétrie au maillage est réalisée sous FUDAA, à partir du LIDAR pour le lit majeur et du MNT réalisé pour le lit mineur.

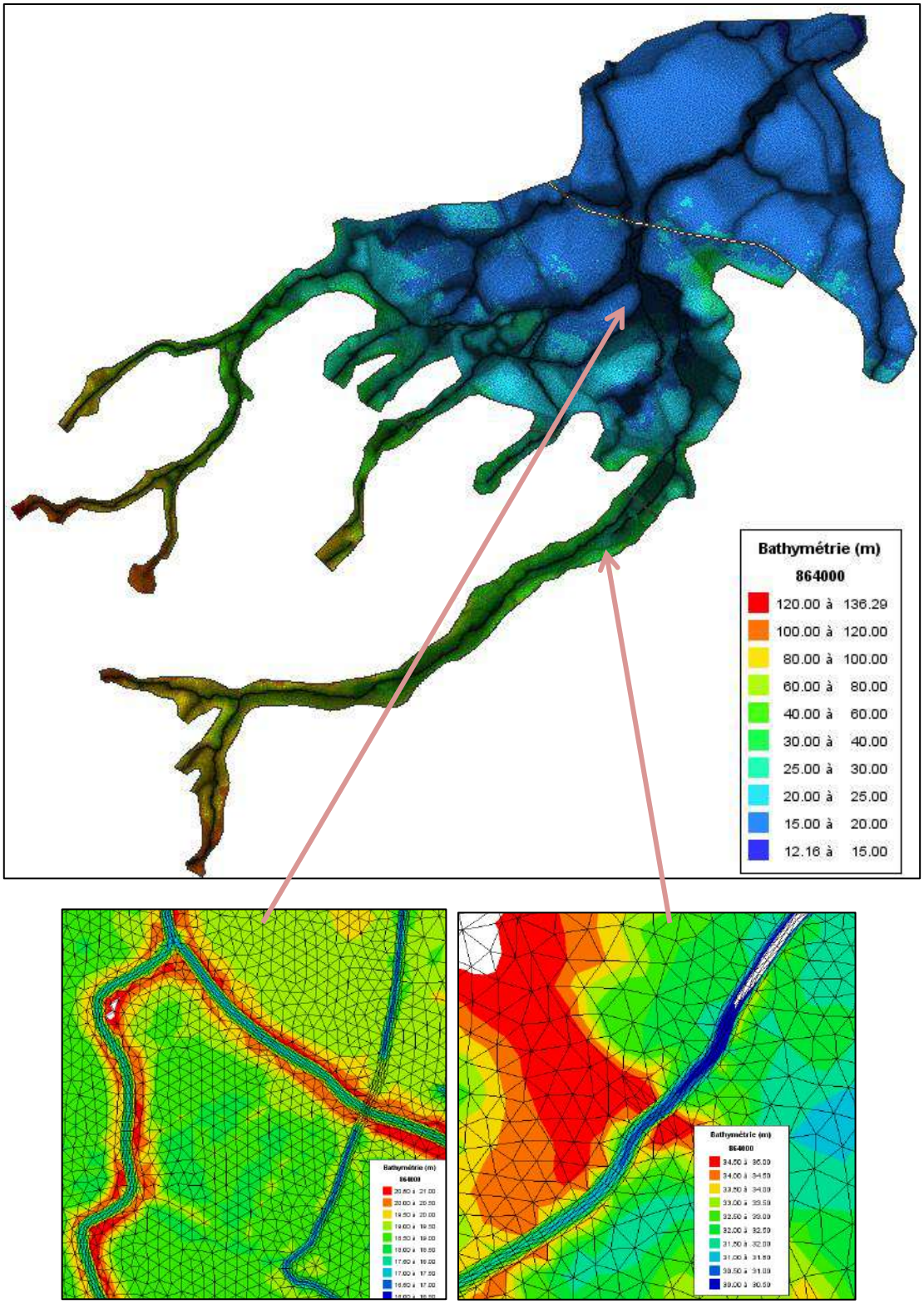


Figure 30 : Intégration de la bathymétrie au maillage – Zoom sur Gonnehem et Lapugnoy

4.6.3 Modélisation des ouvrages

Pour les ouvrages potentiellement en charge, des subroutines « buses » ou « siphons » permettent de représenter les pertes de charges linéaires en même temps que les débordements surfaciques sont calculés par les équations de Saint-Venant.

4.7 Conditions aux limites

4.7.1 Conditions limites amont

Les hydrogrammes injectés en condition amont ont été déterminés précédemment à l'aide du modèle hydrologique GR4. Ces hydrogrammes sont injectés en tête de bassin mais aussi aux endroits des apports intermédiaires.

La prise en compte de ces apports permet de simuler aux mieux les crues car les hydrogrammes ont été réalisés dans les conditions réelles de saturation de sol.

4.7.2 Conditions limites aval

Les conditions aval sont connues à l'aval des ouvrages VNF présents sur la Lys canalisée sous la forme de hauteurs d'eau mesurées. Les niveaux PHEN (plus haut niveau de navigation) et NNN (niveau normal de navigation) sont également connus.

Conditions limites sur la Vieille Lys

Pour connaître les conditions limites sur la Vieille Lys, la station de mesure en aval de l'écluse de Merville est utilisée. Des données sont disponibles pour les épisodes de crue suivants :

- décembre 1999,
- juillet 2005,
- juillet 2007,
- mars 2012,
- décembre 2012,
- juillet 2014.

Les niveaux en PHEN et NNN à l'aval de l'écluse de Merville valent respectivement 14,47 et 13,27 m NGF.

La station de mesure est située 300 mètres à l'amont de la confluence Vieille Lys-Lys, mais étant donnés les pentes des biefs très faibles (pente de 0,01%) et les linéaires concernés, cette station peut être utilisée pour fournir les conditions aval sur la Vieille Lys (point 1).

Pour connaitre la condition limite amont sur la Vieille Lys (point 2), les résultats issus de l'étude hydraulique engagée dans le cadre de la réalisation de l'atlas des zones inondables du bassin versant de la Lys sont mis à contribution.

Avec une pente d'environ 0,012%, la différence de hauteur entre les deux points est de 76 cm.

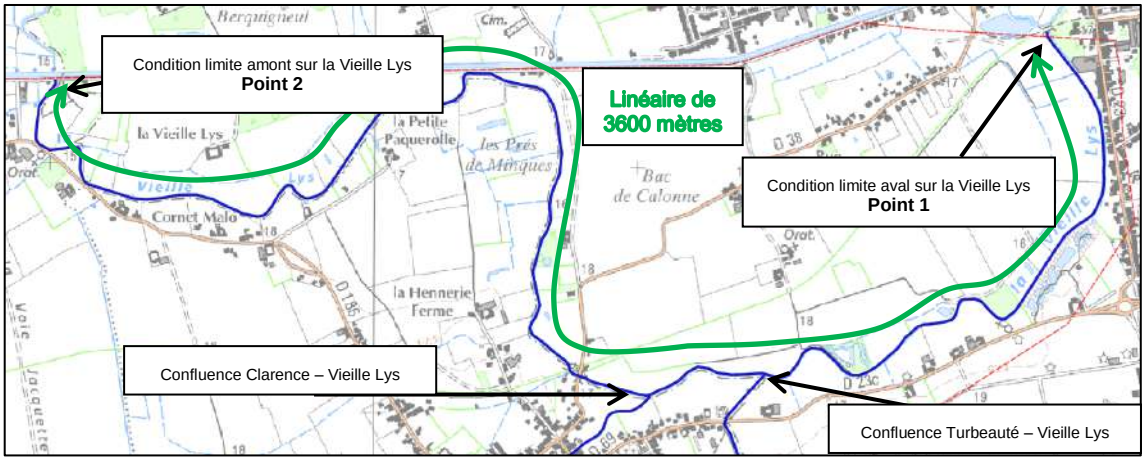


Figure 31 : Confluence Clarence – Vieille Lys – Turbeauté

La figure suivante illustre les conditions aval sur la Vieille Lys pour la crue de décembre 2012.

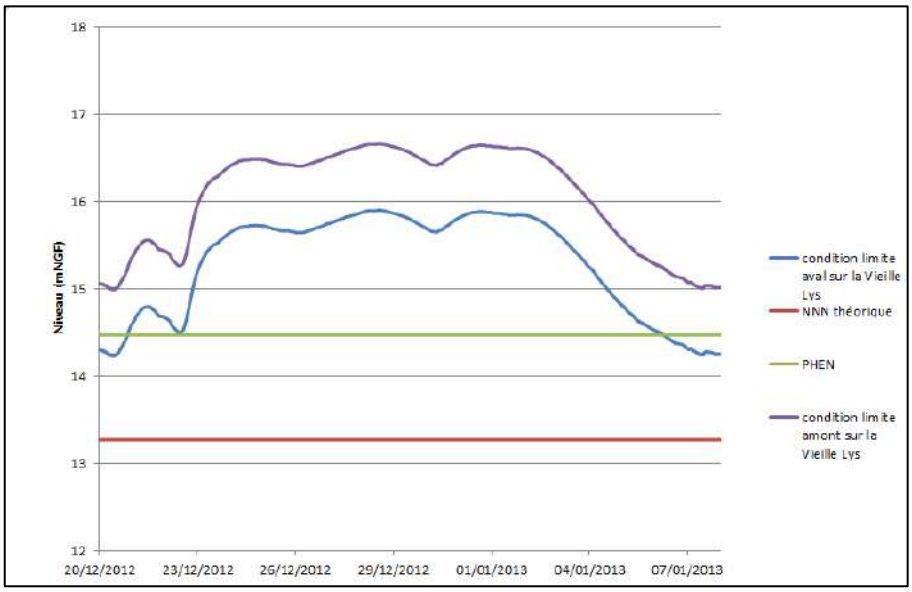


Figure 32 : Niveau de la Lys canalisée à l'aval de l'écluse de Merville et niveau de la Clarence à la confluence avec la Vieille Lys lors de l'épisode de décembre 2012

Conditions limites sur la Busnes

De même sur la Busnes, les hauteurs d'eau en aval des écluses de Saint-Venant sont connues pour les évènements suivants :

- décembre 1999,
- juillet 2005,
- juillet 2007,
- mars 2012,
- décembre 2012,

Le niveau en PHEN à l'aval de l'écluse de Saint-Venant vaut 15,80 m et le niveau normal de navigation (NNN) dans le bief est de 15,50 m.

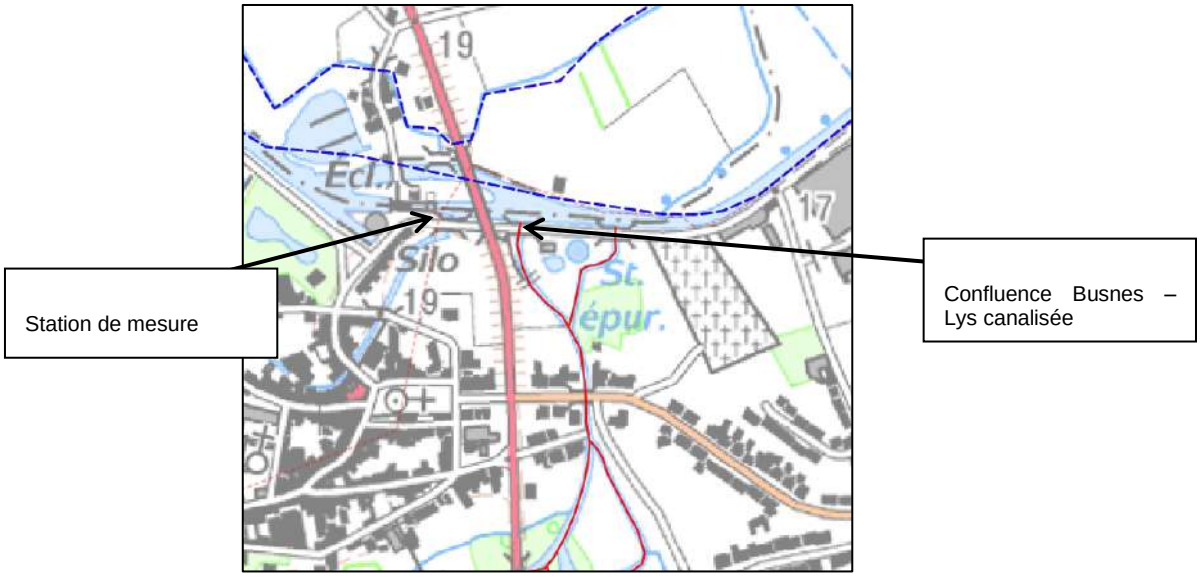


Figure 33 : Confluence Busnes – Lys canalisée

La station de mesure étant située à une centaine de mètres à l'amont de la confluence Busnes- Lys canalisée, les données fournies seront utilisées pour caractériser les conditions aval sur la Busnes.

La figure suivante illustre la condition aval au niveau de l'écluse de St-Venant lors de l'épisode de décembre 2012.

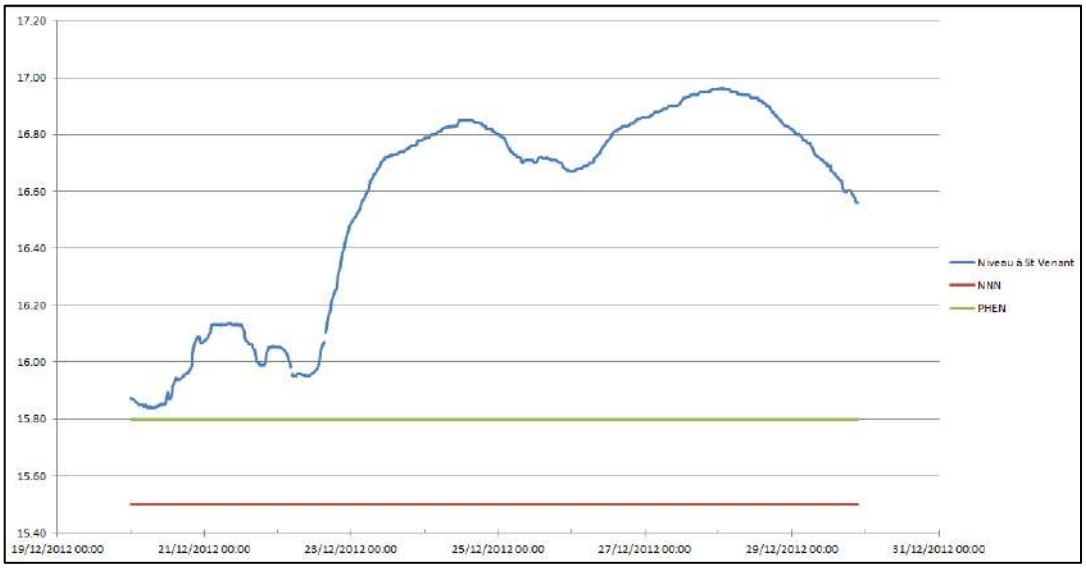


Figure 34 : Niveau de la Lys canalisée à l'aval de l'écluse de St Venant lors de l'épisode de mars 2012

4.7.3 Prise en compte de ces conditions aux limites dans le modèle TELEMAC

Les différentes conditions aux limites sont illustrées par la figure suivante. Les points verts symbolisent les points d'injections de débits intermédiaires, les points bleus les frontières avec débits imposés et les points rouges les hauteurs d'eau imposées.

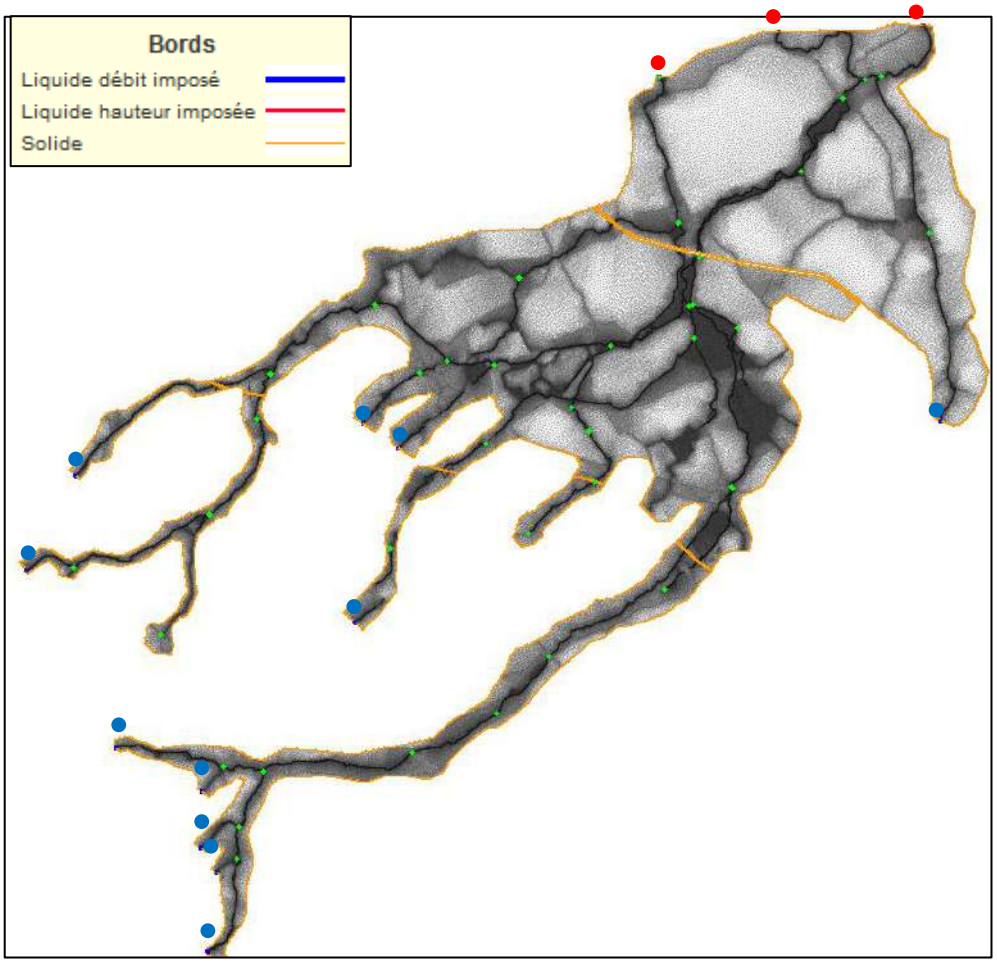


Figure 35 : Conditions aux limites du modèle TELEMAC2D

4.7.4 Coefficients de frottements

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

Le zonage des coefficients est réalisé en fonction de l'occupation des sols. Les choix des coefficients initiaux à retenir pour chaque classe d'occupation des sols sont basés sur des retours d'expériences.

4 grandes catégories ont été retenues :

- les zones boisées avec un coefficient de Strickler de 8
- les zones de bâti avec un coefficient de Strickler de 10
- le lit majeur avec un coefficient de Strickler de 12
- les lits mineurs avec un coefficient de Strickler de 25

Ces coefficients de Strickler font l'objet d'un calage sur une crue réelle, puis d'une validation sur une seconde crue.

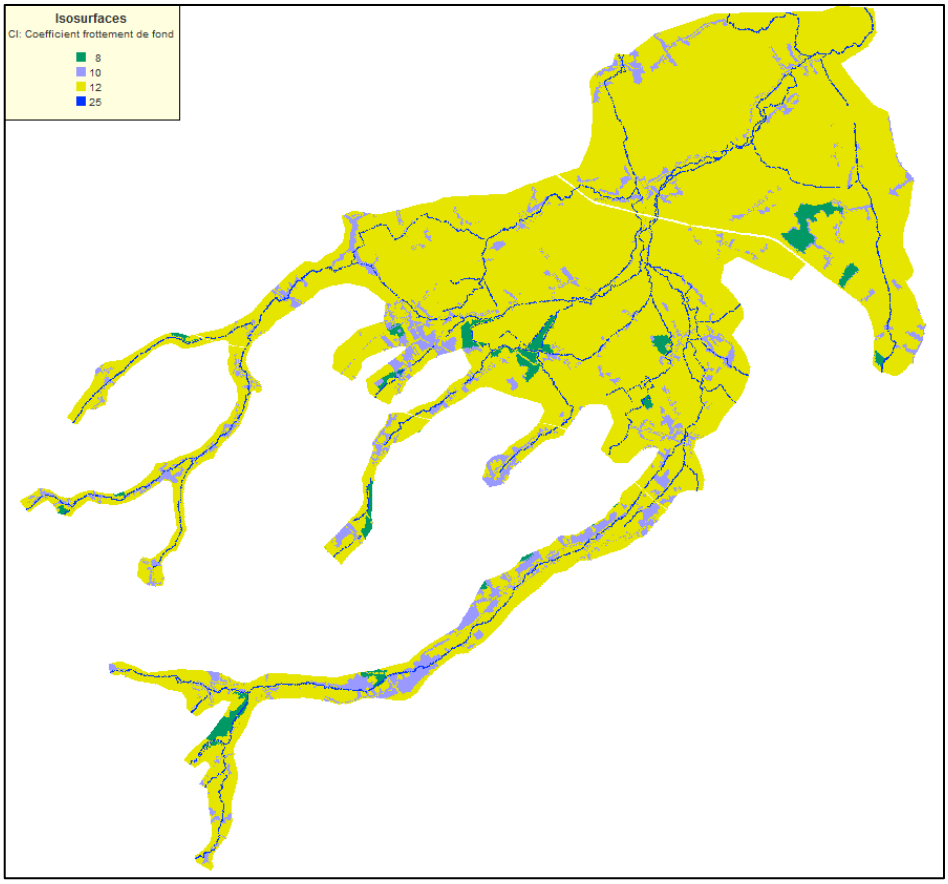


Figure 36 : Coefficients de Strickler de référence retenus

4.8 Calage de la crue de mai 2016 sur la Clarence amont

4.8.1 Emprise

L'emprise du modèle considéré est la suivante.

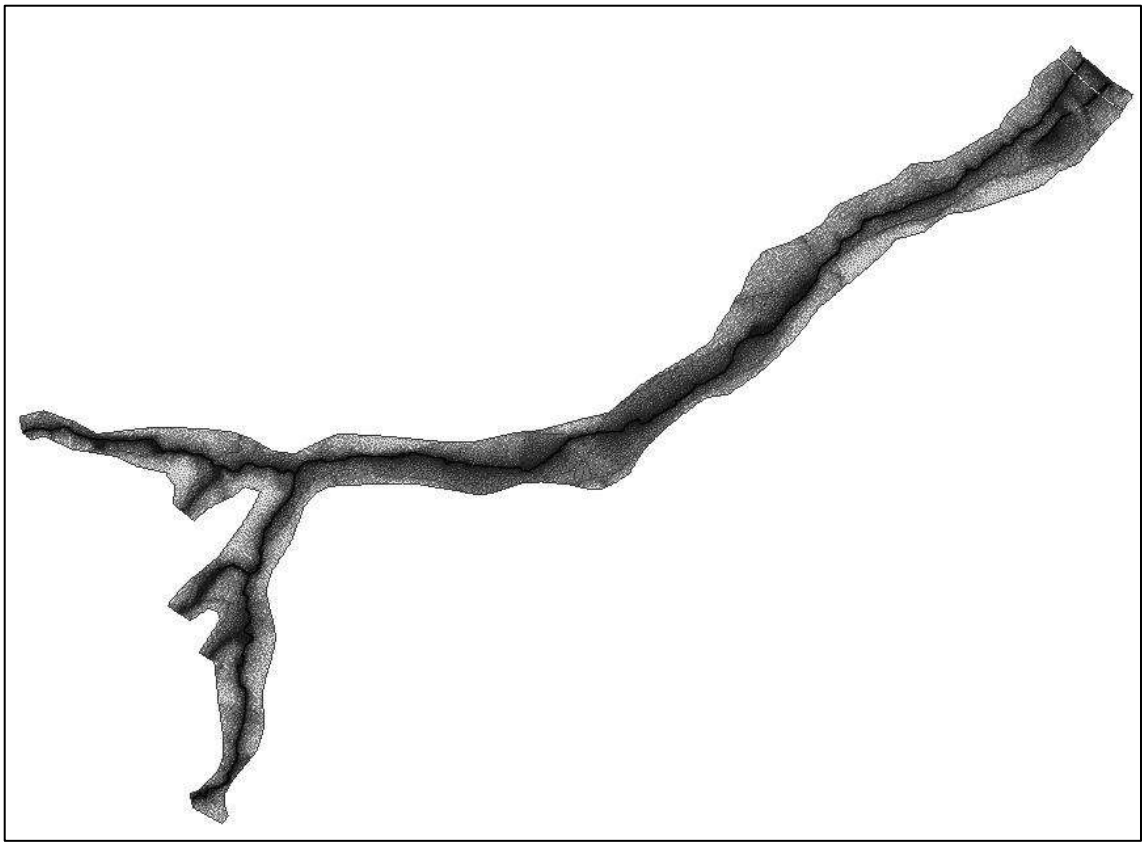


Figure 37 : Emprise et maillage du modèle de la Clarence amont

Le maillage est le même que celui du modèle global. Il est composé de 102 093 nœuds. La limite aval se situe au nord de l'autoroute A26. Cette limite permet de réduire l'influence du choix des conditions limites aval ; une section de contrôle existe au passage de la Clarence et de la Calonnette sous l'autoroute par des buses.

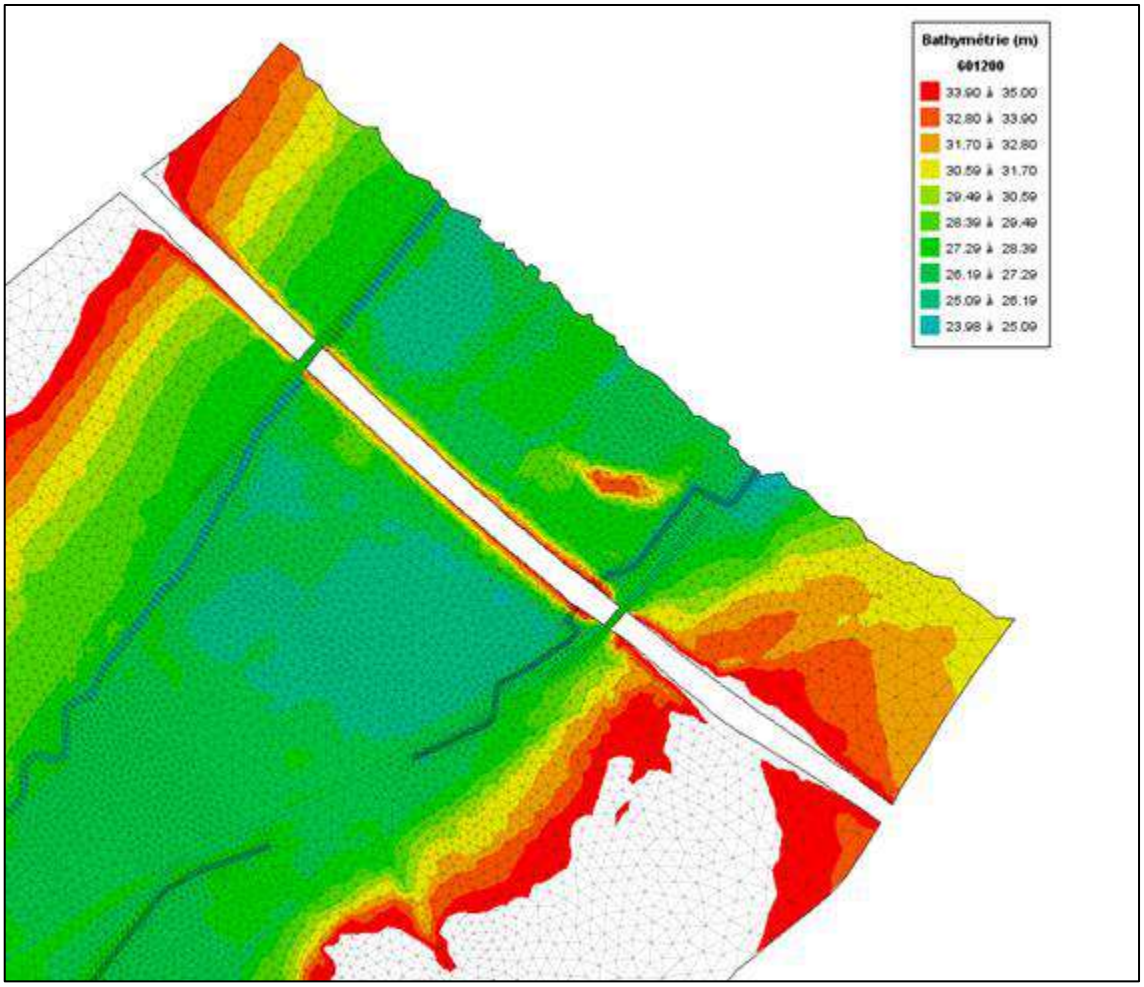


Figure 38 : Zoom sur le maillage en aval du modèle

4.8.2 Topographie utilisée

Pour rappel, la topographie utilisée en lit majeur est celle issue du LIDAR au pas d'espace de 50cm.

Pour la bathymétrie des lits mineurs, les profils en travers levés lors des campagnes topographiques sont interpolés linéairement via le logiciel HEC-RAS puis intégrés au modèle TELEMAC.

Le profil en long sur la Clarence est le suivant.

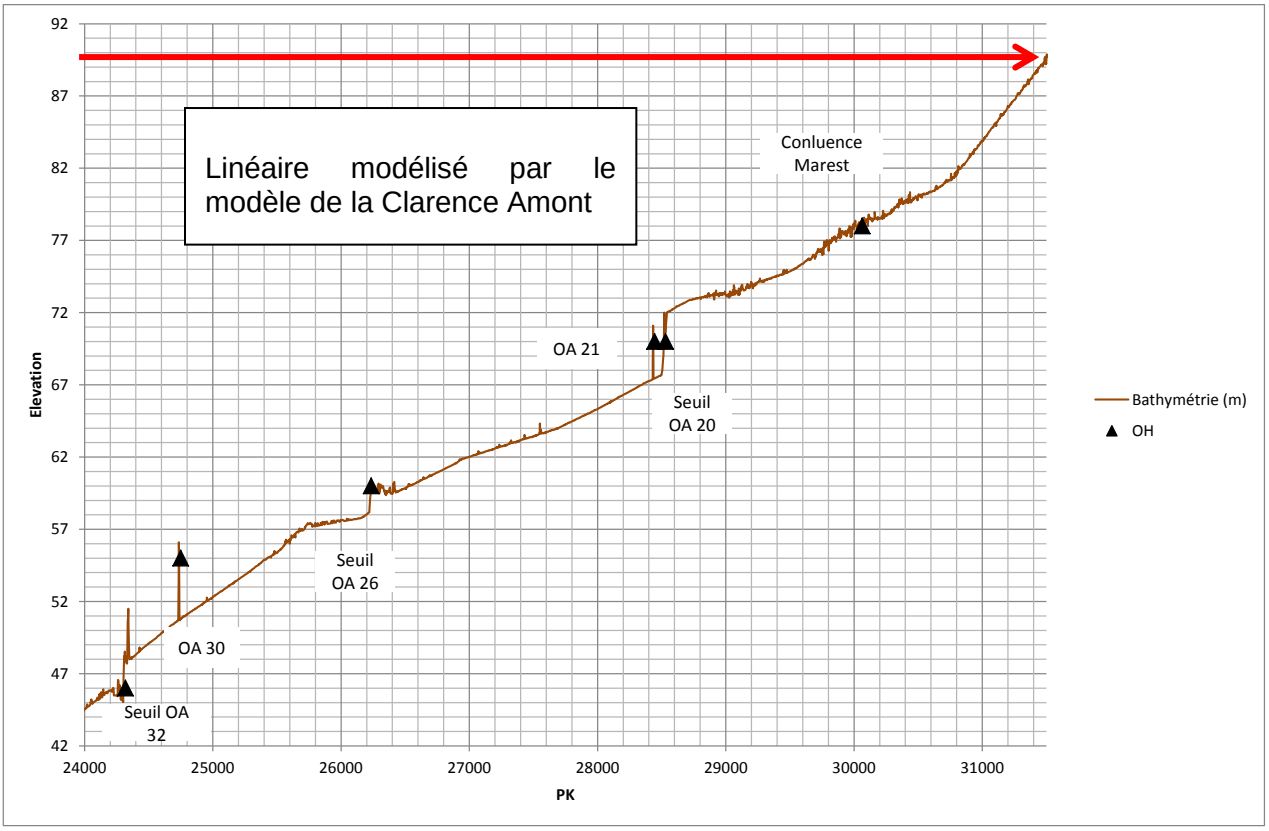


Figure 39 : Profil bathymétrique de la Clarence amont – Partie amont

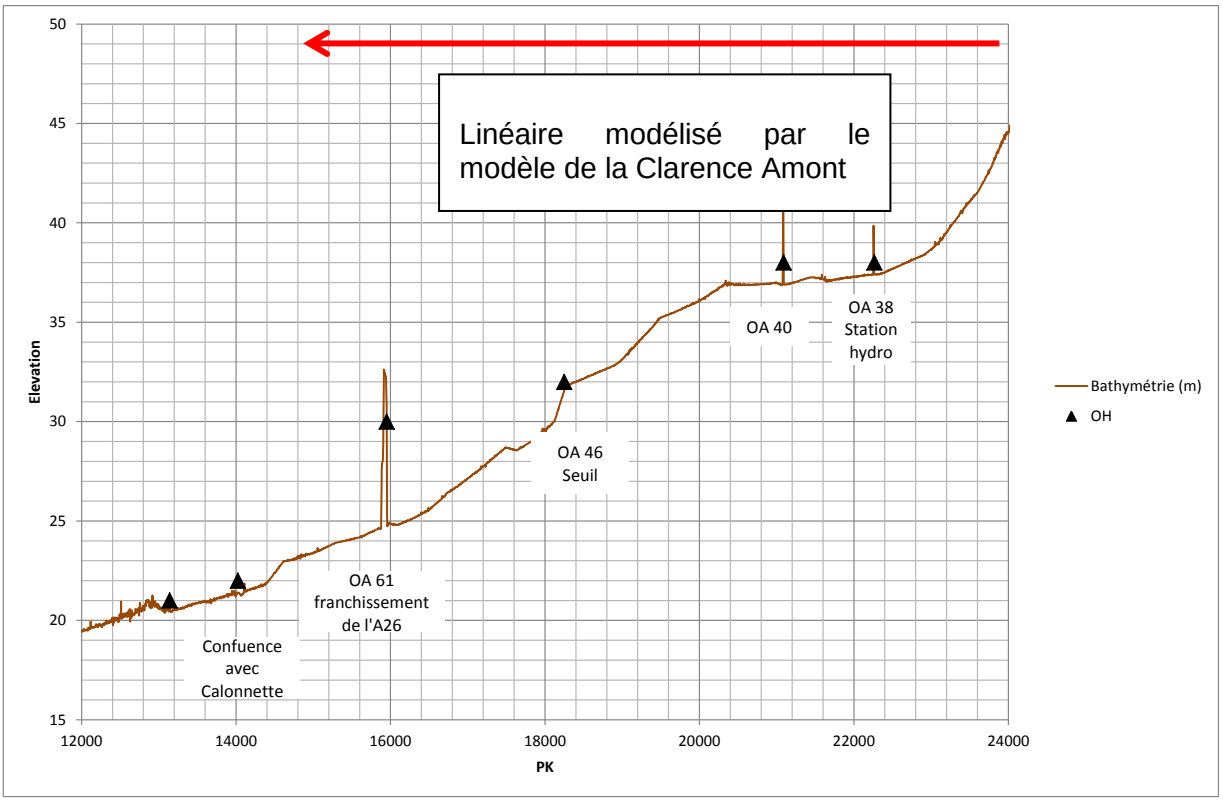


Figure 40 : Profil bathymétrique de la Clarence amont – Partie aval

Suite aux premières simulations, un soin particulier a été apporté à la modélisation des moulins en particulier celui situé sur la commune du Marest en aval de la confluence

entre le Marest et le Pressy. Lors des campagnes topographiques, les ouvrages (de type seuil) situés sur les bras usiniers ont été levés. En revanche, les bras de décharge, qui, en crue, assurent le transit de la majeur partie du débit n'ont pas été levés. A partir des visites et des données Lidar, la bathymétrie a été localement modifiée au droit de ces moulins afin de prendre en compte les réalités du terrain.

4.8.3 CONDITIONS LIMITES

4.8.3.1 Conditions limites amont

Les hydrogrammes ont été déterminés à l'aide du modèle hydrologique GR4. Ce modèle utilise des pluies horaires qui ont été reconstituées à l'aide des images radar.

Pour rappel, la figure ci-dessous présente l'hydrogramme simulé par le modèle hydrologique (en bleu) et l'hydrogramme observé (en vert) à la station de Marles. On constate une représentation correcte avec une surestimation des débits à partir du milieu de la décrue.

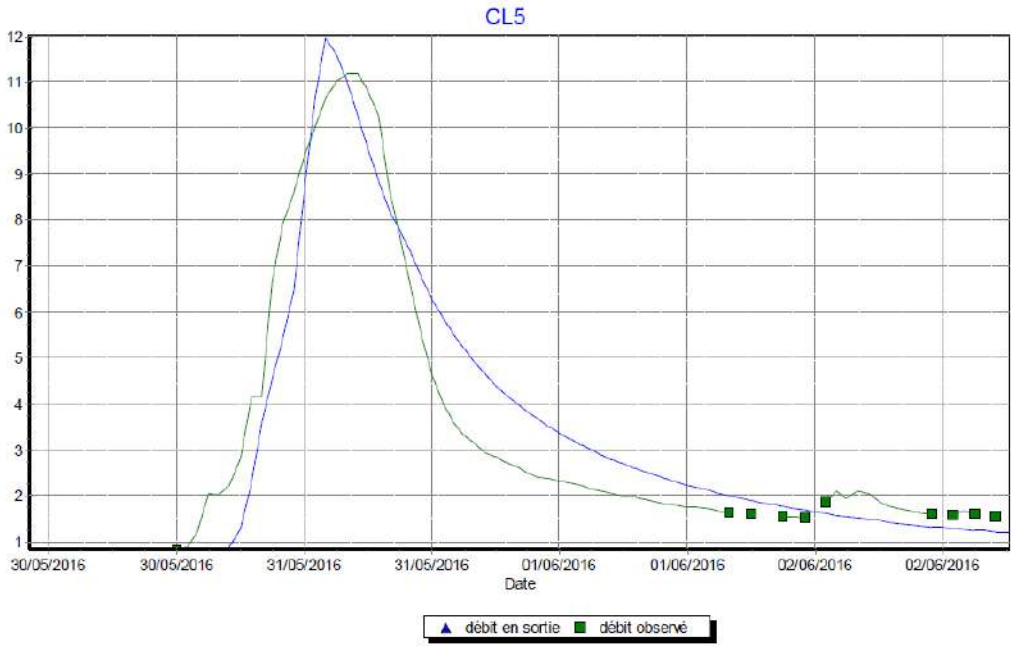


Figure 41 : hydrogrammes observé et simulé par GESRES

Pour les conditions amont, les débits simulés par GESRES sont injectés en tête de bassin ainsi qu'aux points d'apports intermédiaires (types confluences).

4.8.3.2 Conditions limites aval

Les conditions limites aval au niveau de la Clarence et de la Calonnette sont imposées par des courbes de tarage issues du modèle global.

4.8.4 Données de calage disponibles pour mai 2016

4.8.4.1 Station de Marles

Les graphiques ci-dessous rappellent les données observées à la station de Marles. Ces graphiques tiennent compte du changement de courbe de tarage.

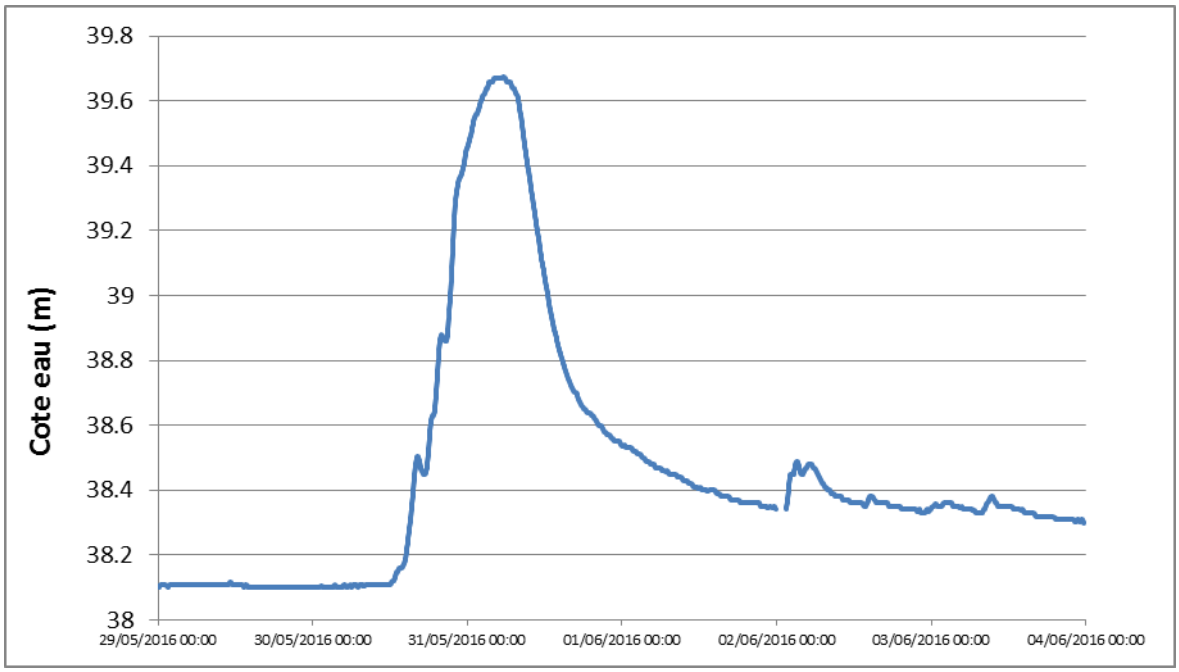


Figure 42 : Limnigramme observé à la station de Marles-les-Mines

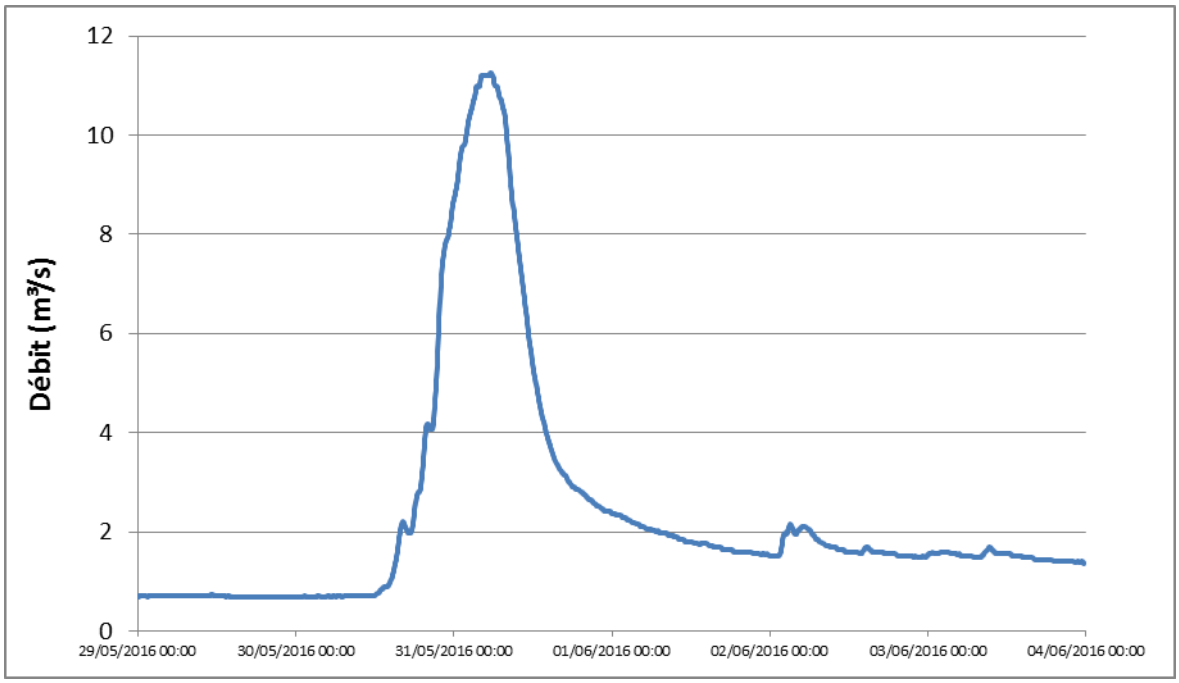
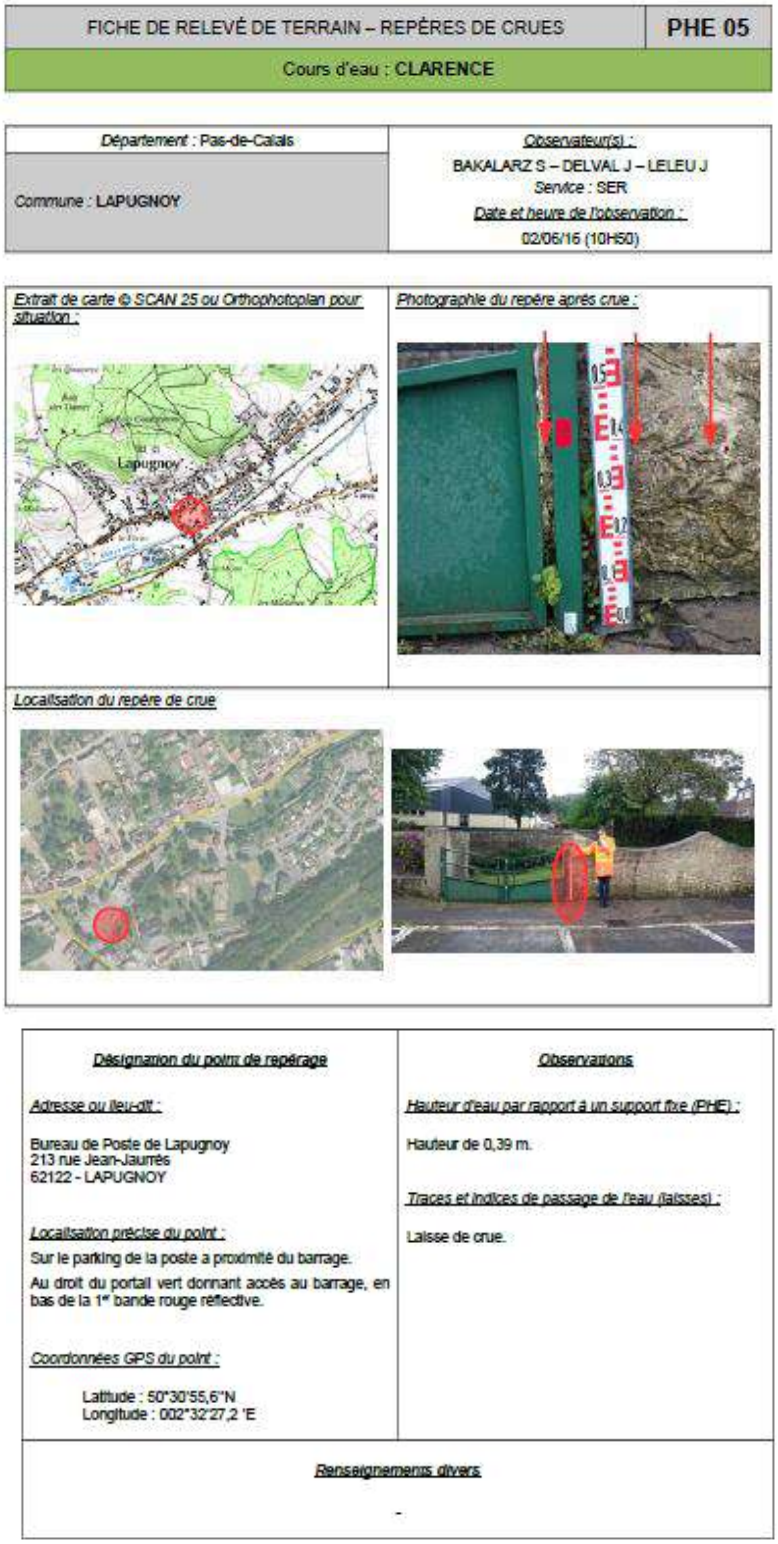


Figure 43 : Hydrogramme observé à la station de Marles-les-Mines

4.8.4.2 Données quantitatives disponibles

Les repères de crue disponibles pour mai 2016 sont situés sur les communes de Lapugnoy et de Calonne – Ricouart. Pour chaque commune, la hauteur au-dessus du TN est mesurée :



FICHE DE RELEVÉ DE TERRAIN – REPÈRES DE CRUES	PHE 05
Cours d'eau : CLARENCE	

Département : Pas-de-Calais	Observateur(s) : BAKALARZ S – DELVAL J – LELEU J Service : SER Date et heure de l'observation : 02/06/16 (10H50)
Commune : LAPUGNOY	

Extrait de carte © SCAN 25 ou Orthophotoplan pour situation :

Photographie du repère après crue :

Localisation du repère de crue

Désignation du point de repérage	Observations
Adresse ou lieu-dit : Bureau de Poste de Lapugnoy 213 rue Jean-Jaurrès 62122 - LAPUGNOY	Hauteur d'eau par rapport à un support fixe (PHE) : Hauteur de 0,39 m.
Localisation précise du point : Sur le parking de la poste à proximité du barrage. Au droit du portail vert donnant accès au barrage, en bas de la 1re bande rouge réflective.	Traces et indices de passage de l'eau (laisses) : Laisse de crue.
Coordonnées GPS du point : Latitude : 50°30'55,6"N Longitude : 002°32'27,2 'E	
Renseignements divers -	

Figure 44 : exemple de fiche de relevé de repère de crue

Un levé topographique des cotes atteintes a été réalisé en mars 2017.

Les cartes ci-dessous précisent leur situation et les hauteurs d'eau observée. Des photos accompagnent également ces données.

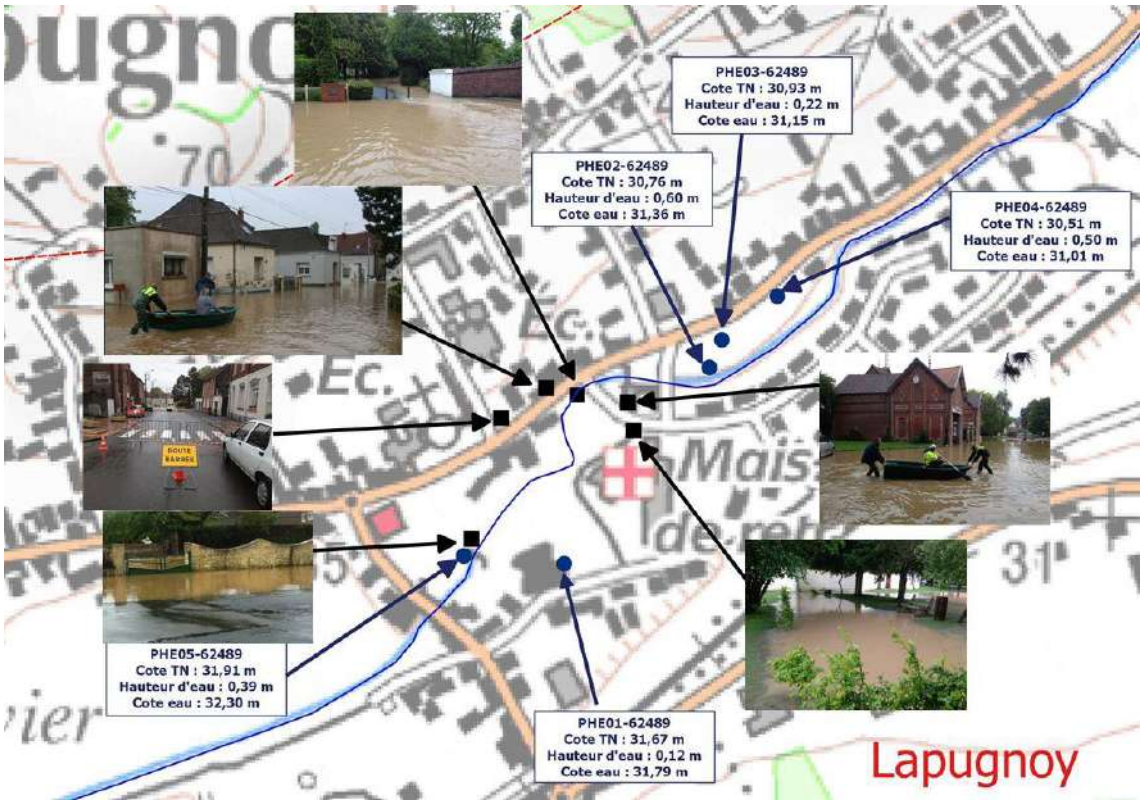


Figure 45 : Carte de situation des données collectées pour mai 2016 sur Lapugnoy (source photo : Cerema)

On constate une variation de la hauteur d'eau de 57 cm entre les points 1 et 2 ce qui traduit des pertes de charges singulières au passage des ouvrages de franchissement.

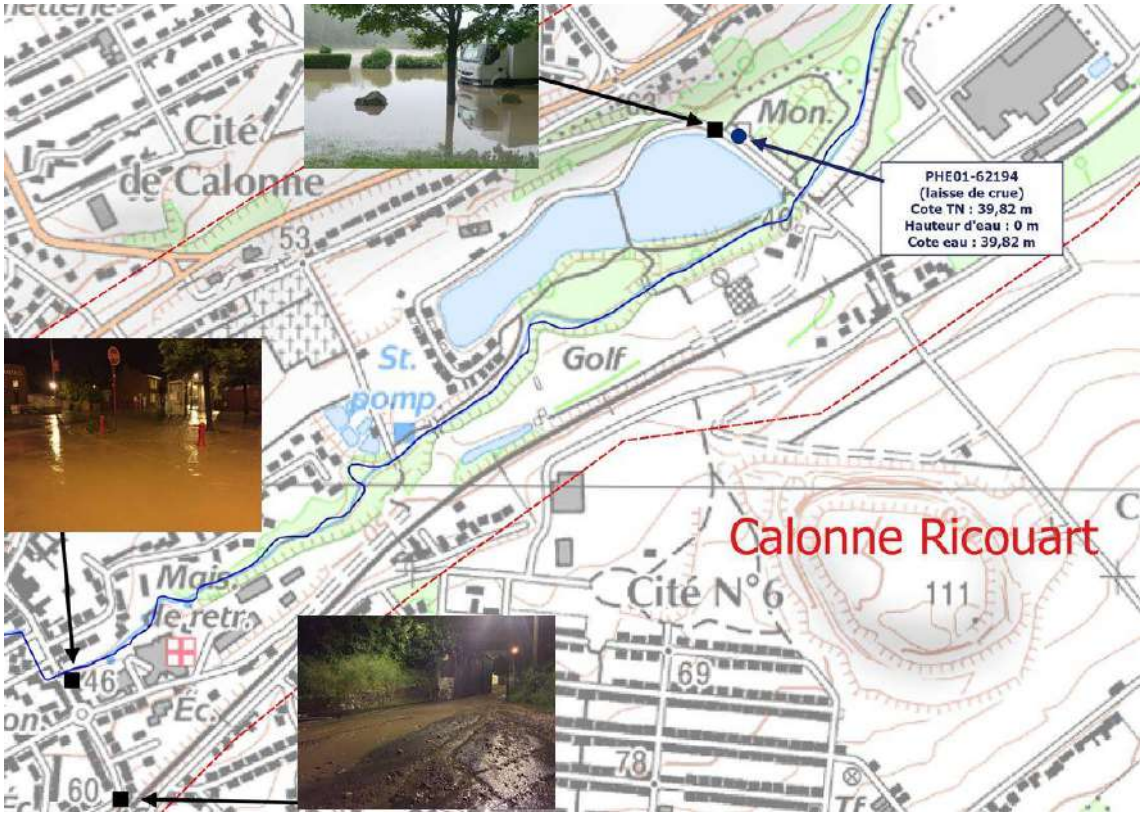


Figure 46 : Carte de situation des données collectées pour mai 2016 sur Calonne Ricouart (source photo : Cerema)

Sur la commune de Calonne – Ricouart, une laisse de crue indique que le monument situé sur la route-digue n'a pas été inondé. En revanche la route a bien été submergée.

4.8.4.3 Retours des communes

Les données collectées par le SYMSAGEL pour mai 2016 indiquent que les communes du Marest et de Lapugnoy ont été touchées. Ces données restent qualitatives.

4.8.5 RESULTATS

4.8.5.1 Calage en lit mineur à la station de Marles-les-Mines

Le graphe ci-après présente en superposition l'hydrogramme issu du modèle et l'hydrogramme observé. Nous retrouvons une décrue plus lente résultant du modèle hydrologique (et donc un volume supérieur dans les bas débits) et une phase de crue satisfaisante :

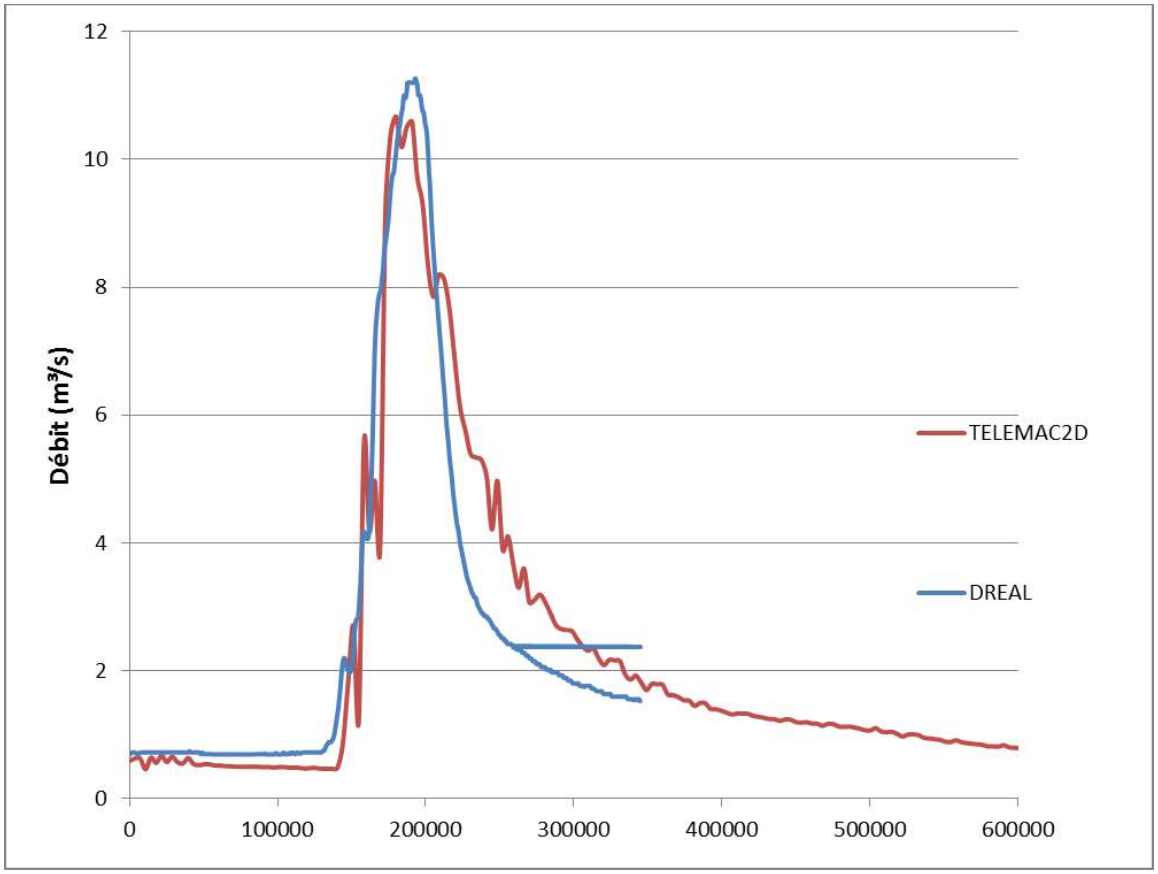


Figure 47 : Comparaison des hydrogrammes observés et simulés à la station de Marles

4.8.5.2 Limnigramme et courbe de tarage à Marles

Le comparatif des limnigrammes montre la bonne concordance en phase de montée et une descente plus lente. Les débits de l'hydrogramme se superposent bien avec la courbe de tarage.

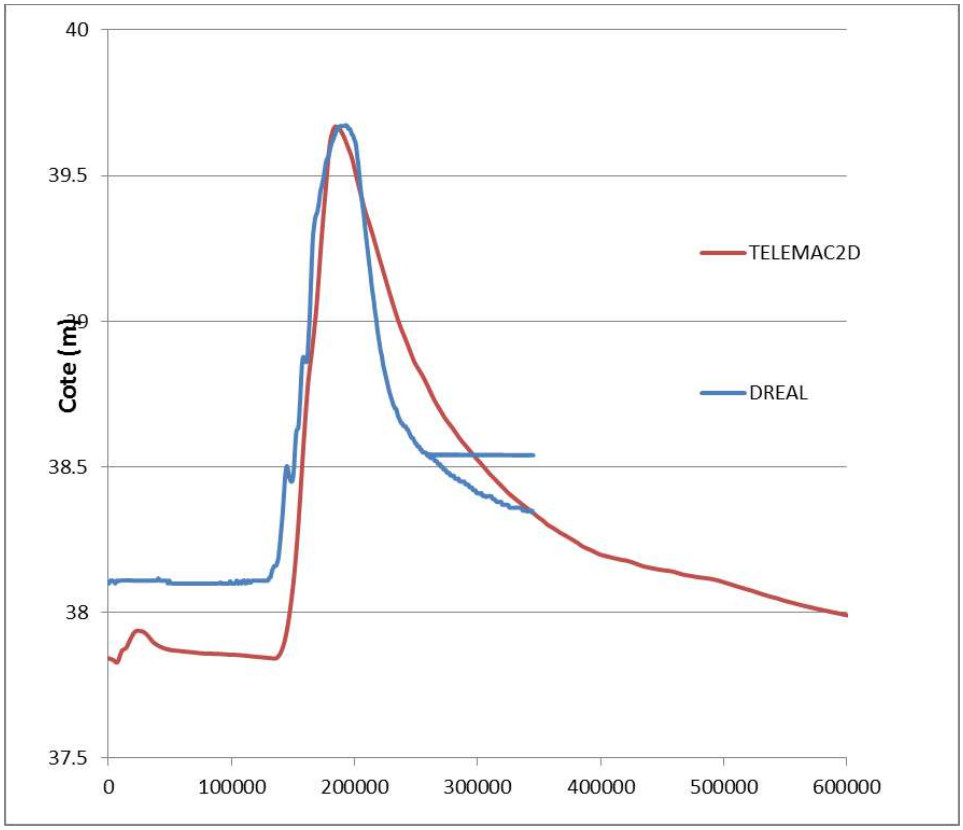


Figure 48 : Comparaison des limnigrammes observés et simulés à la station de Marles

Le graphe ci-après présente en superposition les jaugeages réalisés en mai 2016 et les résultats de Telemac :

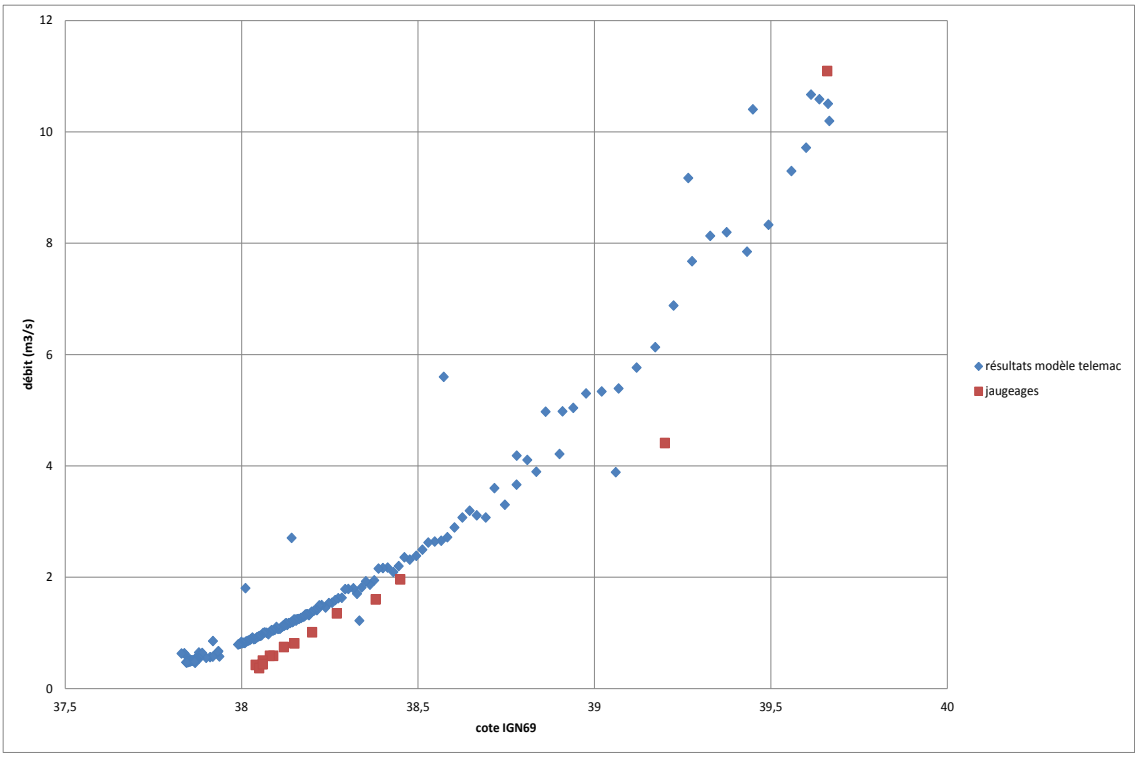
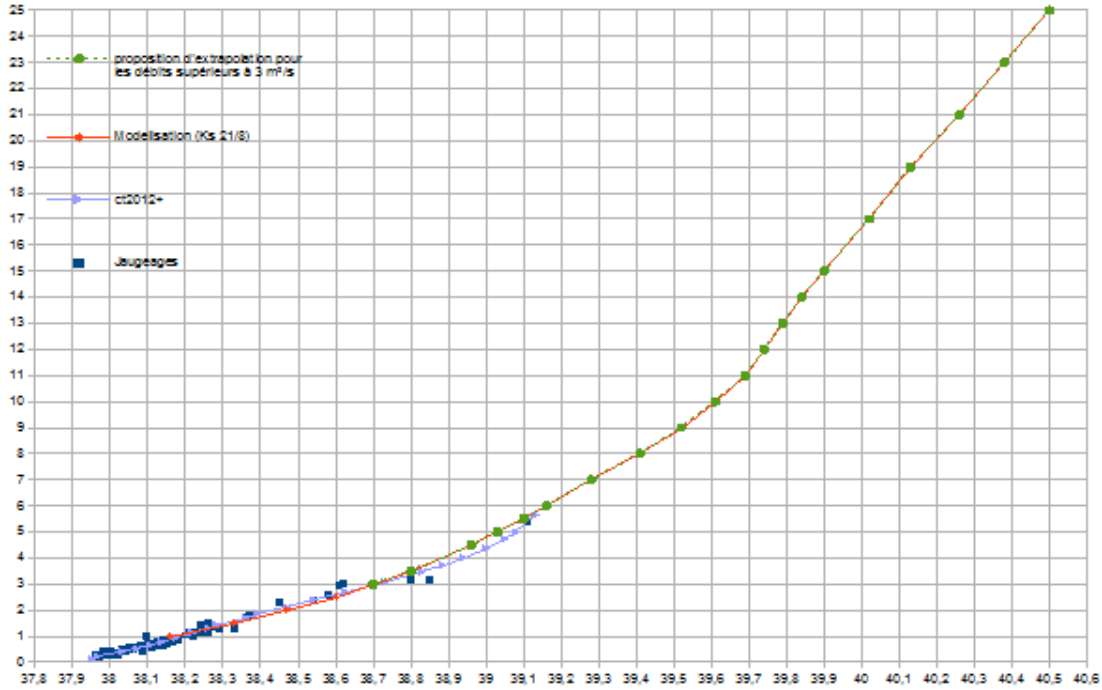


Figure 49 : jaugeages rouge) et résultats du modèle (bleu) à la station de Marles

Les résultats de Telemac coïncident bien avec la courbe de tarage validée par la Dreal suite à crue de mai 2016.



4.8.5.3 Repères de crue en lit majeur et zones inondées

La figure suivante présente l'emprise de la zone inondée au droit de l'étang de Quenehem (comparatif simulé/observé).

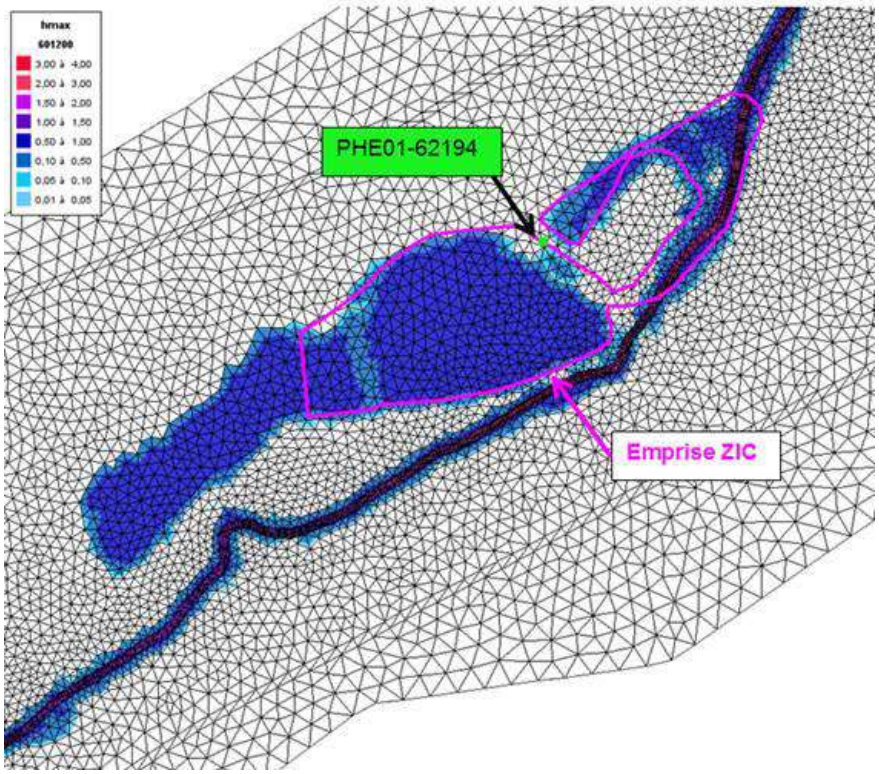


Figure 50 : Emprise de la zone inondable maximale – Etang de Quenehem

Le tableau suivant expose les résultats en lit majeur. En rive gauche, les cotes simulées sont cohérentes avec les valeurs observées.

POINT	COMMUNE	Z BATHY (m)	Z eau obervé (m)	Z eau simulé (m)	Différence (m)
PHE01-62194	CALONNE-RICOUART	39,82	39,82		
PHE01-62489	LAPUGNOY	31,67	31,79	31,99	0,20
PHE02-62489	LAPUGNOY	30,76	31,36	31,31	-0,05
PHE03-62489	LAPUGNOY	30,93	31,15	31,30	0,15
PHE04-62489	LAPUGNOY	30,51	31,01	31,30	0,29
PHE05-62489	LAPUGNOY	31,91	32,30	32,24	-0,06

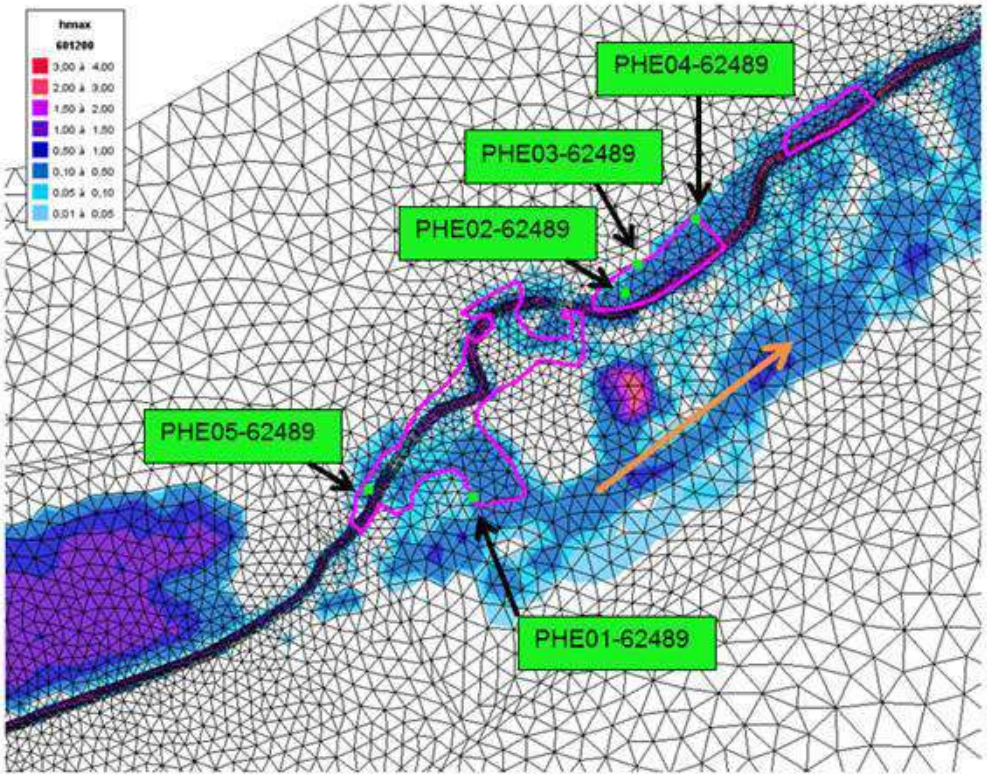


Figure 51 : repères à Lapugnoy – tableau des différences entre mesures et estimations

La différence de cote entre les points amont est bien reproduite. Elle s'explique par les pertes de charge singulières dans cette partie : présence d'une chute conséquente puis passage dans un ouvrage.

Dissipation locale d'énergie à l'aval de l'ouvrage	Puis entrée dans un ouvrage de franchissement

Figure 52 : ouvrages dans la traversée de Lapugnoy

Concernant le passage dans la rue de la résidence fleurie, la topographie permet un passage dans la rue mais ce débit faible est repris par le réseau de la Calonnette.

Figure 53 : un point bas forme une concavité de la route sur une 50 aine de mètres – les eaux sont reprises par le réseau

4.8.5.4 Informations qualitatives (cf annexes cartographiques : dynamique de la crue et pertes de charges)

Marest

Pour Mai 2016, le constat est le suivant : « débordement de la Clarence, rétention due à la montée en charge au niveau du pont »

La perte de charge estimée par le modèle est de 32 cm et l'eau monte sur la route. Nous reproduisons bien les constatations.

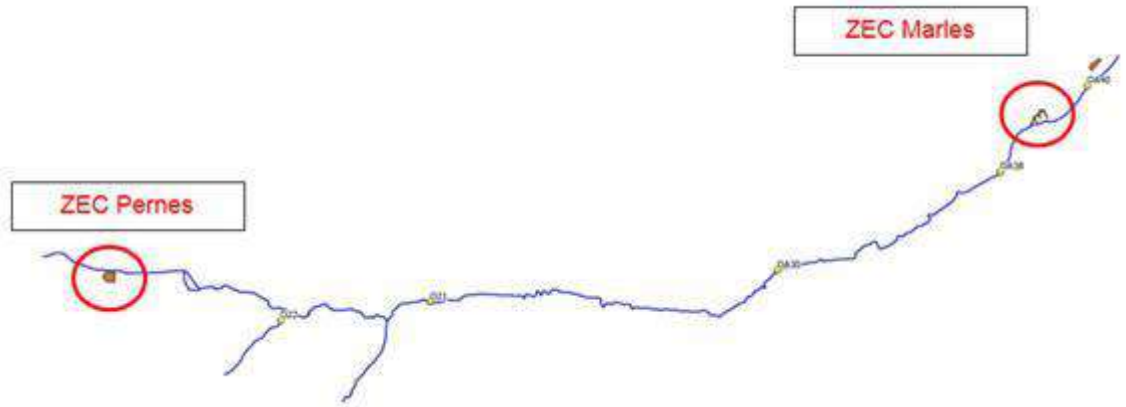
Zec de Labeuvrières

Le constat est le suivant : «aurait du fonctionner, car débordement important à l'aval! »

En amont, une partie du débit rejoint la Calonnette. Le modèle inonde le lit majeur et la Zec n'est pas mise en fonctionnement.

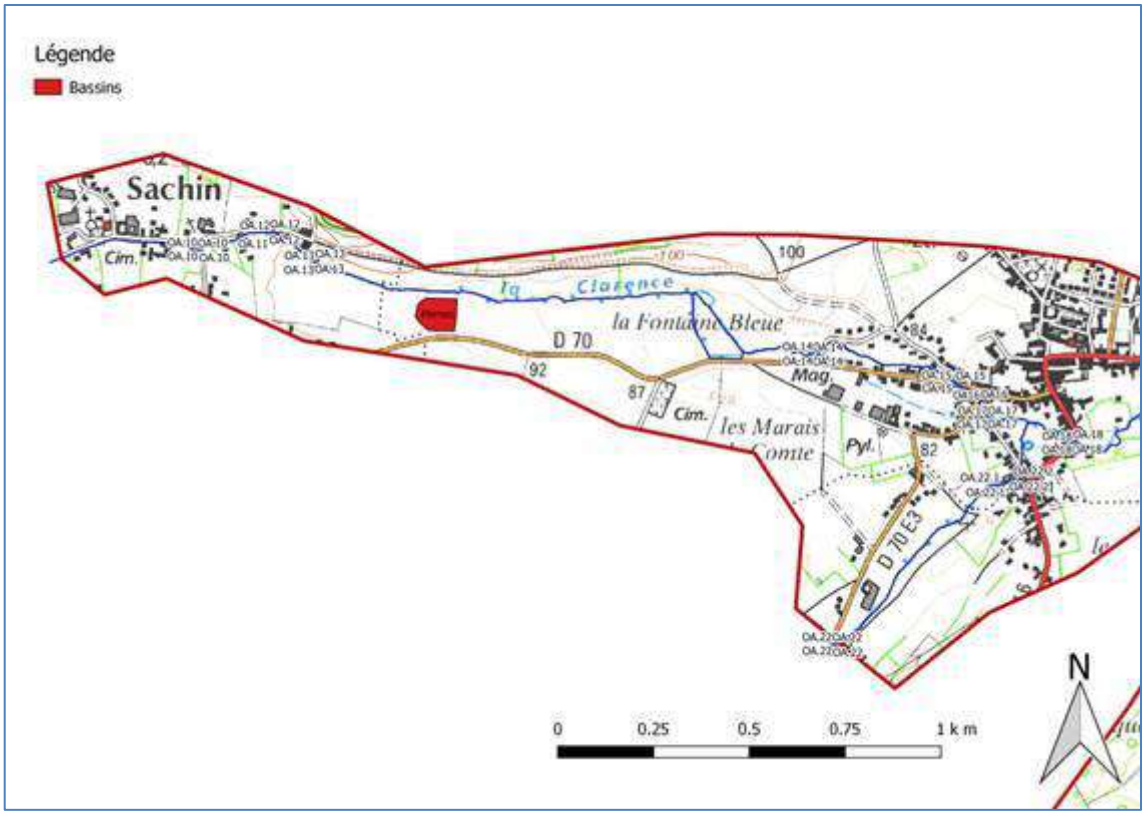
Résultats du modèle au droit des autres Zecs et confrontation aux observations

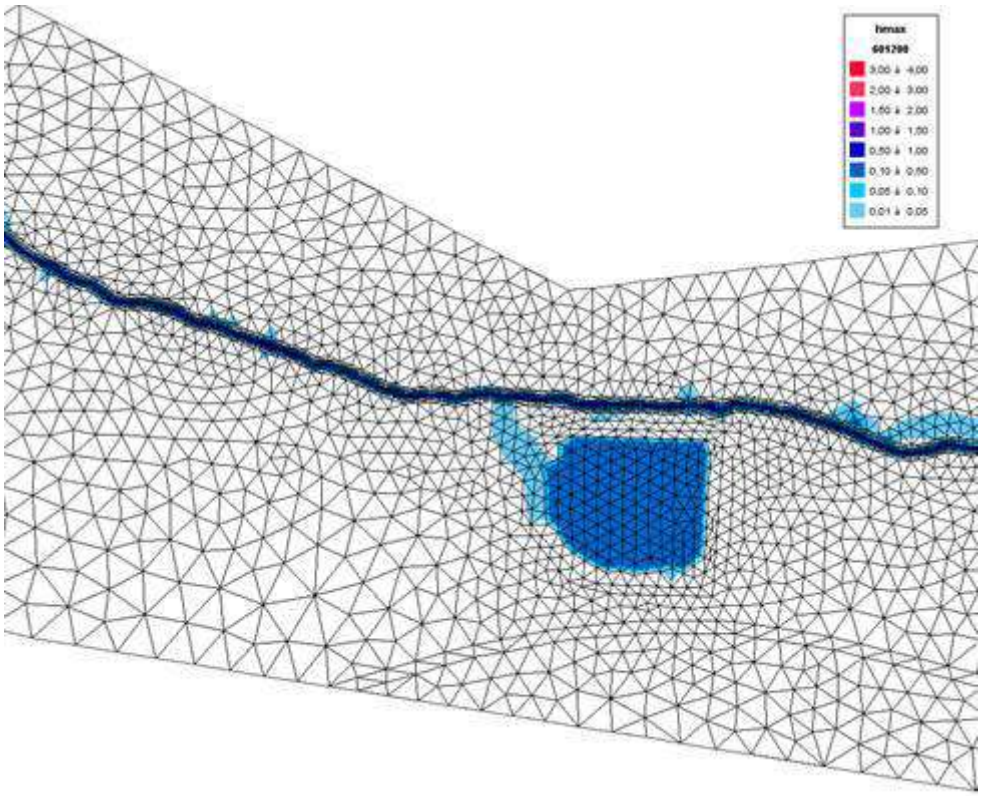
Deux Zecs sont localisées dans le bassin amont de la Clarence : celle de Pernes et celle de Marles :



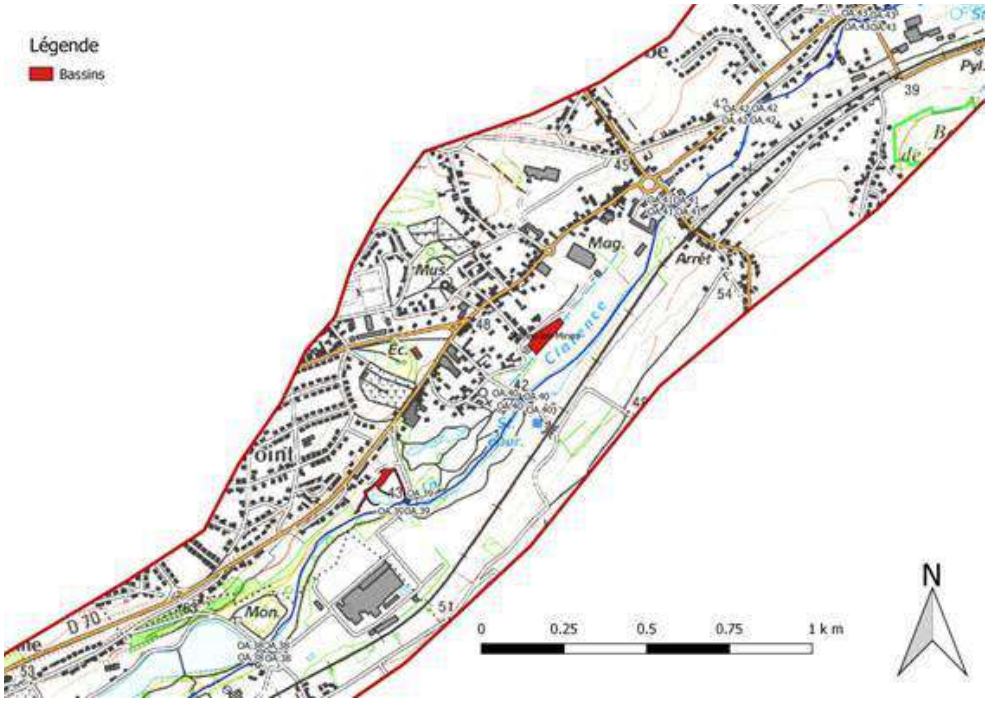
Les seuls éléments de connaissance sont qu'elles ont toutes deux fonctionné.

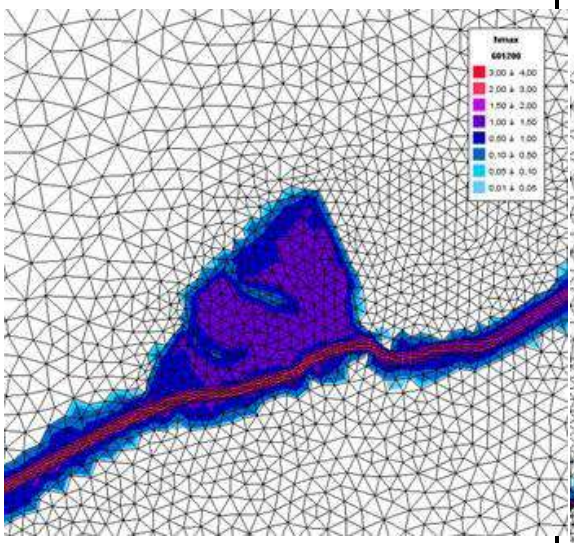
Le modèle conduit à un remplissage de la retenue de Pernes avec une cote atteinte de 93,5 mNGF et un volume d'environ 1500 m3.

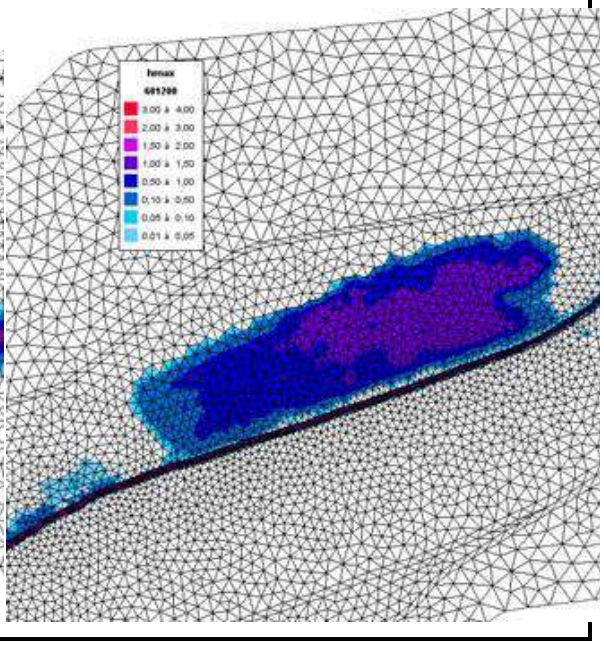




Sur Marles, les deux Zecs se remplissent.







4.8.6 Conclusions concernant le calage de la Clarence amont sur la crue de mai 2016

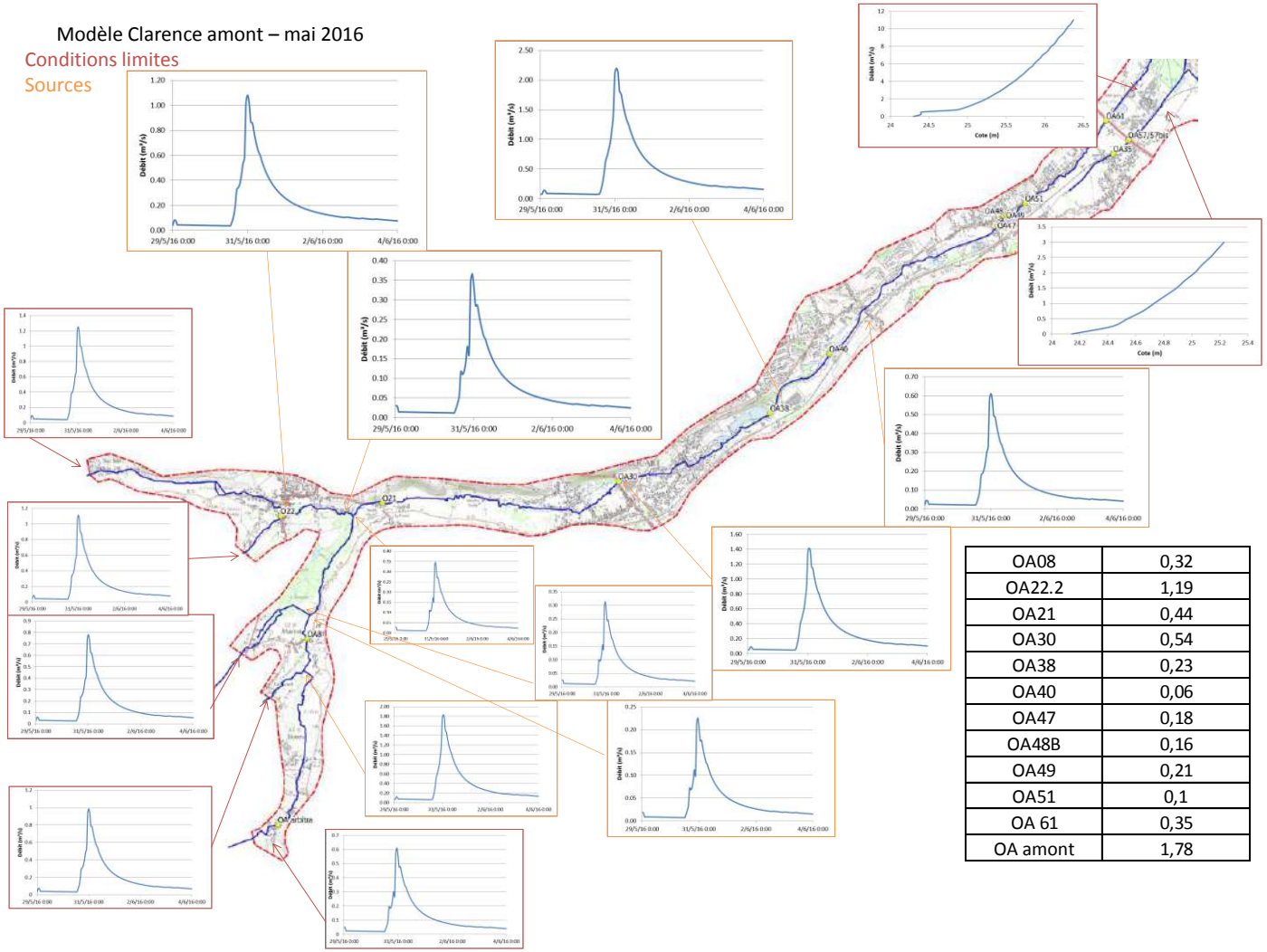
La simulation de la crue de mai 2016 donne des résultats satisfaisants. Les coefficients de strickler initiaux basés sur les caractéristiques géomorphologiques ont été retenus.

Les laisses de crue sur Lapugnoy et Calonne Ricouart sont convenablement reproduites. Les observations générales rapportées par les communes sont globalement bien représentées.

Modèle Clarence amont – mai 2016

Conditions limites

Sources



OA08	0,32
OA22.2	1,19
OA21	0,44
OA30	0,54
OA38	0,23
OA40	0,06
OA47	0,18
OA48B	0,16
OA49	0,21
OA51	0,1
OA 61	0,35
OA amont	1,78

4.9 Calage de la crue de décembre 2012 sur la Clarence amont

4.9.1 Conditions limites amont

Les hydrogrammes ont été déterminés à l'aide du modèle hydrologique GR4.

Pour rappel, la figure ci-dessous présente l'hydrogramme simulé par le modèle hydrologique (en bleu) et l'hydrogramme observé (en vert) à la station de Marles. On constate une représentation correcte avec une sous-estimation des débits sur le 2ème pic de crue et une légère sur estimation des débits sur le 3ème pic.

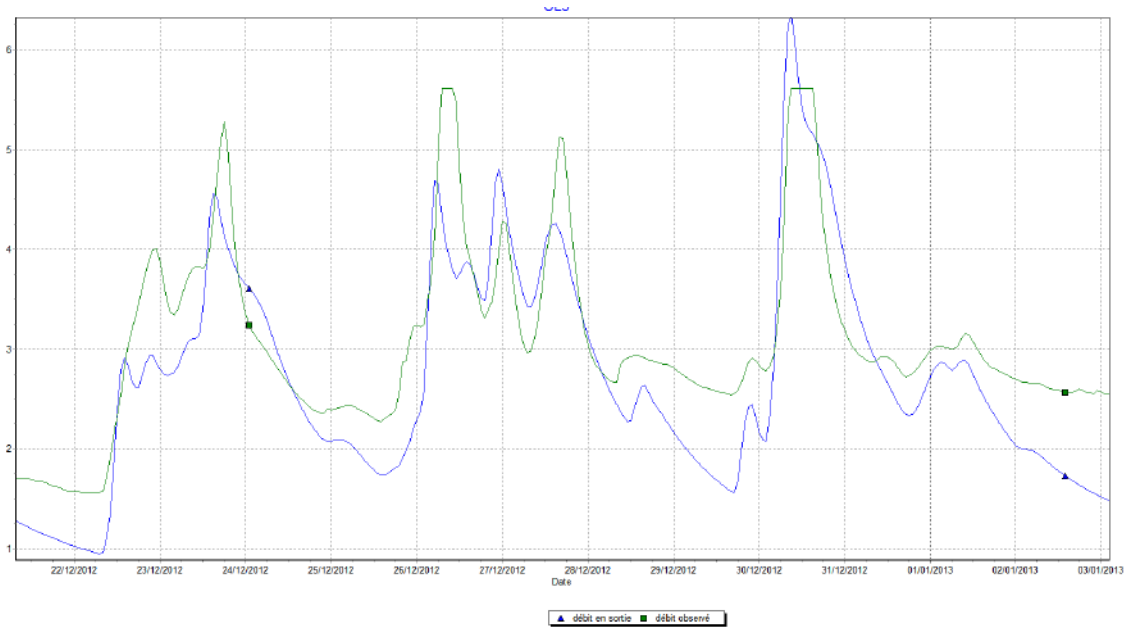


Figure 54 : Simulation GESRES

Pour les conditions amont, les débits simulés par GESRES sont injectés en tête de bassin ainsi qu'aux points d'apports intermédiaires (types confluences).

4.9.1.1 Conditions limites aval

Les conditions limites aval au niveau de la Clarence et de la Calonnette sont imposées par des courbes de tarage issues du modèle global.

4.9.2 Données de calage disponibles pour décembre 2012

Station de Marles

Les graphiques ci-dessous rappellent les données observées à la station de Marles. Ces graphiques tiennent compte du changement de courbe de tarage.

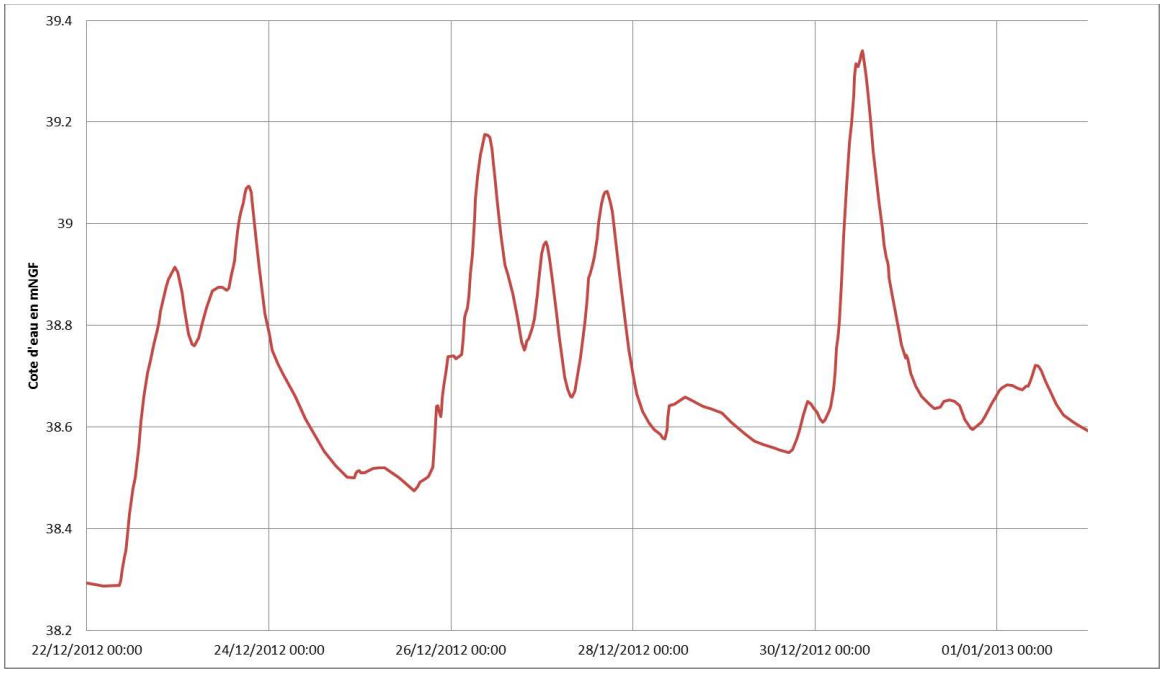


Figure 55 : Limnigramme observé à la station de Marles-les-Mines

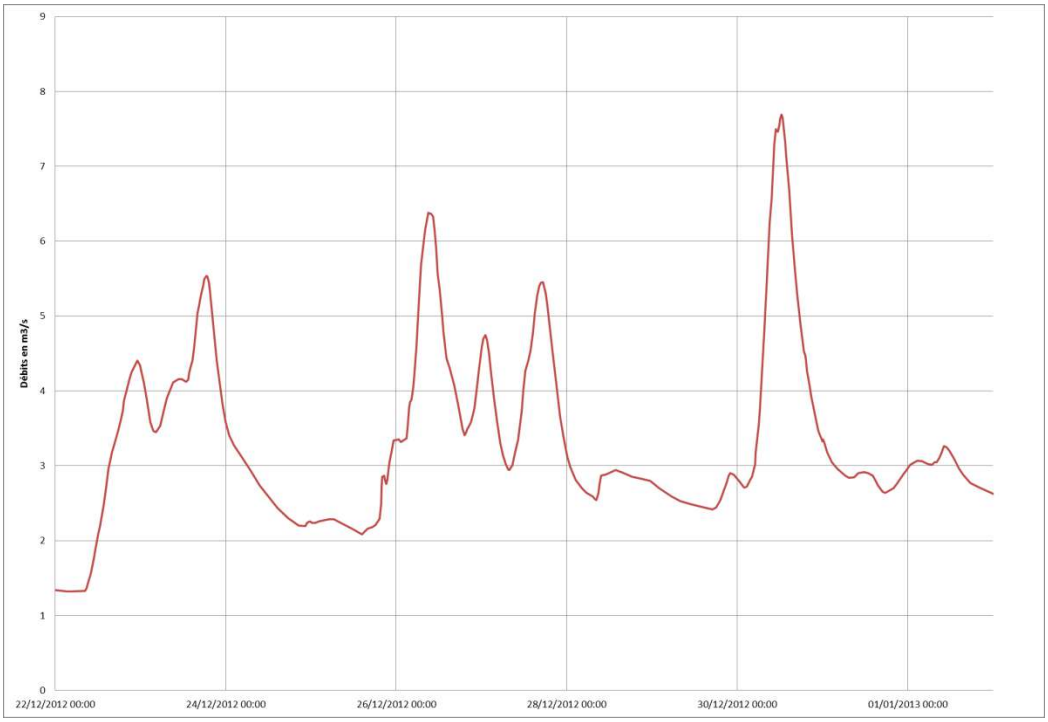


Figure 56 : Hydrogramme observé à la station de Marles-les-Mines

Retours des communes

Lors des enquêtes en communes, 4 communes font mention de la crue de décembre 2012.

- La commune de Calonne Ricouart indique qu'une possible manœuvre de VNF en aval couplé à des ruissellements auraient provoqué une montée de la Clarence : des fonds de jardins ont été inondés.

- La commune de Calonne sur la Lys évoque la crue de décembre 2012 sans autres commentaires.
- La commune de Gonnehem indique quelques centimètres d'eau dans les rues à Noël 2012.

La commune de Pernes indique une montée d'eau due à un arbre pris dans la vanne au moulin à la Ferté-Camblain.

Ces données restent qualitatives.

Pour ce modèle amont et la crue de décembre 2012, contrairement à la crue de mai 2016, seul un comparatif avec l'information à la station Dreal est possible.

4.9.3 Calage en lit mineur à la station de Marles-les-Mines

Hydrogramme à Marles

Le graphe ci-après présente en superposition l'hydrogramme issu du modèle hydraulique et l'hydrogramme observé. Pour des questions de temps de calcul, le premier pic n'est pas pris en compte et permet l'initialisation du modèle.

Globalement le modèle reproduit correctement l'hydrogramme mais la décrue est moins lissée. Cet effet est lié à la forme des hydrogrammes injectés provenant du modèle GR4.

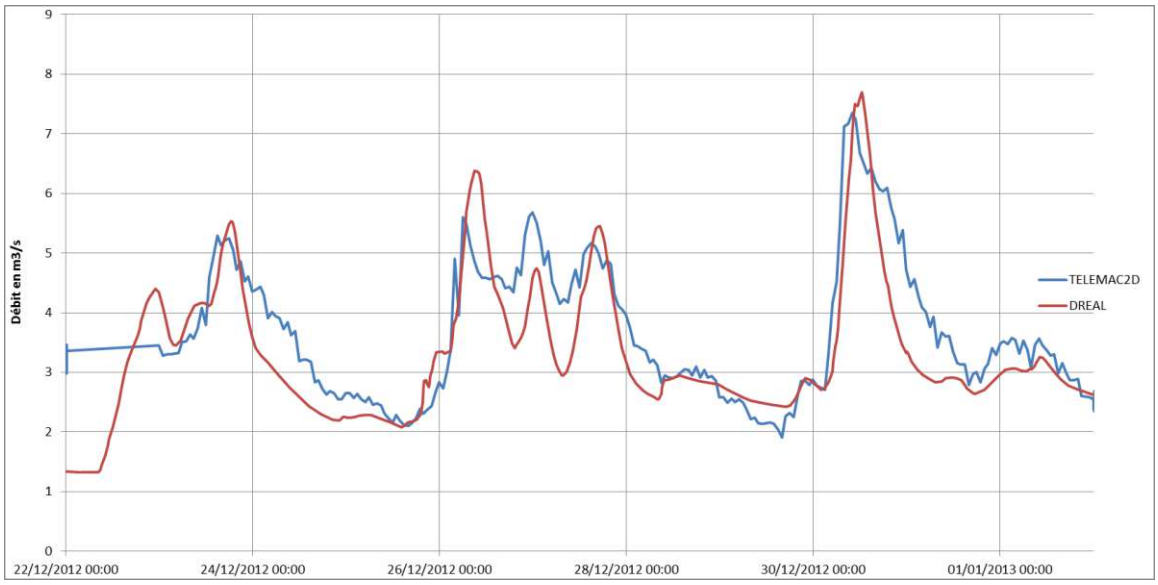


Figure 57 : Comparaison des hydrogrammes observés et simulés à la station de Marles

4.9.3.1 Limnigramme et courbe de tarage à Marles

Le comparatif des limnigrammes montre la bonne dynamique du modèle pour les différents pics. Les débits de l'hydrogramme se superposent bien avec la courbe de tarage.

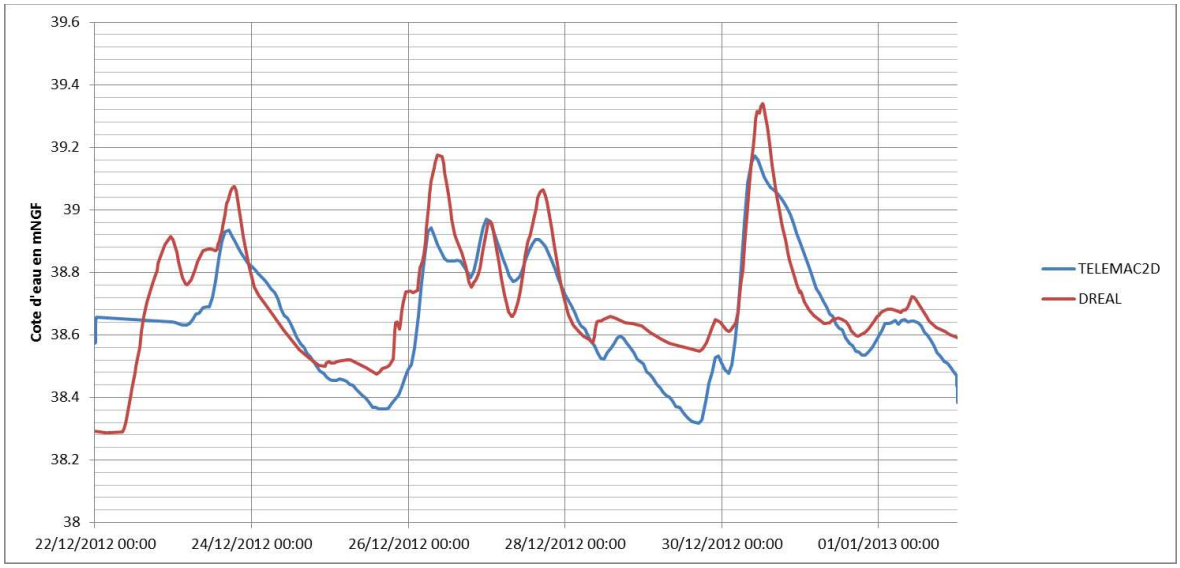


Figure 58 : Comparaison des limnigrammes observés et simulés à la station de Marles

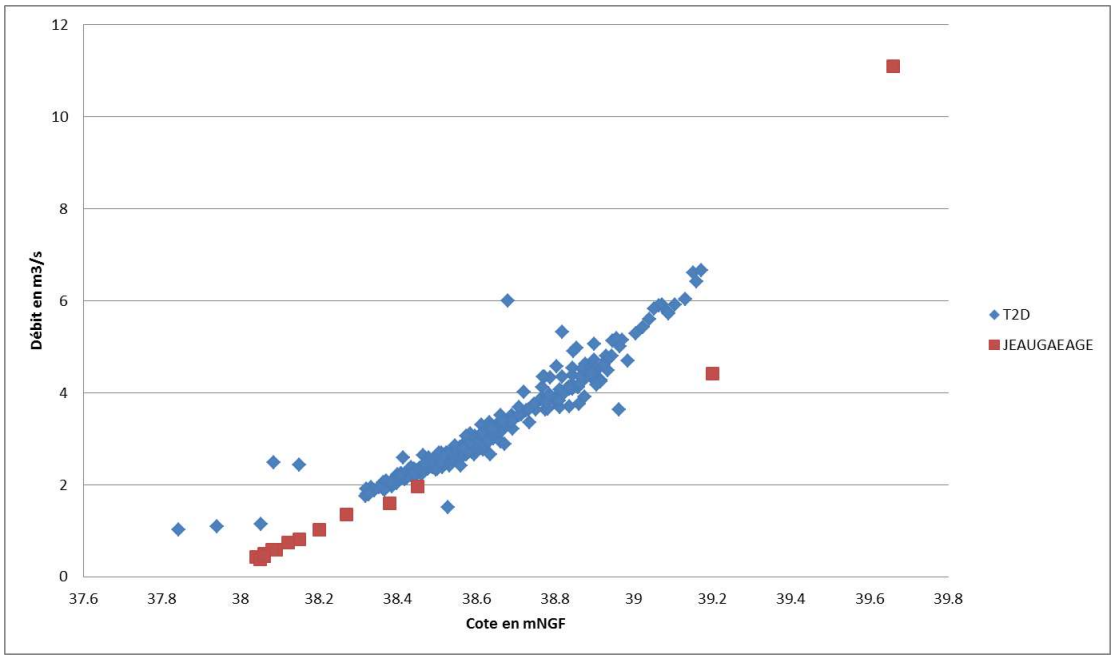


Figure 59 : Courbe de tarage

4.9.4 Conclusions concernant la simulation de la crue de décembre 2012 sur la Clarence amont

Il n'y a pas beaucoup d'observations qui permettent un calage de la crue de décembre 2012. Le modèle donne de bons résultats à Marles.

4.10 Calage de la crue de mai 2016 sur la Nave et le Grand Nocq

4.10.1 Maillage

L'emprise du modèle considéré est la suivante.

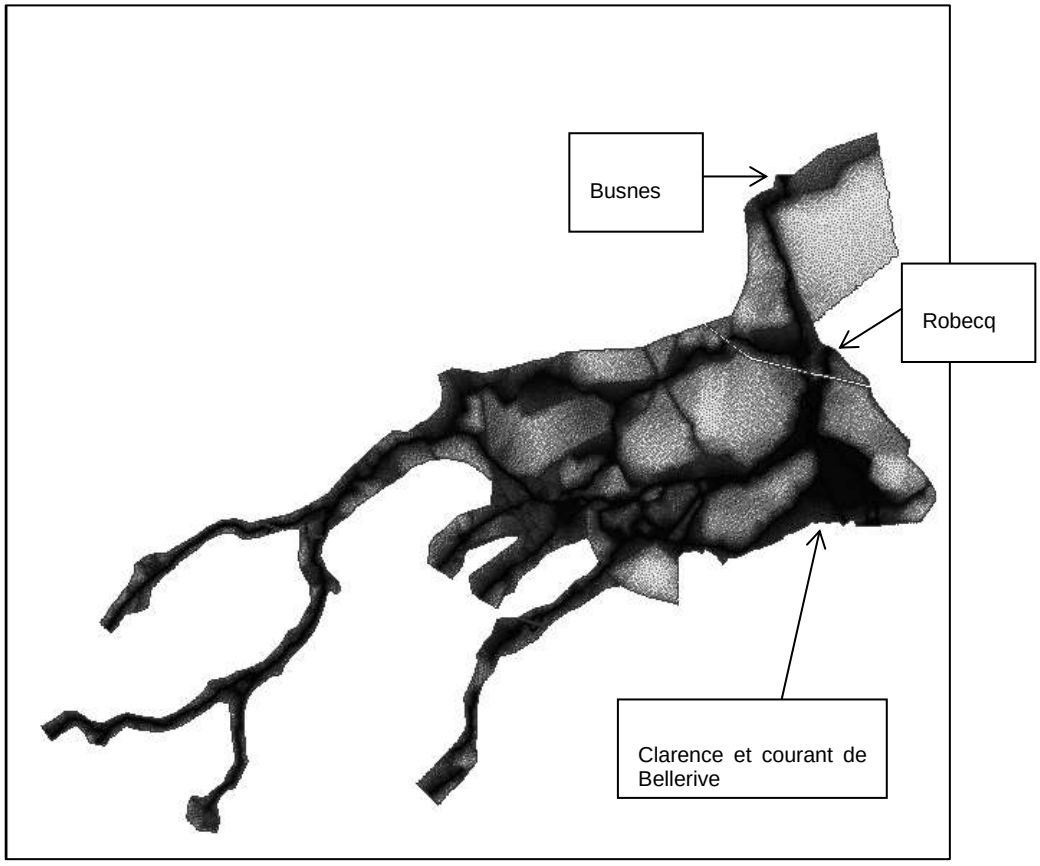


Figure 60 : Emprise et maillage du modèle de la Clarence aval et de la Nave

Le maillage est le même que celui du modèle global. Il est composé de 336 055 nœuds. La limite aval se situe :

- Pour la Busnes : à sa confluence avec la Lys canalisée
- Pour la Clarence, le Grand Nocq et le ruisseau de Turbeauté: à la confluence avec la Vieille Lys.

La limite amont du modèle sur la Clarence et le courant de Bellerive se situe au niveau du Thalimède n°1 de la Clarence (CLAR1) sur la commune de Gonnehem.

4.10.2 Topographie utilisée

Pour rappel, la topographie utilisée en lit majeur est celle issue du LIDAR au pas d'espace de 50cm.

Pour la bathymétrie des lits mineurs, les profils en travers levés lors des campagnes topographiques sont interpolés linéairement via le logiciel HEC-RAS puis intégrés au modèle TELEMAC. Les profils au droit des ouvrages sont intégrés également pour permettre de représenter au mieux les variations de pente du lit mineur dues aux atterrissement et affouillements au droit des ouvrages.

4.10.3 CONDITIONS LIMITES

4.10.3.1 Conditions limites amont

Les hydrogrammes ont été déterminés à l'aide du modèle hydrologique GR4. Ce modèle utilise des pluies horaires qui ont été reconstituées à l'aide des images radar.

Pour les conditions amont, les débits simulés par GESRES sont injectés en tête de bassin ainsi qu'aux points d'apports intermédiaires (types confluences). Pour la Clarence et la Calonnette, les hydrogrammes issus du modèle amont sont injectés en condition limite.

4.10.3.2 Conditions limites aval

La condition limite aval au niveau de la Clarence est imposée par la courbe de tarage de la station de Robecq.

La condition limite aval pour la Busnes et la Vieille Lys est imposée par le niveau de la Lys canalisée dans laquelle les cours d'eau confluent. Cette mesure de cote a été fournie par VNF pour évènement de mai 2016.

4.10.4 Données de calage disponibles pour mai 2016

4.10.4.1 Retour des communes

Les données collectées par le SYMSAGEL pour mai 2016 indiquent que les communes de Calonne sur la Lys, Chocques, Robecq ont été touchées. Ces données restent qualitatives.

Les données relatives au ZEC sont les suivantes :

- Sur la Nave :
  - La Zec de Bourecq n'a pas été fortement sollicitée car le niveau de la Nave amont n'a pas été très élevé – Seul le petit chenal a été sollicité – Zec remplie à 10 % environ
  - La ZEC de la Nave été remplie à 100%
- Sur le Rimbert :
  - La ZEC de Burbure a été remplie à 100% avec surverse et débordements sur la route (environ 40cm sur toute la largeur)
  - La ZEC de Rieux a été remplie à 100% avec surverse
  - La ZEC du Pont de Fer a été remplie à 100% avec débordements sur la rue du Pont de Fer sans toutefois avoir de l'eau dans les maisons
  - Sur le Fossé Noir, la ZEC du Fossé Noir a été remplie à 100% à la limite de la surverse.
  - Sur le Ruisseau d'Hurionville, le retour indique que les vannes ont été fermée au maximum pour limiter les apports du courant d'Hurionville dans la Nave car il y a avait des débordements par-dessus les digues de la Zec.

4.10.4.2 Niveaux d'eau

Le réseau Thalimède permet d'accéder aux niveaux d'eau.

4.10.5 RESULTATS

4.10.5.1 Résultats sur la Nave

THALIMEDES

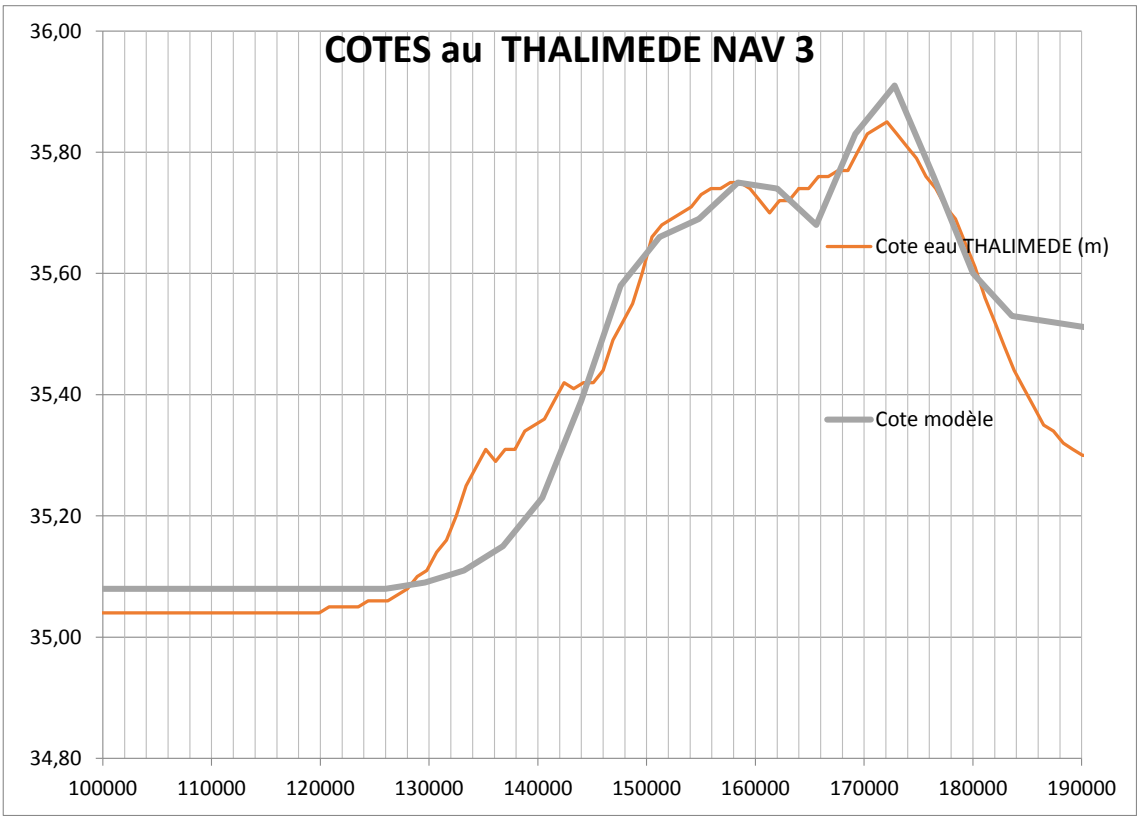
Au niveau de chaque thalimède, les cotes maximales sont comparées aux données observées.

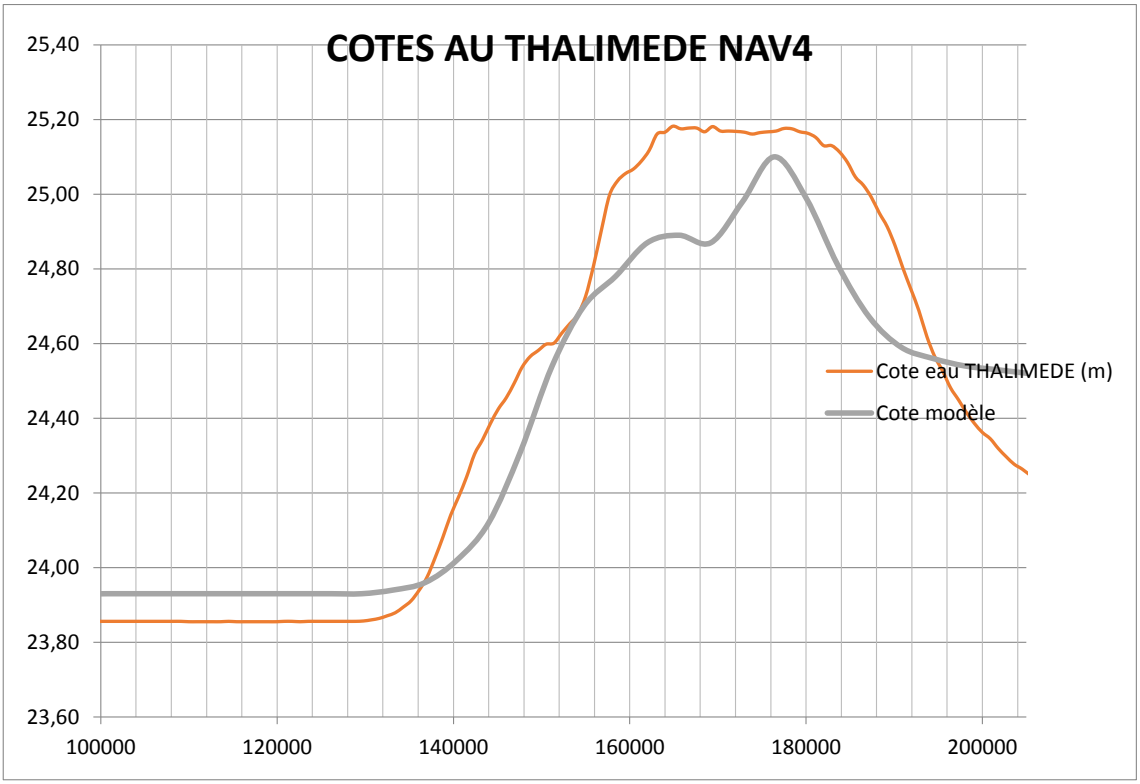
	Ouvrage rattaché	Position sur l'ouvrage	Cote max observée (mNGF)	Cote max simulée (mNGF)	Différence (en m)
NAVE 1	OA81	aval	Pas de données	70.5	*
NAVE 2	OA97	amont	60.57	60.15	-0.42
NAVE 3	OA114	aval	35.85	35,90	0.05
NAVE 4	OA122	amont	25.18	25.10	0.08
NAVE 5	OA129	aval	22.56	22.35	-0.21
NAVE 6	OA136	amont	Pas de données	19.88	*

Figure 61 : Cotes aux thalimèdes (mai 2016)

Du point de vue des maxima, on constate pour 3 des 4 thalimèdes des résultats satisfaisants.

Ci-après sont présentés les limnigrammes comparés issus des Thalimèdes et du modèle :





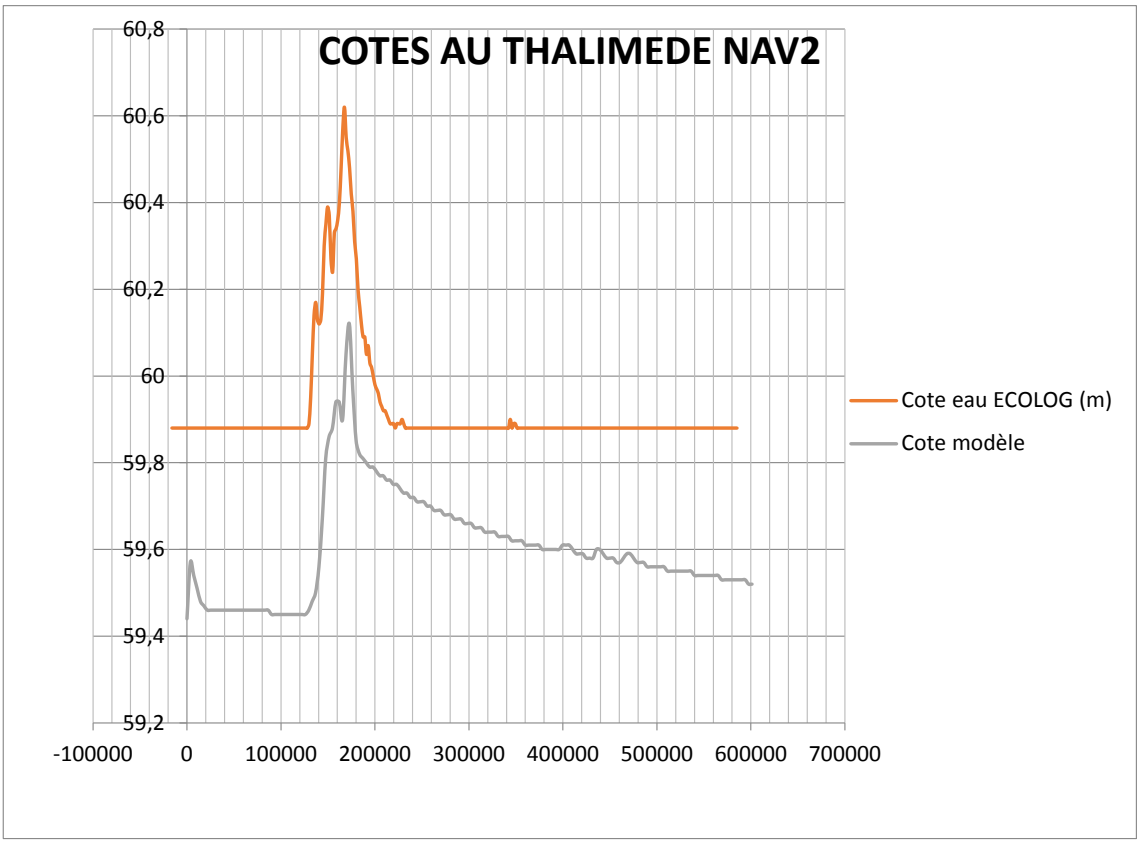


Figure 62 : cotes mesurées et simulées aux Thalimèdes

On constate un problème sur Nav2 difficile à interpréter. Nous avons en effet une constance des cotes mesurées par le Thalimède (à 59.85 environ). Or les

photographies montrent que le niveau d'eau en été est très inférieur à ce niveau de base et est proche du niveau simulé par le modèle.

Concernant Nav 4, il a été constaté une différence entre les levés topographiques et la section réelle de l'ouvrage telle qu'elle apparaît sur la photo ci-après :

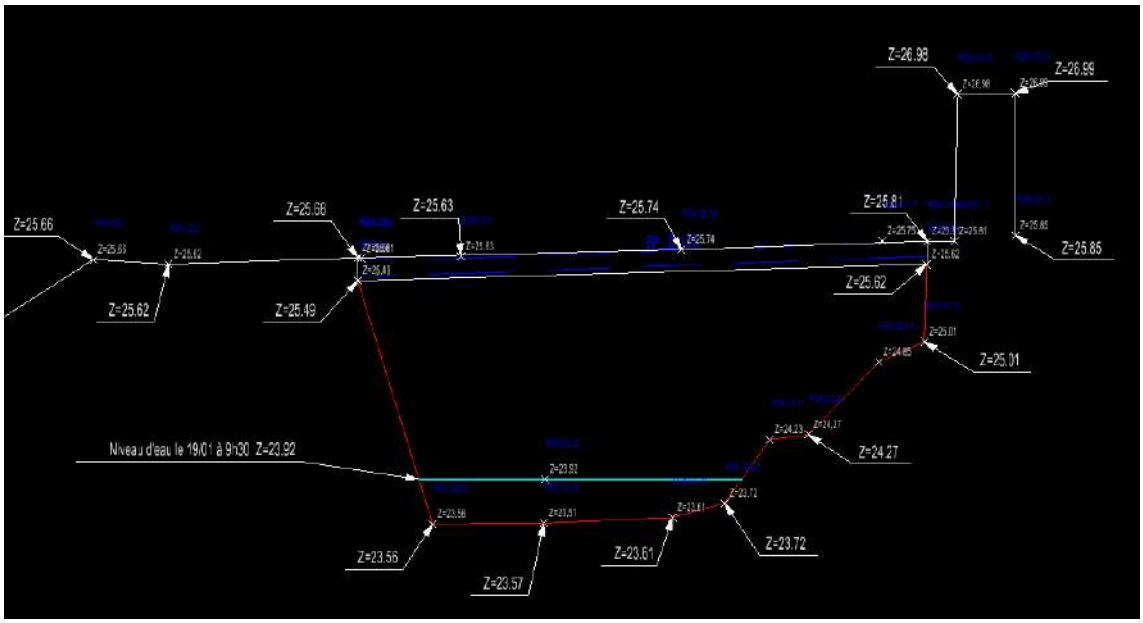


Figure 63 : différence topographie/observations au droit de Nav4

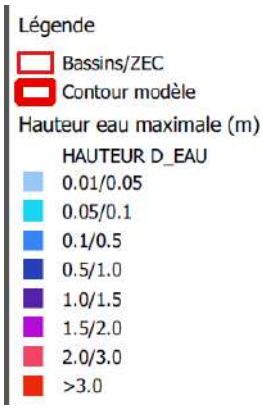
Dans le modèle, une ouverture approchée de l'ouvrage a donc été introduite.

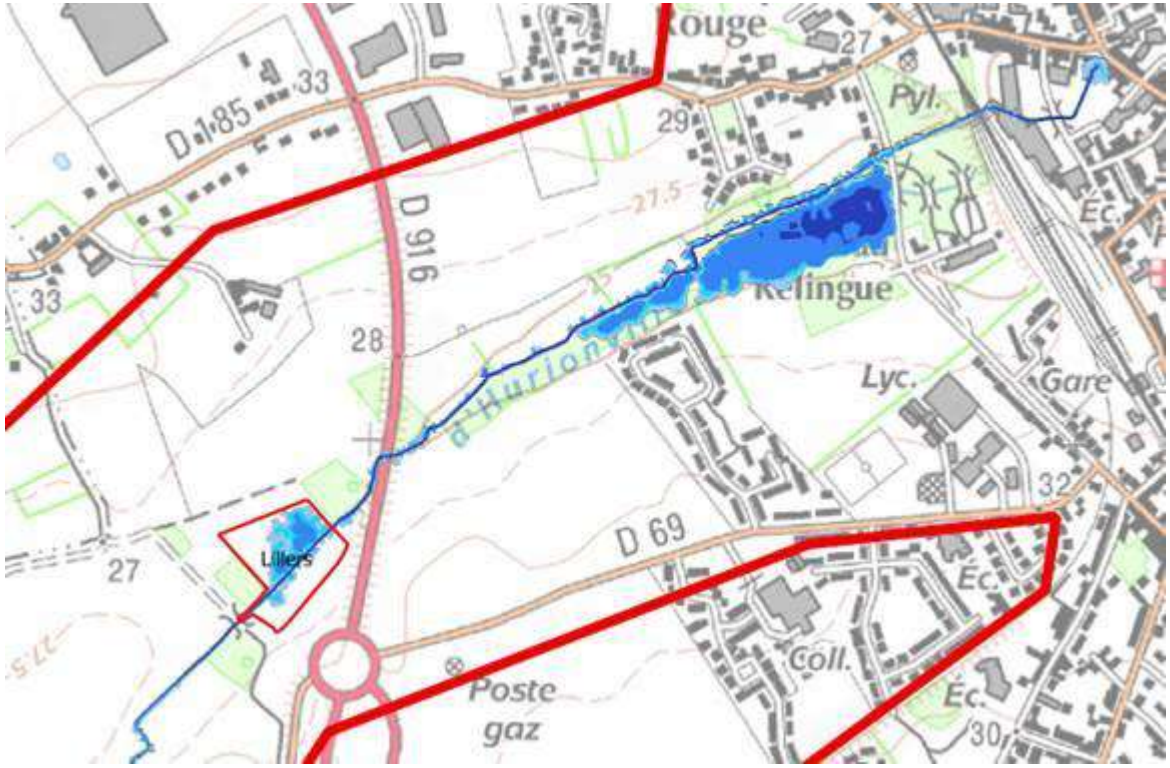
Du point de vue des échanges entre les rivières, le débit qui transite via le seuil du Platrier est d'environ 2 m3/s maximum tandis que le prélèvement au maximum de débit de la Nave est un peu supérieur à 1 m3/s.

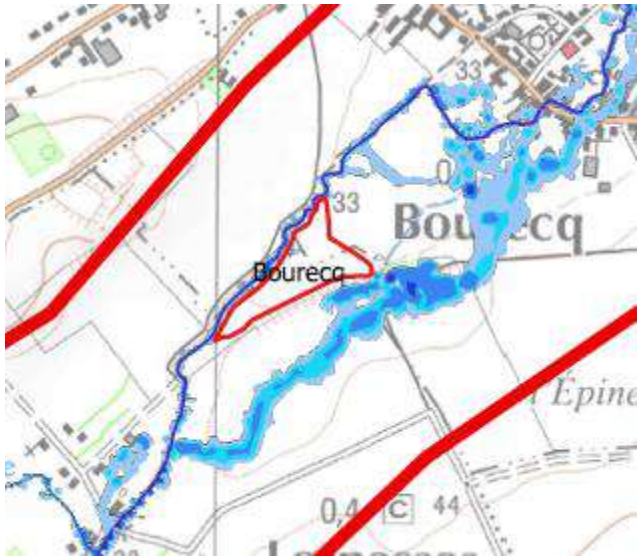
On peut se référer aux mesures de débits qui avaient été réalisés lors de l'orage de juillet 2005. On constate que les ordres de grandeur sont assez identiques : 2,5 m3/s sur la Nave et un délestage estimé à 2 m3/s.

Retour des communes

Les pages suivantes présentent les résultats. Globalement, la simulation est cohérente avec toutes les observations



ZEC	A fonctionnée en mai 2016	Etat de la ZEC dans le modèle TELEMAC	Illustration
Hurionville	Fermeture maximale des vannes pour limiter les apports du courant dans la Nave car débordements dans Lillers au-dessus des digues	La ZEC n'a pas été très sollicitée – les fermetures des vannes ne sont pas modélisées	

ZEC	A fonctionnée en mai 2016	Etat de la ZEC dans le modèle TELEMAC	Illustration
Nave Bourecq	La Zec n'a pas été fortement sollicitée car le niveau de la Nave amont n'a pas été très élevé – Seul le petit chenal a été sollicité – Zec remplie à 10 % environ	Un contournement de la ZEC est constaté par l'amont. La ZEC n'est pas sollicité dans la modélisation TELEMAC. La cote d'entrée dans la ZEC est à confirmer	

ZEC	A fonctionnée en mai 2016	Etat de la ZEC dans le modèle TELEMAC	Illustration
Nave – ZEC de la Nave	ZEC remplie à 100%	Zec remplie	

La Zec de Bourecq s'est remplie à 10% d'après la collectivité. Les plans de base de la Zec ne représentent pas la situation actuelle car un fossé et une vanne de contrôle ont été ajoutés depuis à l'ouvrage de prise. Les mesures approximatives sur place montrent un abaissement de 60 cm du seuil de prise sur une largeur de 4 mètres.

Figure 64 : Fossé de prise – Zec de Bourecq

4.10.5.2 Résultats sur la Busnes et le Rimbert

THALIMEDES

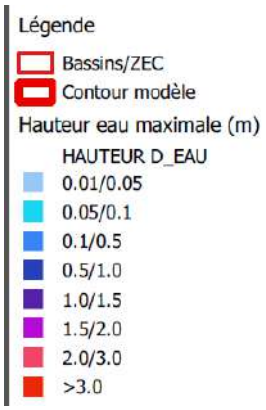
Au niveau de chaque thalimède, les cotes maximales sont comparées aux données observées.

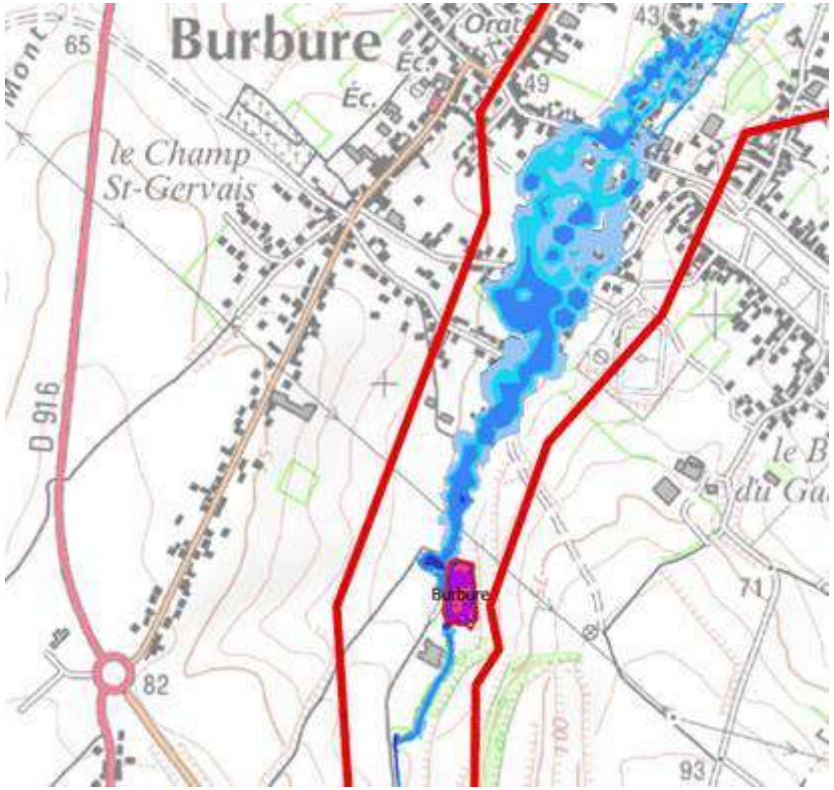
	Ouvrage rattaché	Position sur l'ouvrage	Cote max observée (mNGF)	Cote max simulée (mNGF)	Différence (en m)
BUSN 1	OA24	Aval	18.68	18,55	-0,13
BUSN 2	OA26	Aval	17.83	17,68	-0,13
BUSN 3	*	*	Pas de données	16.82	*
BUSN 4	OA33	amont	Pas de données	16.72	*
RIMB 2	OA191	Amont	Pas de données	21.64	*
RIMB 3	OA49	Aval	18.33	18,14	-0,19

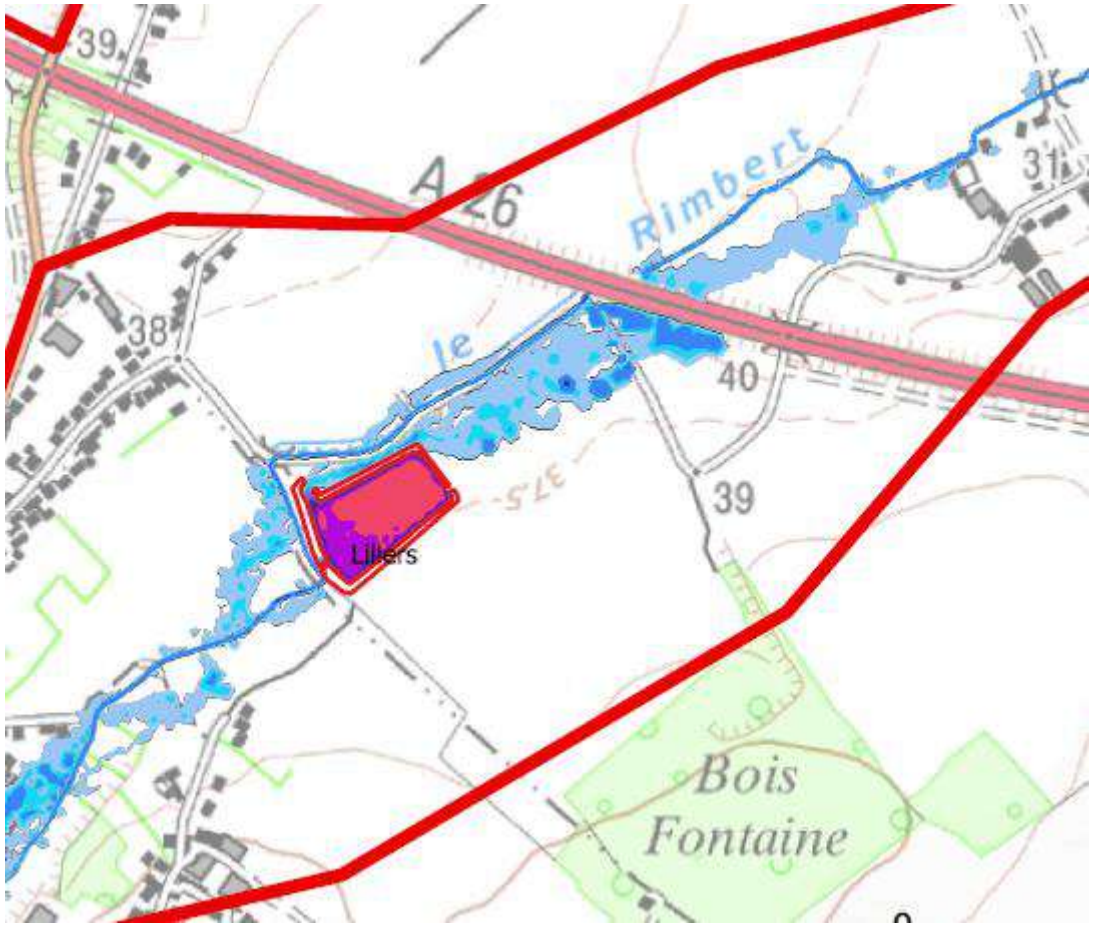
Figure 65 : Cotes aux thalimèdes (mai 2016)

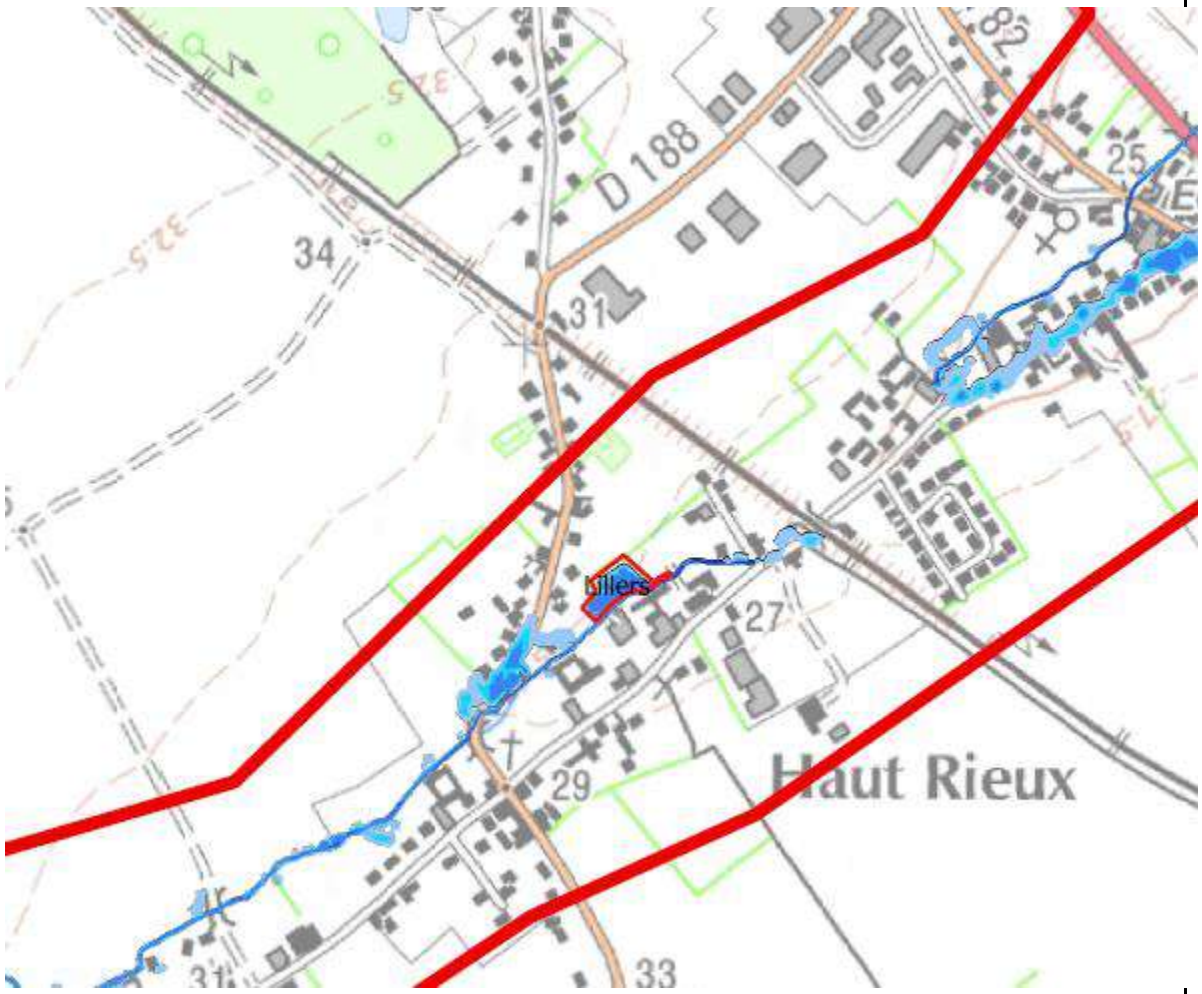
Retour des communes

Les pages suivantes présentent les résultats. Globalement, la simulation est cohérente avec toutes les observations



Rimbert Burbure	Zec remplie à 100% + débordements sur la route (environ 40 cm d'eau sur toute la largeur de la route)	Zec remplie + débordements sur la route	

Rimbert Rieux	Remplie à 100 % + surverse	Zec remplie + surverse	

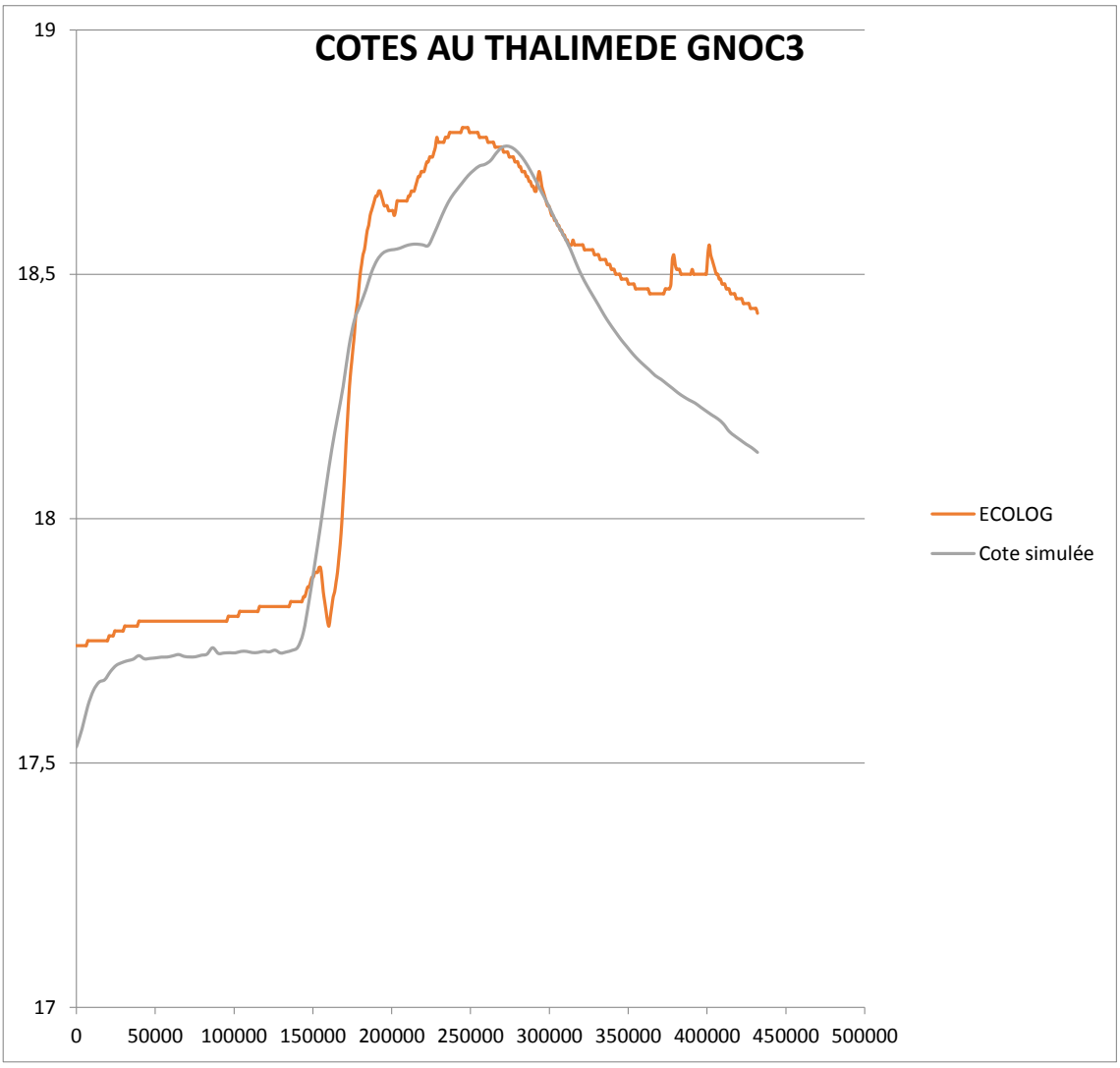
Rimbert Pont de Fer	Zec remplie à 100% + débordement sur la rue du pont de fer sans toutefois avoir de l'eau dans les maisons	Zec sollicitée + débordements sur la rue du Pont de Fer mais localisées sur la chaussée	

4.10.5.3 Résultats sur le Grand Nocq

Le tableau ci-après présente les niveaux maxima observés et simulés aux thalimèdes. On constate une bonne estimation générale des niveaux maxima.

	Ouvrage rattaché	Position sur l'ouvrage	Cote max observée (mNGF)	Cote max simulée (mNGF)	Différence (en m)
GN 2	OA77	Aval	18,82	18,86	+0,04
GN 3	OA84	Amont	18,8	18,76	-0,04
GN 4	OA95	Aval	16,44	16.27	-0,17

Figure 66 : Cotes aux thalimèdes (mai 2016)



4.10.6 Conclusions

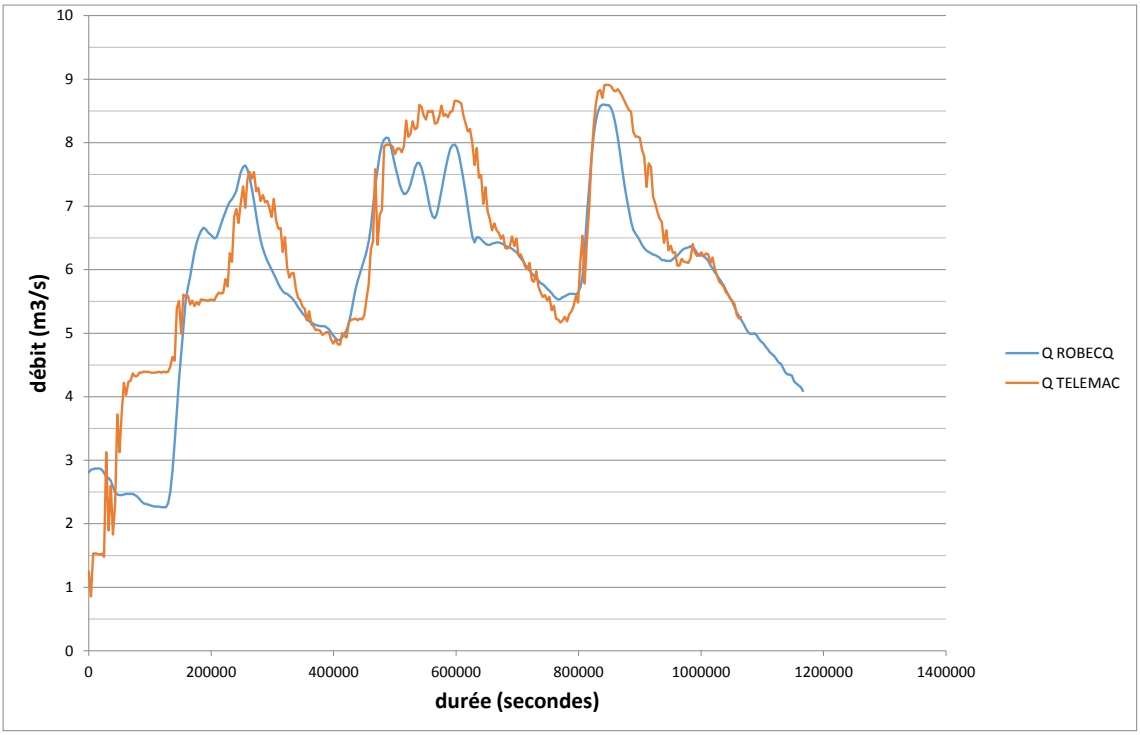
Les modèles de la Nave et du Grand Nocq donnent des résultats satisfaisants. On constate que les transferts vers la Busnes sont conséquents de 2 à 3 m3/s. Le Rimbert est sous l'influence des niveaux de la Busnes. Le transfert des eaux de la Clarence vers le Grand Nocq à partir d'un certain débit (à la décrue de la Clarence) sont difficiles à prendre en compte. Ces transferts n'interviennent que peu sur les niveaux maxima sur le Grand Nocq ; ils ont un impact sur les durées d'inondation.

4.11 Validation du modèle de la Nave sur la crue de décembre 2012

4.11.1 Données disponibles pour décembre 2012

Le réseau Thalimède permet d'accéder aux niveaux d'eau. Les enquêtes en communes n'ont pas identifié de zones inondées qui puissent faire référence.

Le modèle hydraulique fournit un comparatif à Robecq où la Clarence et la Nave se rejoignent. Le modèle hydrologique fournit un hydrogramme plus lissé que celui enregistré.



4.11.2 RESULTATS

4.11.2.1 Résultats sur la Nave

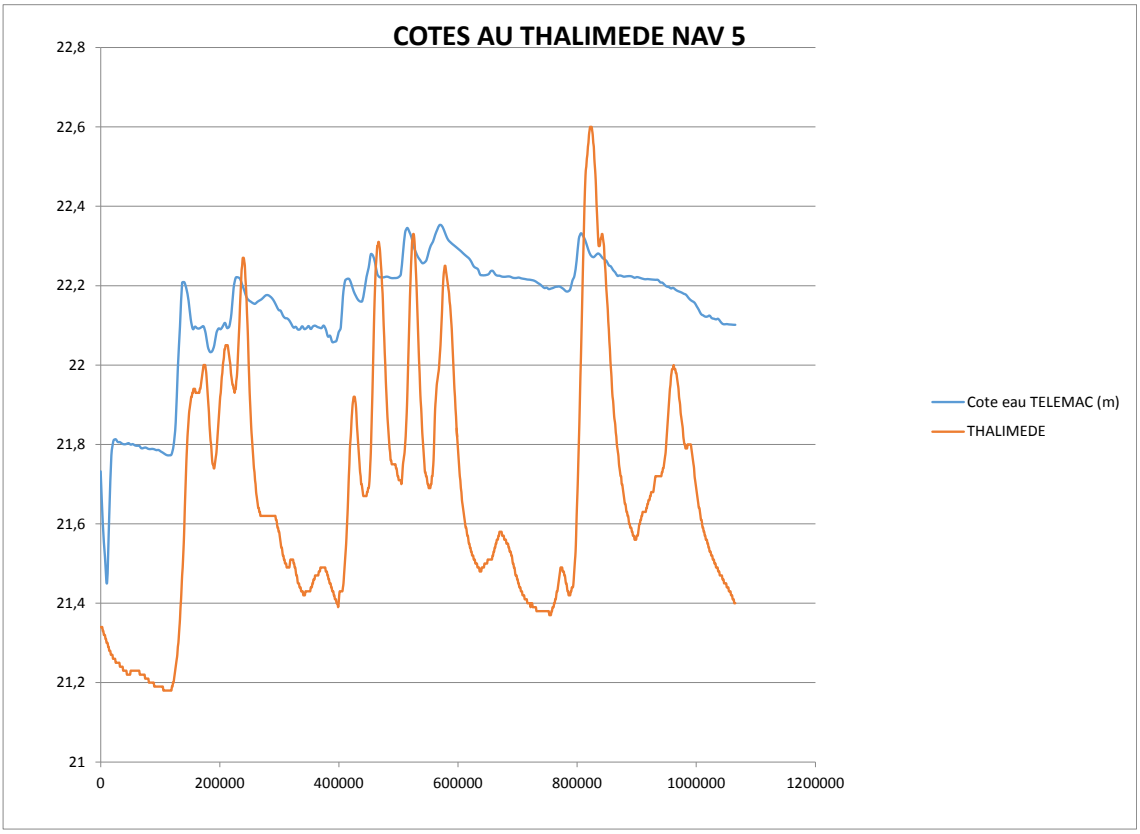
THALIMEDES

Au niveau de chaque thalimède, les cotes maximales sont comparées aux données observées.

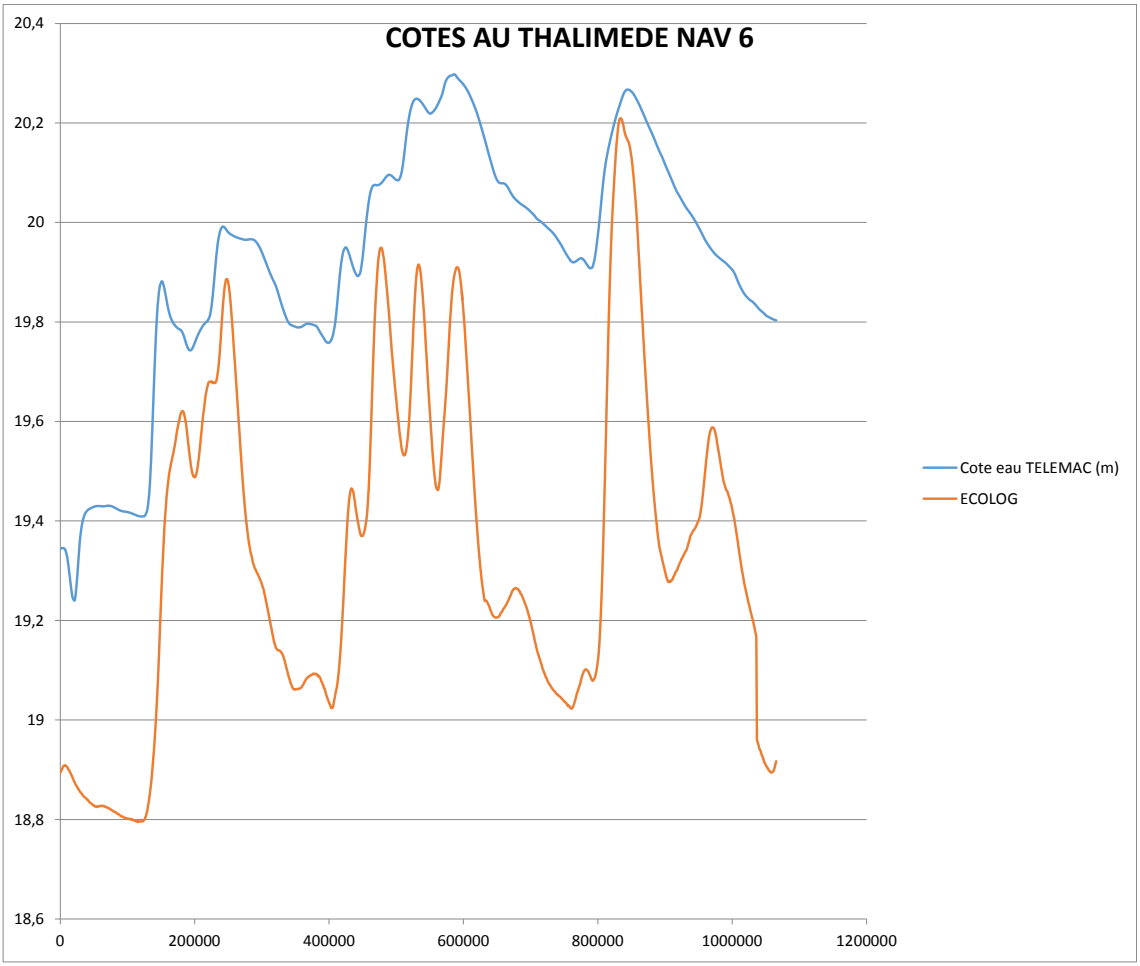
	Ouvrage rattaché	Position sur l'ouvrage	Cote max observée (mNGF)	Cote max simulée (mNGF)	Différence (en m)
NAVE 5	OA129	aval	22.6	22.3	-0.3
NAVE 6	OA136	amont	20,2	20,25	+0,05

Figure 67 : Cotes aux thalimèdes (décembre 2012)

Ci-après sont présentés les limnigrammes comparés issus des Thalimèdes et du modèle :



On remarque l'effet significatif du lissage des débits issus du modèle hydrologique. Tandis que les débits de pointe sont bien représentés.



Du point de vue des échanges entre les rivières, le débit qui transite via le seuil du Platrier est d'environ 2 m3/s maximum tandis que le prélèvement au maximum de débit de la Nave est un peu supérieur à 1 m3/s.

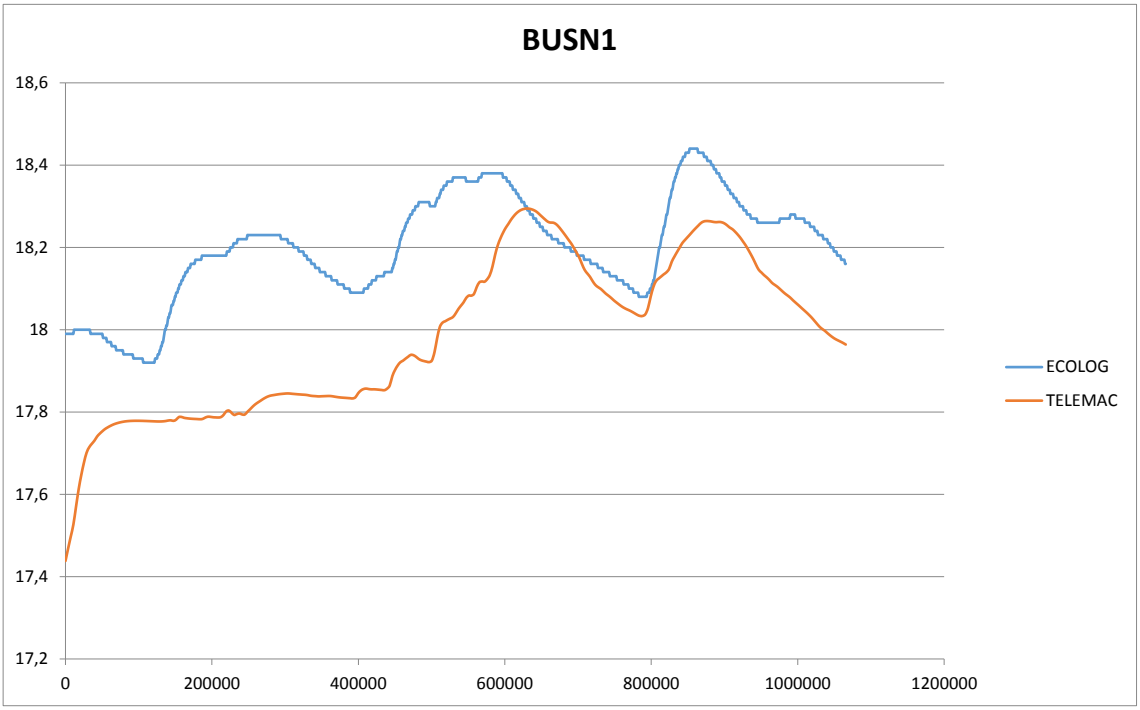
4.11.2.2 Résultats sur la Busnes et le Rimbert

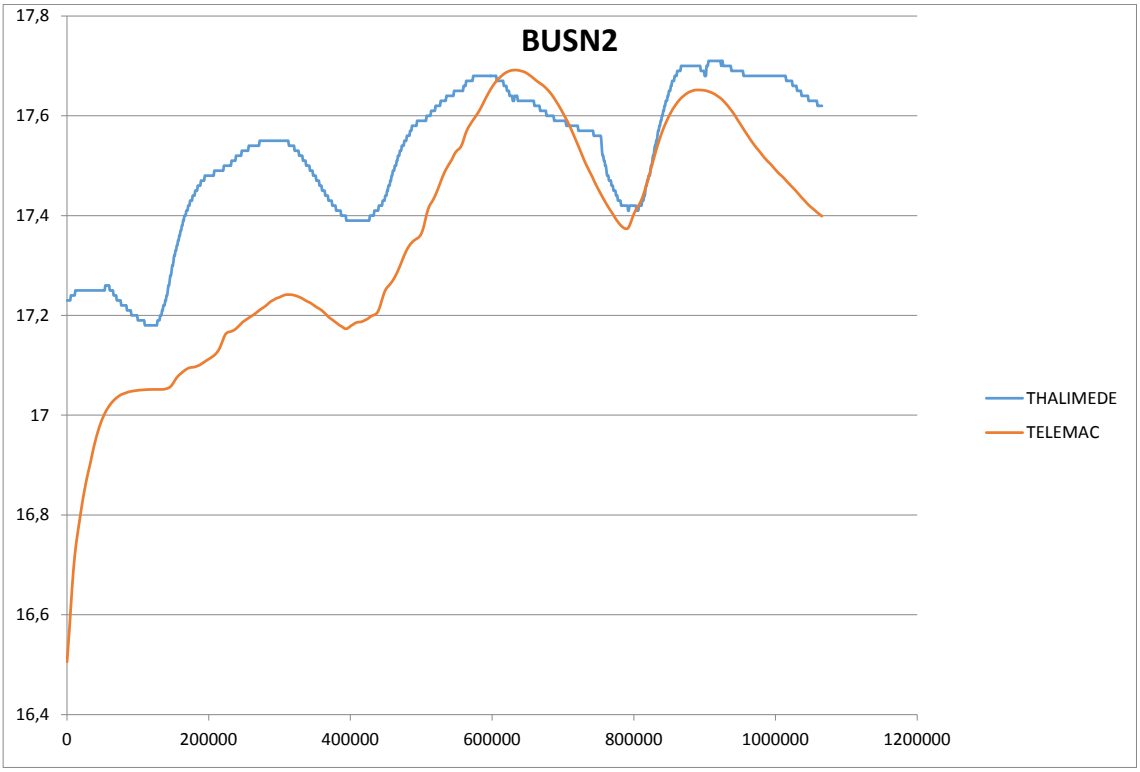
THALIMEDES

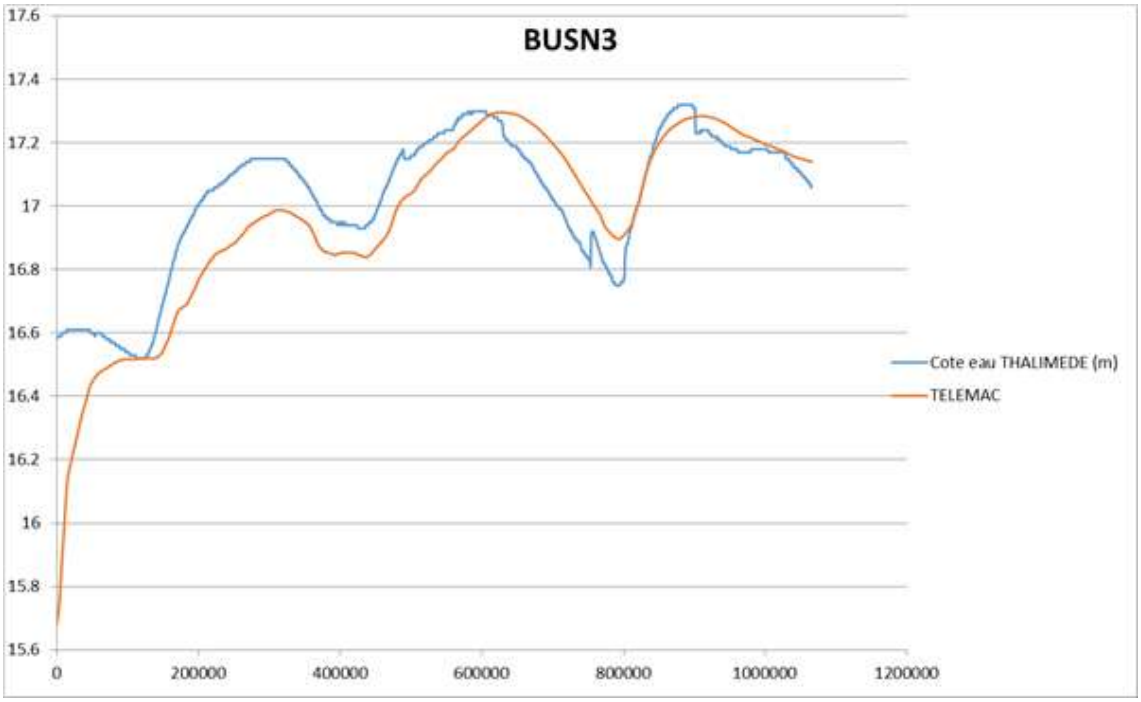
Au niveau de chaque thalimède, les cotes maximales sont comparées aux données observées.

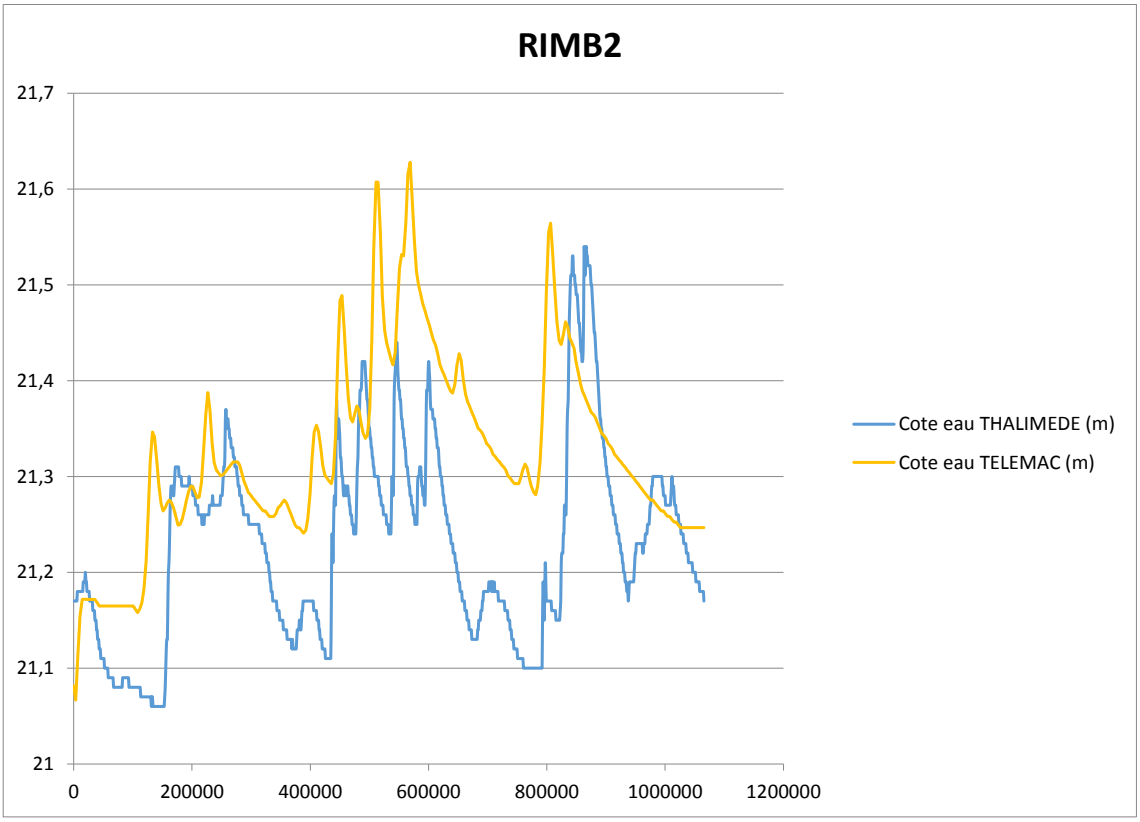
	Ouvrage rattaché	Position sur l'ouvrage	Cote max observée (mNGF)	Cote max simulée (mNGF)	Différence (en m)
BUSN 1	OA24	Aval	18,41	18,25	-0,16
BUSN 2	OA26	Aval	17.7	17,65	-0,05
BUSN 3	*	*	17.3	17.3	+0,00
BUSN 4	OA33	amont	Pas de données	-	*
RIMB 2	OA191	Amont	21.62	21.54	-0.08
RIMB 3	OA49	Aval	18.01	17.8	-0,21

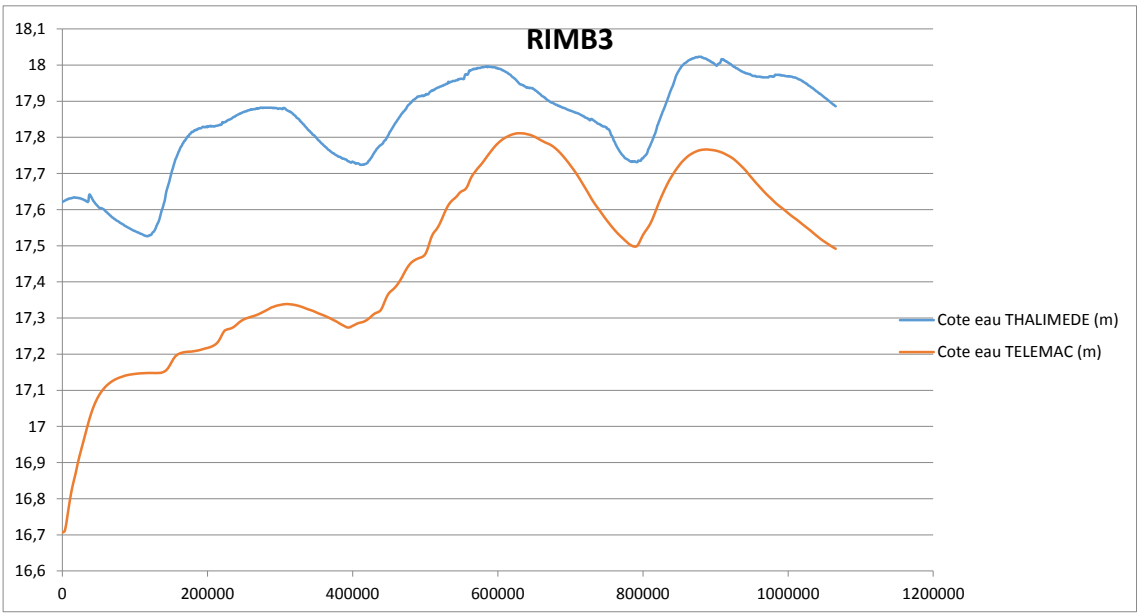
Figure 68 : Cotes aux thalimèdes (mai 2016)



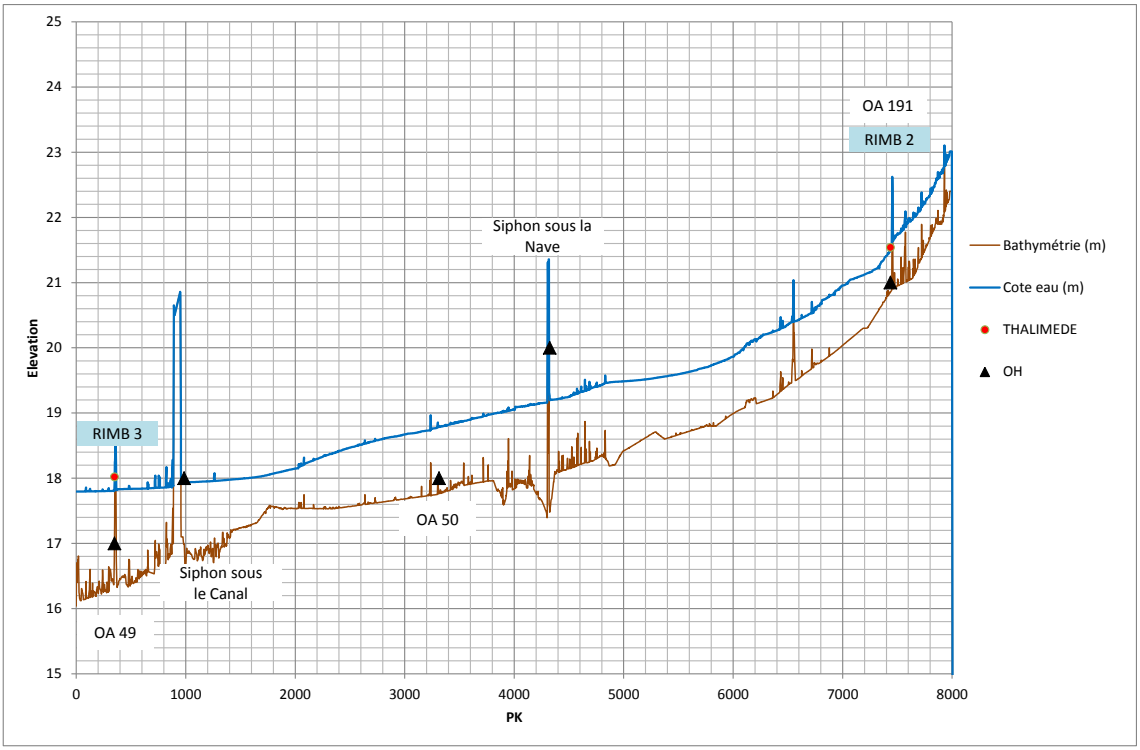

BUSN2
17,8
17,6
17,4
17,2
17
16,8
16,6
16,4
0
200000
400000
600000
800000
1000000
1200000
THALIMEDE
TELEMAC


BUSN3
17.6
17.4
17.2
17
16.8
16.6
16.4
16.2
16
15.8
15.6
0
200000
400000
600000
800000
1000000
1200000
Cote eau THALIMEDE (m)
TELEMAC





Le profil en long de la ligne d'eau est fourni ci-après :

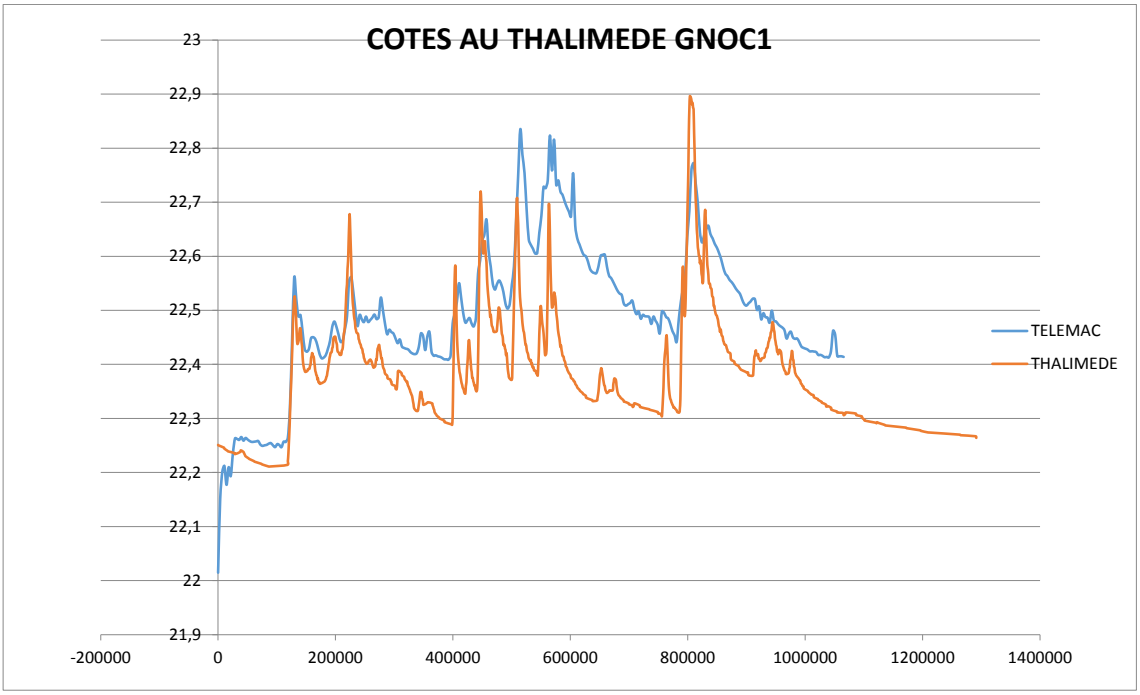


4.11.2.3 Résultats sur le Grand Nocq

Le tableau ci-après présente les différences de cote de la dernière pointe :

	Ouvrage rattaché	Position sur l'ouvrage	Cote max observée (mNGF)	Cote max simulée (mNGF)	Différence (en m)
GN1	OA147	Aval	22,9	22,75	-0,15
GN 2	OA77	Aval	19,16	18,9	-0,26
GN 3	OA84	Amont	18,83	18,7	-0,13

Le modèle sous estime pour 2012 les pertes de charge à l'ouvrage OA84 (GN3) ce qui se répercute sur GN2.



4.11.3 Conclusions

Le modèle de la Clarence aval et de la Nave donne des résultats satisfaisants. La crue de mai 2016 est bien représentée. Les hydrogrammes de la crue de décembre 2012 injectés dans le modèle hydraulique sont plus lissés qu'en réalité ce qui se retrouve dans les hauteurs simulées sur la Nave. L'ordre de grandeur des cotes atteintes est respectée. Les possibles embâcles aux ouvrages (signalées durant les enquêtes) ne peuvent être pris en compte. Dans les parties très plates aux vitesses d'écoulement faibles, ces embâcles peuvent bien sûr avoir un effet sur un linéaire important.

4.12 Estimation du débit de 1999

4.12.1 Approche du débit sur la Clarence amont

4.12.1.1 Objectif

La crue de 1999 constitue l'évènement marquant de ces dernières décennies. La simulation exacte de cet évènement est rendue difficile par les changements intervenus depuis lors et les incertitudes liées aux ruptures de digues et leurs effets. La Nave s'est vue pratiquement asséchée à Lillers si on considère des brèches totales de plus de 10 mètres de ce lit perché. Les eaux ont alors rejoint la Busnes. Le maximum de flux est venu de la Clarence. Sur la crue de 1999, nous savons peu de choses hormis le débit journalier maximum tiré des enregistrements à la station de Robecq (9 m3/s environ).

L'analyse détaillée de la perte de charge au pont des marais et des cotes atteintes lors de l'évènement peut nous renseigner sur le débit. C'est en effet ce point qui permettra de guider le choix du débit de référence pour le PPRi.

Le Cerema a réalisé une analyse spécifique sur la Clarence à Calonne Ricouart afin d'estimer le débit maximal atteint en 1999. Nous reprenons cette analyse.

4.12.1.2 Informations disponibles

En 1999, un film retrace les inondations de Marles. On constate que l'eau a atteint le bord gauche en amont du pont et a rejoint la route.

Aujourd'hui, la situation a changé avec l'édification d'un merlon. Cependant, il ne semble pas que la cote du bord gauche ait beaucoup changé.

Figure 69 : Rive gauche immédiatement en amont du pont – situation actuelle

Par rapport à la situation de 1999, le débit de surverse est limité à un passage d'1 mètre.

Figure 70 : Longueur de déversement lors de l'épisode de décembre 1999

Pour estimer le niveau atteint, on peut prendre pour repère le haut de la culée rive gauche. La cote atteinte serait de l'ordre de 39,80 m NGF.

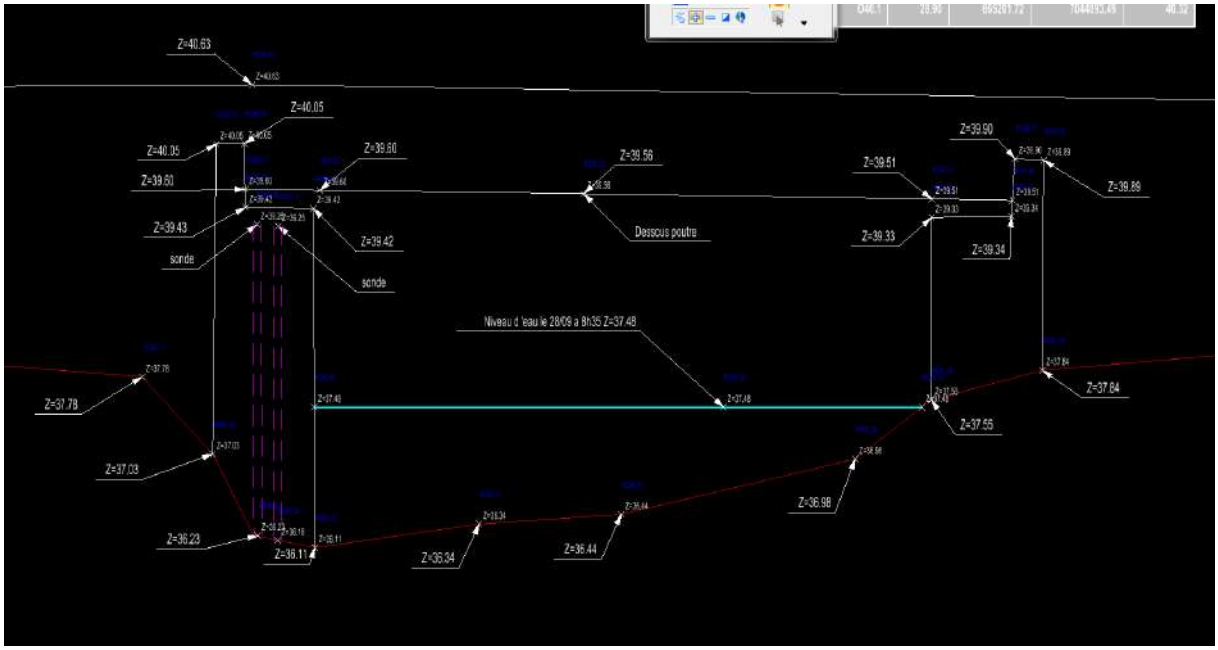
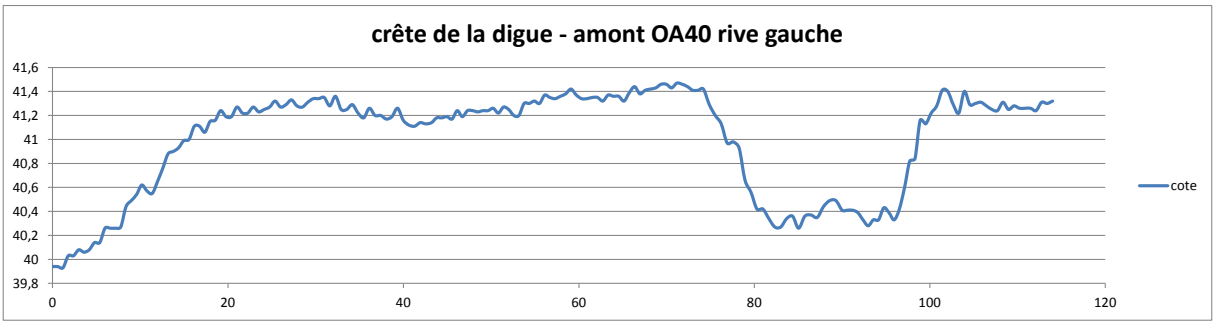
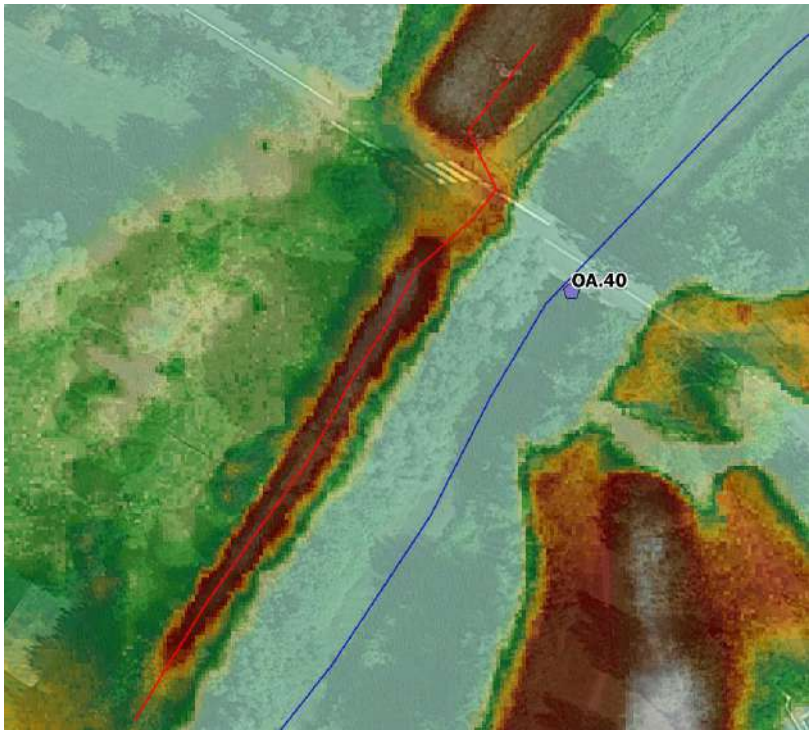


Figure 71 : photographie du niveau atteint au pont de Marles en 1999

D'après le Lidar, la cote de la route est à 40,20 mNGF environ. Ce qui laisserait penser que cette partie a été légèrement surélevée depuis 1999 (la hauteur potentielle ne peut excéder de 20 cm le niveau d'eau sous le pont, les vitesses étant de l'ordre ou inférieures à 1,5 m/s).





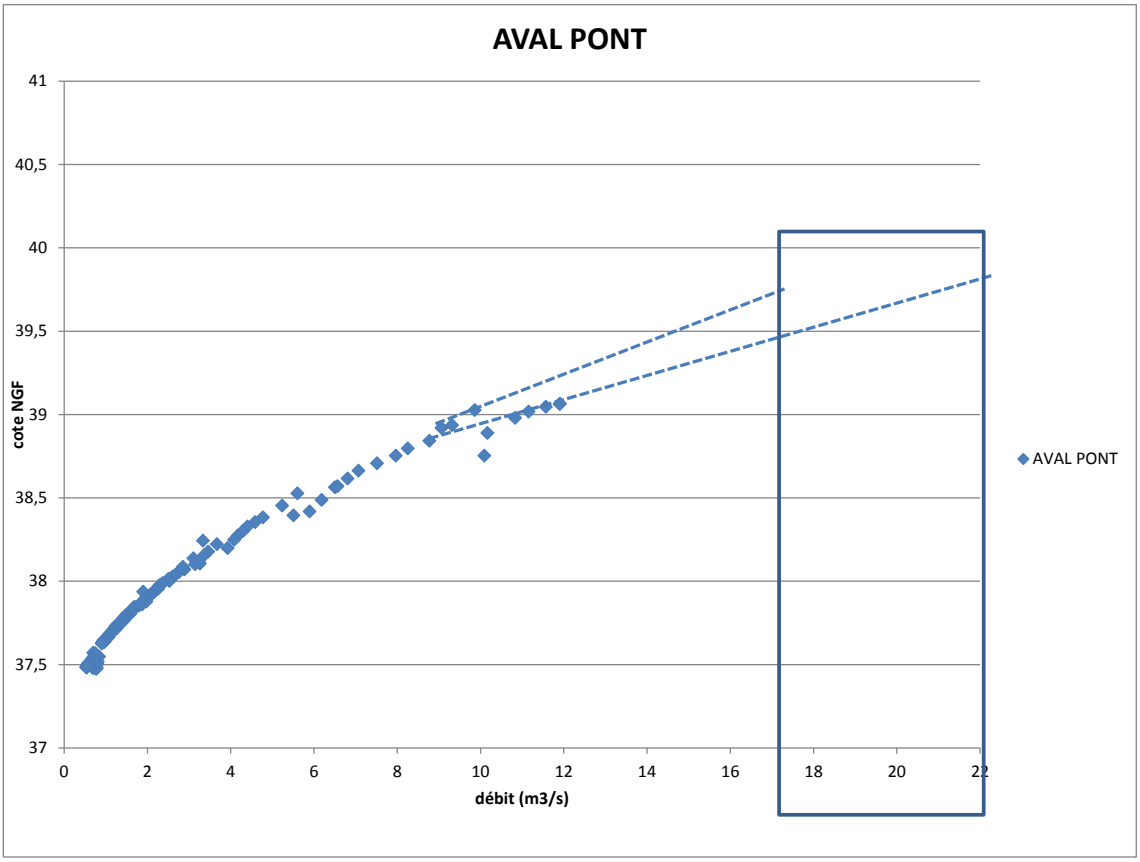
L'obliquité de l'ouvrage est d'environ 10°..

4.12.1.3 Perte de charge liée au pont

La perte de charge peut être approchée en utilisant les abaques reliant les coefficients de transferts et chacun des coefficients intervenant dans le coefficient de débit recherché. Un calcul simplifié montre que les vitesses sous le pont sont de l'ordre de 1,4 m/s et que la perte de charge est équivalente à 1,25 $V^2/2g$ soit une douzaine de centimètres pour un débit de 20 m3/s.

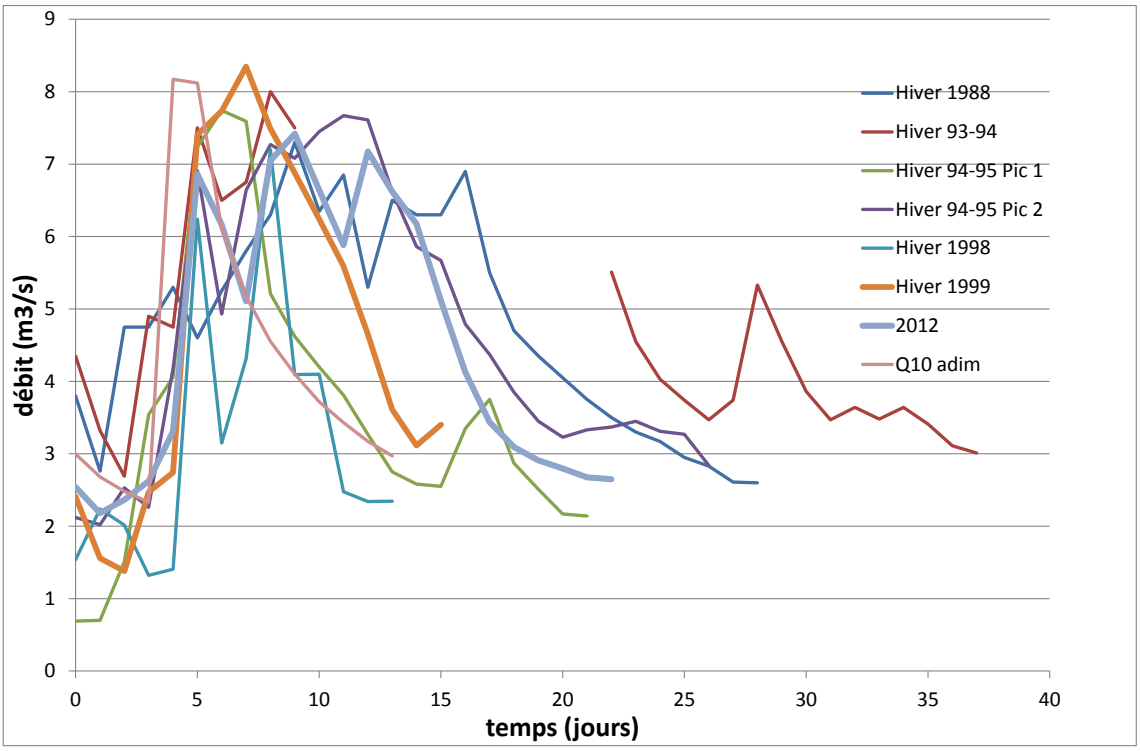
Le modèle hydraulique fournit une courbe de tarage jusqu'au débit de 11 m3/s. On peut dans une première approche extrapoler cette courbe ce qui fournit à l'aval du pont une fourchette de débit comprise entre 17 et 22 m3/s. Cette estimation fait l'hypothèse que les curages réalisés sur la Clarence après la crue de 1999 n'ont plus d'effet. Il n'existe pas d'anciens profils qui permettent de rendre compte des travaux réalisés.

Le débit de 1999 aurait largement dépassé celui de décembre 2012 et mai 2016 sur la Clarence amont.



4.12.1.4 Discussions

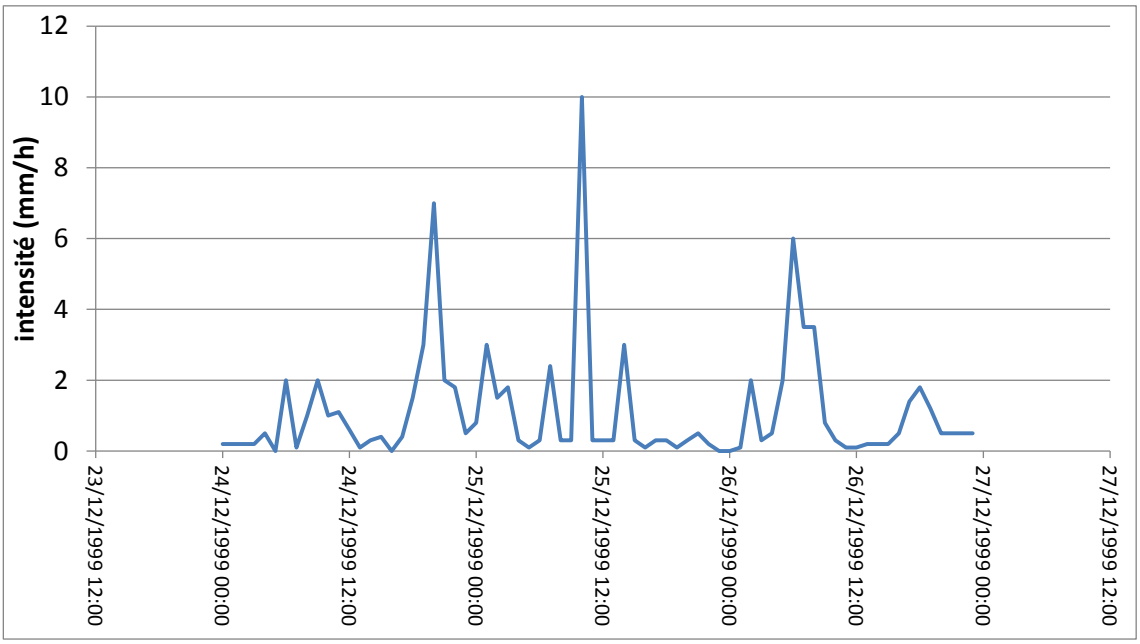
Cette différence notable entre les hydrogrammes de 1999 et 2012 ne se retrouve pas à l'aval comme le prouve la superposition des débits :



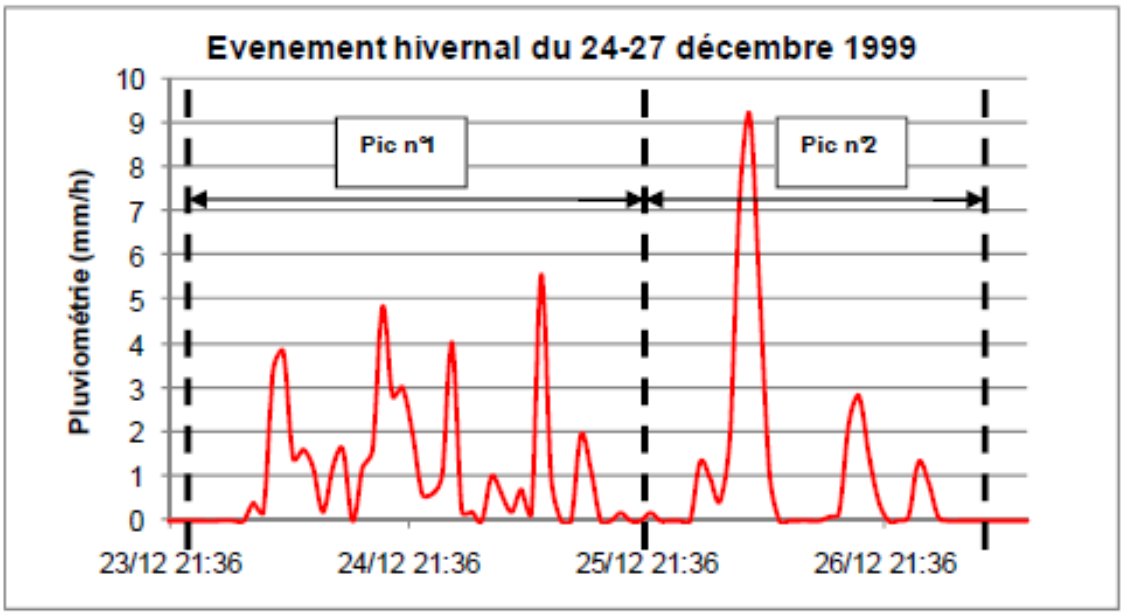
On sait que la rupture des digues le long de la Clarence et de la Nave, les transferts vers le Grand Nocq et la Busnes ont pu laminer très fortement les débits lors de l'évènement de 1999.

On peut par ailleurs tenter à partir des pluies de 1999 d'approcher le débit de pointe à Marles.

Les données radar sont disponibles mais ne fournissent pas d'intensité de pluie susceptible d'expliquer ce débit. En effet, les intensités sont au maximum de 10 mm/h le 26 décembre à 6 heures du matin et de 13 mm sur 3 heures.

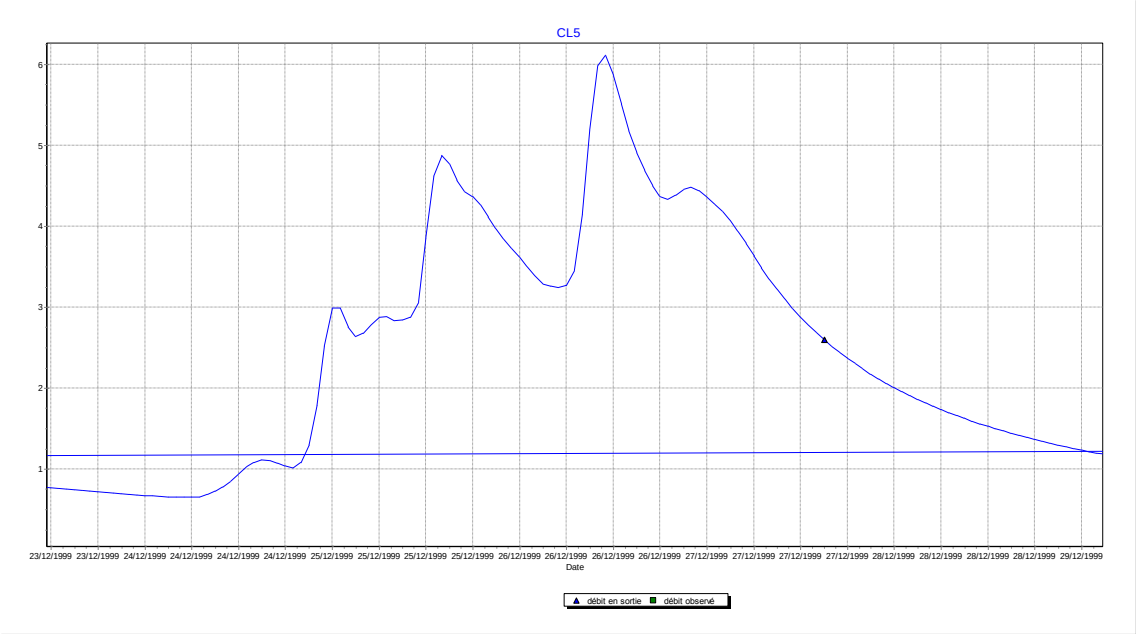


Ces pluies sont assez cohérentes avec celles présentées dans le cadre des études relatives au Tri de Béthune-Armentières :

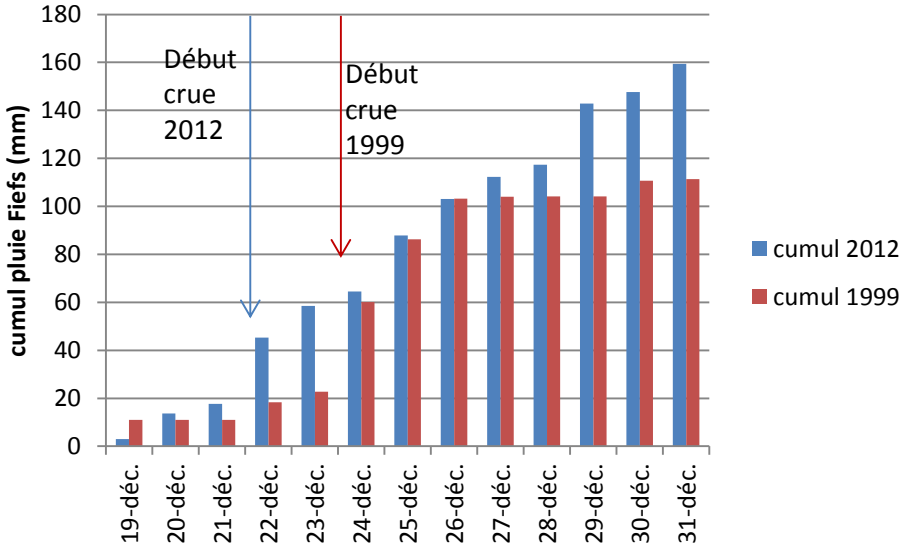


Source : ~~étude~~ étude Tri Béthune-Armentières

Le débit maximum estimé à Marles par le modèle est de 6 m3/s. Il est atteint vers 12 heures le 26 décembre (assez conforme à la réalité si on en juge par le film de l'évènement (début de décrue vers 14 heures)).



Lors de l'évènement de décembre 2012, les cumuls de pluie ont été supérieurs et les intensités du même ordre de grandeur.



Les saturations initiales à ces période de l'année sont assez comparables et globalement le cumul de pluies de novembre-décembre sont semblables bien qu'un peu supérieurs pour 2012.

On peut émettre trois explications à cette incohérence entre niveaux d'eau atteints et débit :

- Le débit de 1999 à Marles est mal jugé et les plaines d'inondation se sont davantage remplies du fait des ruptures dans les digues ce qui a engendré des niveaux d'eau importants dans les secteurs à enjeux ;les conditions

hydrauliques de 1999 pouvaient par ailleurs être plus défavorables qu'en 2012 (ouverture des ponts, embâcles, encombrement du lit),
- Les conditions de ruissellement ont été affectées par le gel,
- Il y a eu fonte d'un manteau neigeux sur les hauts plateaux.

Pour identifier si le débit de 1999 est sur estimé, on peut dans une première approche comparer les zones inondées de 1999 et les résultats du modèle de la simulation de l'évènement de mai 2016 (débit à Marles : 11 m3/s).

Même si le débit à Marles peut être un peu surestimé du fait des travaux de curage dont l'importance n'est pas connue et de la présence d'embâcles, le gel pourrait expliquer les différences de comportement. Une seconde analyse consistera à comparer les conditions initiales de décembre 2012 et décembre 1999.

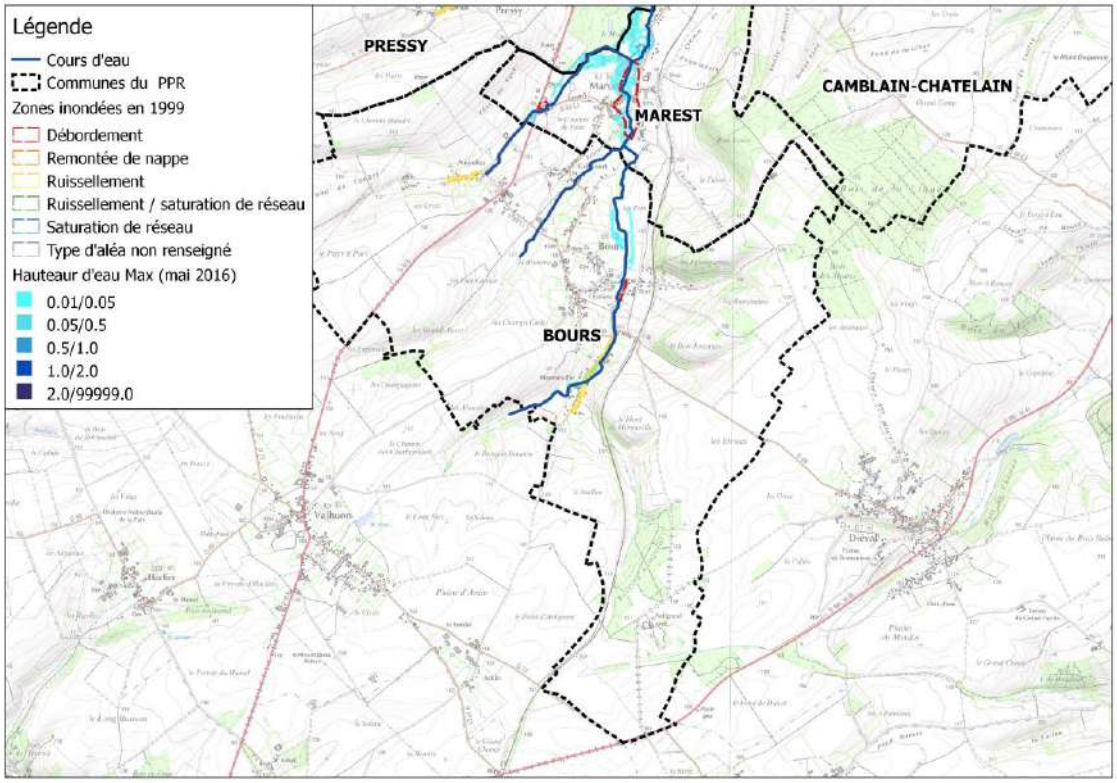
Des témoignages quant à l'existence d'un manteau neigeux le 25 décembre ont été recueillis lors des enquêtes. Nous testerons différentes épaisseurs de neige pour estimer l'influence que la fonte de ce manteau aurait pu avoir.

Nous ne retenons pas comme raison l'apparition d'une vague produite par le dégagement soudain d'un obstacle comme évoqué lors des enquêtes (voiture sous le pont de Pernes). Les volumes stockés en amont de l'ouvrage obstrué sont trop faibles pour provoquer des sur débits significatifs.

4.12.1.5 Comparaison des résultats du modèle de la crue de mai 2016 et des emprises de zones inondées de 1999

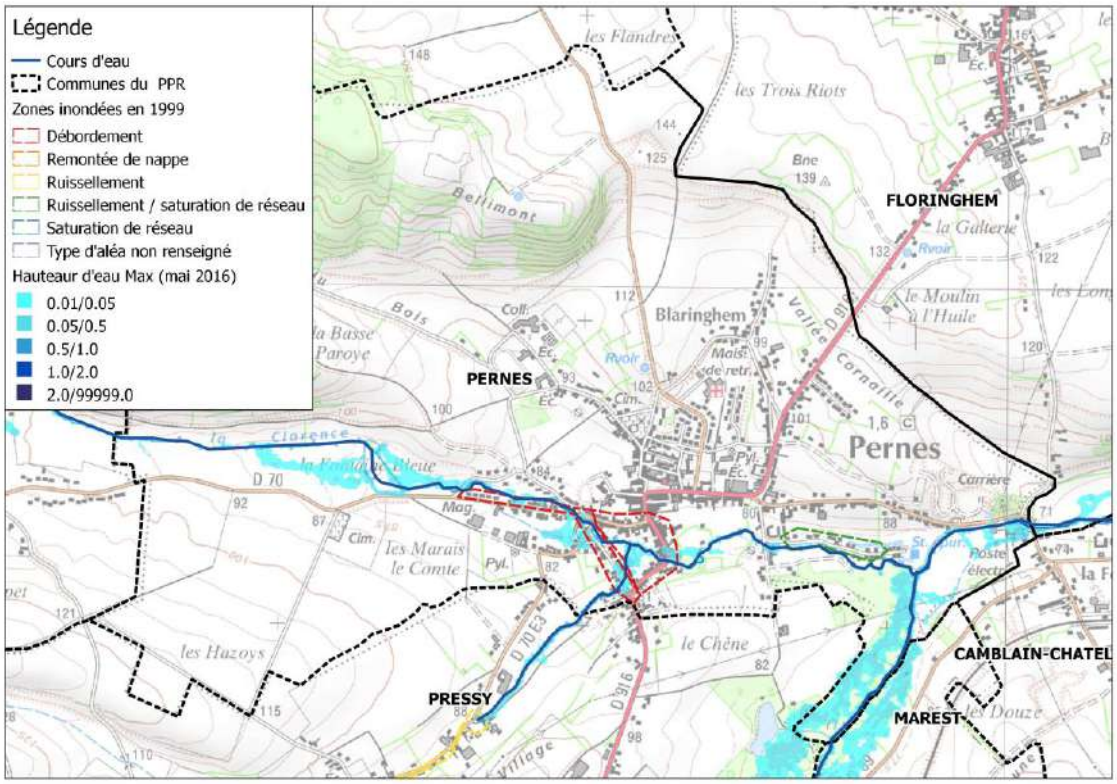
Bours et Marest

Les débordements coïncident. A l'échelle de l'emprise de 1999, il est difficile de retenir des différences notables. Des secteurs simulés inondés ne sont pas compris dans la délimitation des ZI de 1999.



Pernes

A Pernes, l'emprise des inondations de 1999 est plus grande que celle issue du modèle de la crue de mai 2016. Cependant, la zone inondée correspond au secteur localisé en amont de RD916. Or, durant la crue, on sait qu'une voiture est restée bloquée sous la voûte du pont. La comparaison n'est donc pas pertinente.

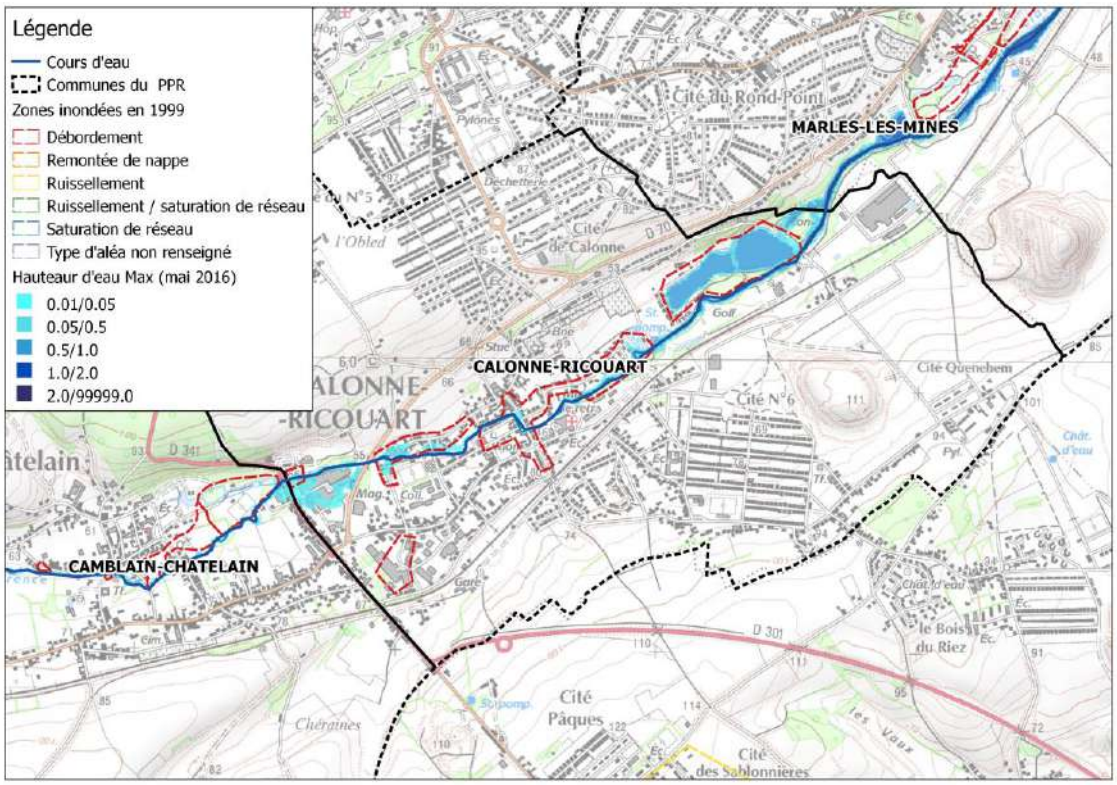


Camblain Chatelain

La Clarence a repris son ancien lit en 1999. Elle l'a repris sans doute en amont du pont qui était à l'époque une voûte. Il a été endommagé et la route également. On peut supposer alors que la perte de charge a été importante ce qui pourrait expliquer le passage. Nous n'avons pas les caractéristiques de la voûte de l'époque. L'emprise des zones inondées de 1999 sur Camblain Châtelain ne peut donc renseigner sur l'importance respective des débits de 1999 et 2016.

La Clarence à Calonne Ricouart

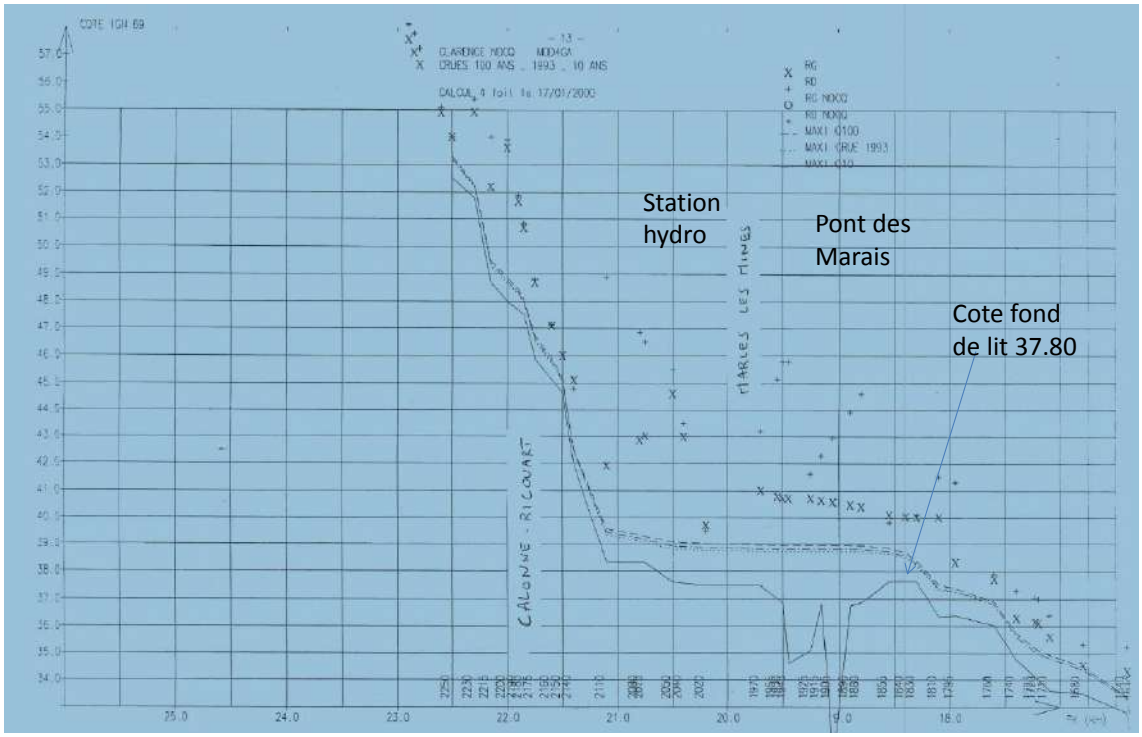
L'emprise de 1999 est supérieure à celle de 2016. Il ne semble pas que des changements hydrauliques significatifs aient eu lieu depuis lors hormis le tablier du pont qui a été refait. Son endommagement lors de la crue peut suggérer une perte de charge significative au droit de l'ouvrage ou bien des embâcles.



La Clarence à Marles

A Marles, la comparaison n'est pas possible puisque la digue en rive gauche a été surélevée.

Il est également question d'un curage de la Clarence. Nous avons recherché des éléments sur ce curage. Les services de la Mairie indiquent que ces curages ont concerné la partie comprise entre le pont de l'Eglise et le pont de la rue des résistants soit 700 mètres. L'étude des Zones inondées réalisée en 1998 a donné lieu à la réalisation d'un modèle Carima. L'extrait ci-dessous présente la ligne d'eau de la crue de 1993 et le profil en long du lit :

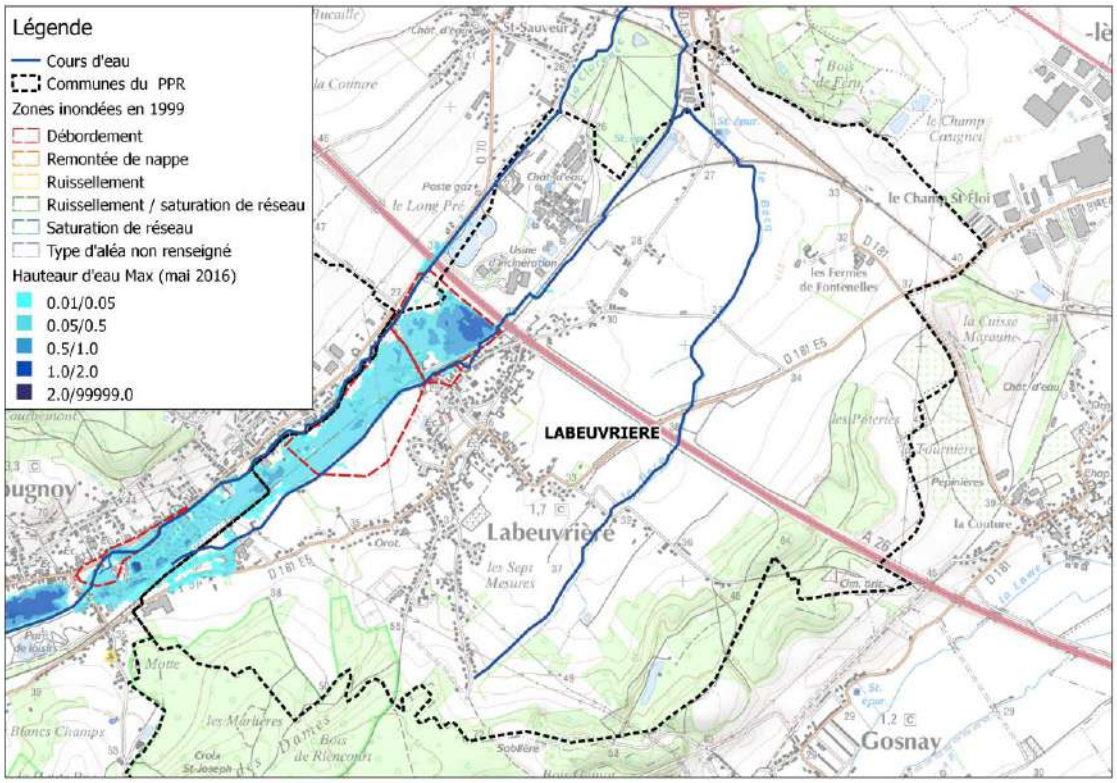


D'après cet archive, le fond de la Clarence s'élève à l'aval sur une distance de 500 mètres environ. Or la ligne d'eau est contrôlée en partie par le profil aval. Un curage de cette partie aura donc un effet significatif sur la ligne d'eau.

Les profils bathymétriques récents ne permettent malheureusement pas d'estimer les éventuelles différences.

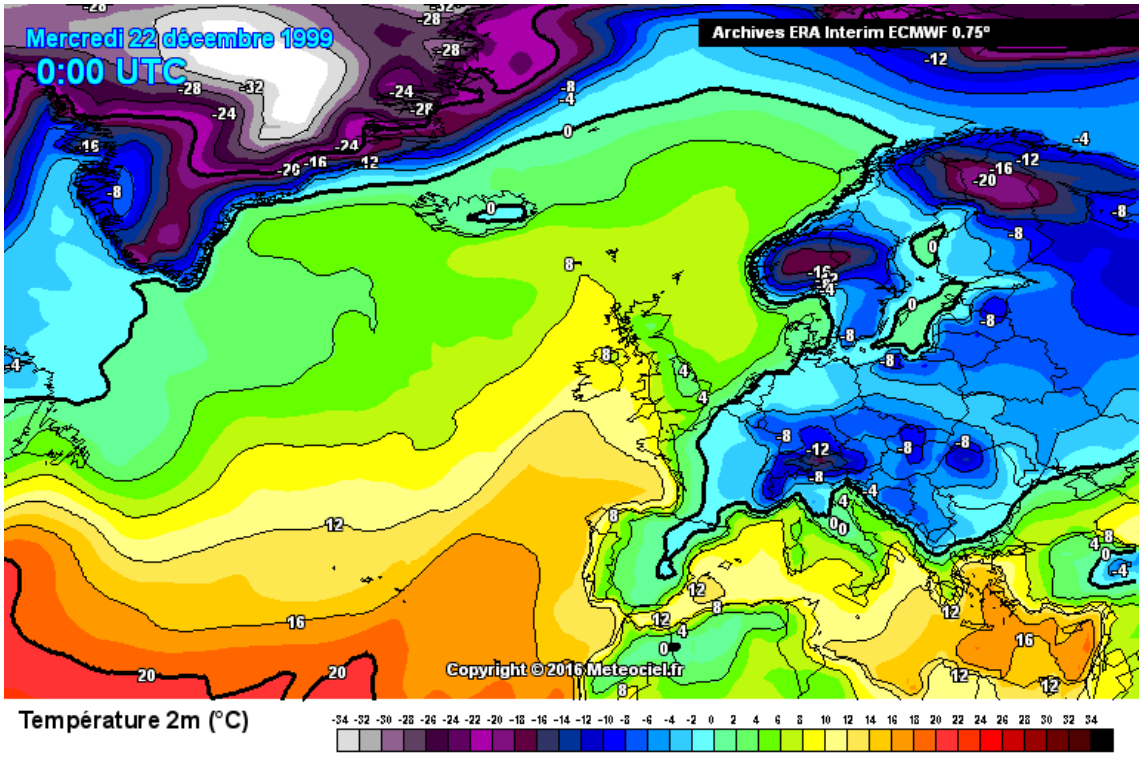
La Clarence à Lapugnoy et Labeuvrière

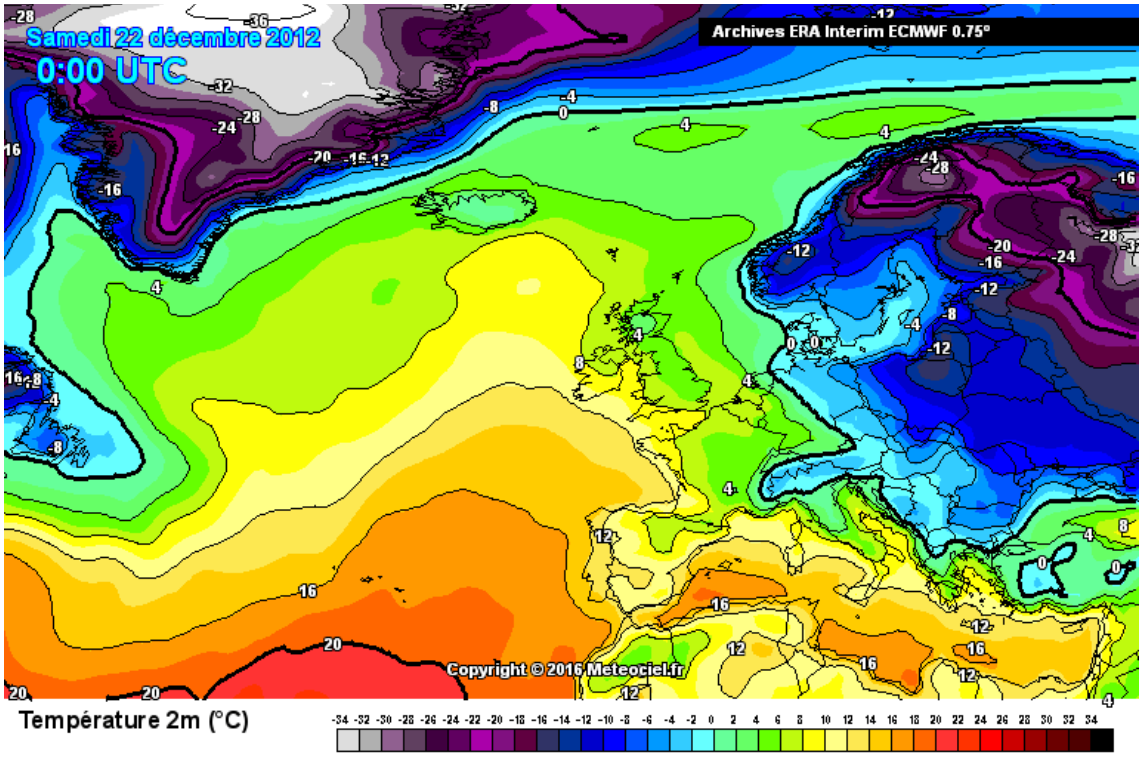
Globalement les emprises de 1999 sont comprises dans celles de 2016 excepté en rive droite de la Calonnette car une ZEC a été construite depuis.



4.12.1.6 Conditions initiales de saturation des sols

Les archives créées à partir des ré analyses de la ECMWF (Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme) nous renseignent sur la température au sol. Les cartes ci-après présentent les températures sur la journée des 22 décembre 1999 et 2012 :

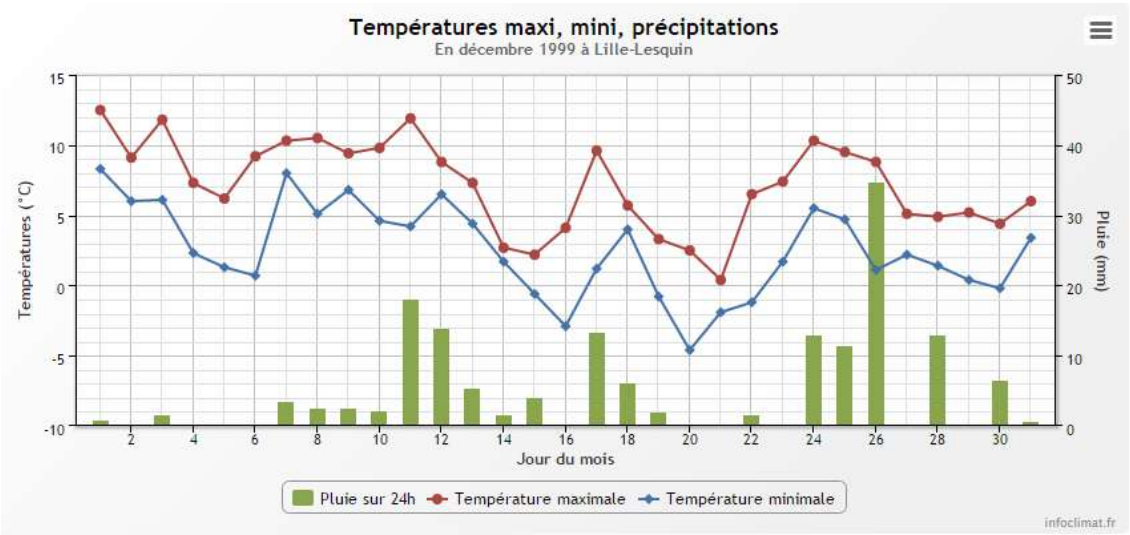


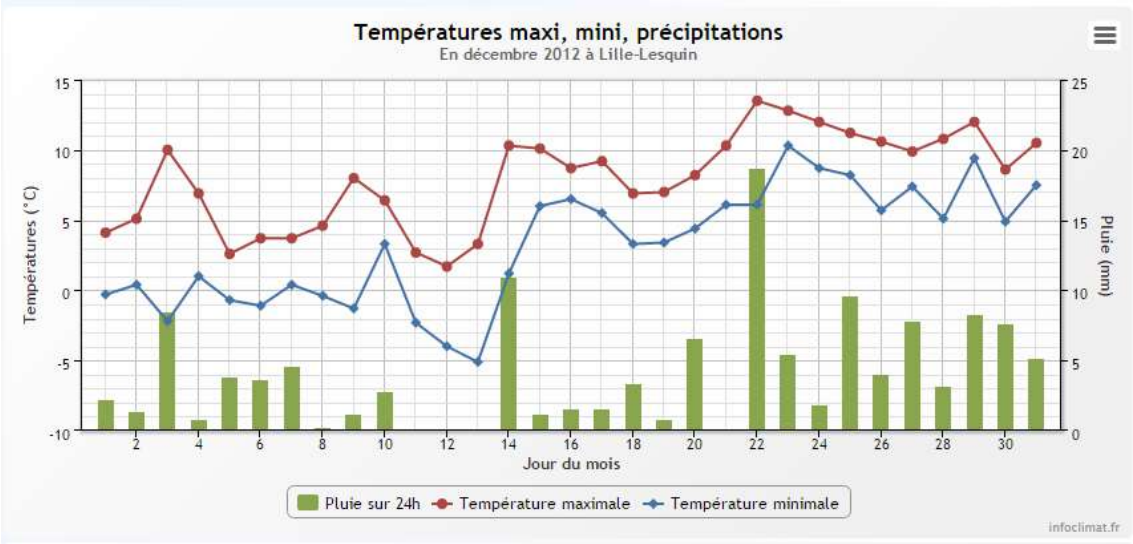


On constate que la Clarence est contenue dans un secteur de température négative. Cette période de froid a démarré le 15 décembre et s'est poursuivie jusqu'au 24 décembre mais des températures positives ont concerné la journée du 18 décembre. Cette période est tout juste suffisante pour permettre au gel de s'installer et de modifier les conditions de ruissellement lors du redoux du 25 décembre. A Lille il est fait état de neige les 15 et 20 décembre mais en faible importance (3 cm et 1 cm respectivement).

D'après la Mairie de Pernes, le 26 décembre à 5h du matin, « il pleut abondamment. Cette pluie fait fondre la neige des plateaux. La Clarence et son affluent le Pressy débordent ».

En 2012, les températures sont restées positives.





La neige des plateaux peut contribuer de manière significative au débit. Le manteau neigeux existait mais son importance n'est pas connue.

On a fait l'hypothèse d'un manteau de 6 centimètres sur l'ensemble du bassin versant contrôlé par la station de Marles.

On peut estimer la fonte journalière à partir d'une approche simplifiée selon les modèles degrés-jours :

mf (mm)=f (T-T0)

Avec mf : fonte en mm par jour

f : facteur de fonte entre 3 et 6 mm/d°C/j

T : température moyenne du jour

T0 : température de fonte (prise égal à 0°C)

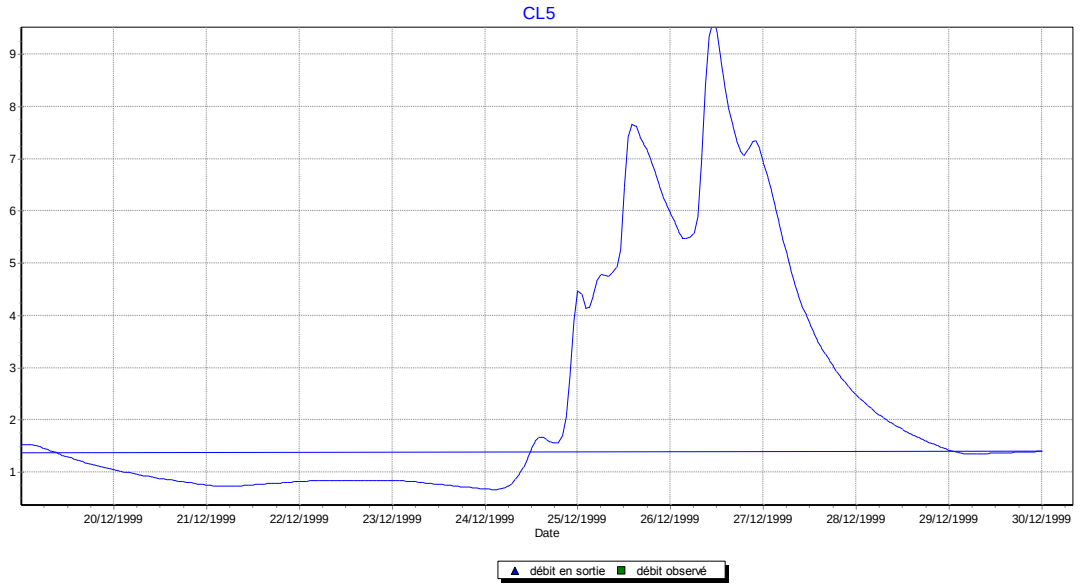
Le tableau ci-après présente l'équivalent en lame d'eau ruisselée par jour : la fonte produit un écoulement de 0,5 mm/h ; le manteau initial a une épaisseur d'au moins 6 cm.

	24/12/1999	25/12/1999
T-T0 (°C)	4	4
facteur de fonte (mm/d°C/j)	3	3
fonte (mm/j)	12	12
fonte/heure (mm/h)	0,5	0,5
équivalent en eau (mm)	12	12
masse volumique neige (kg/m3)	400	0,4
manteau (mm)	30	30

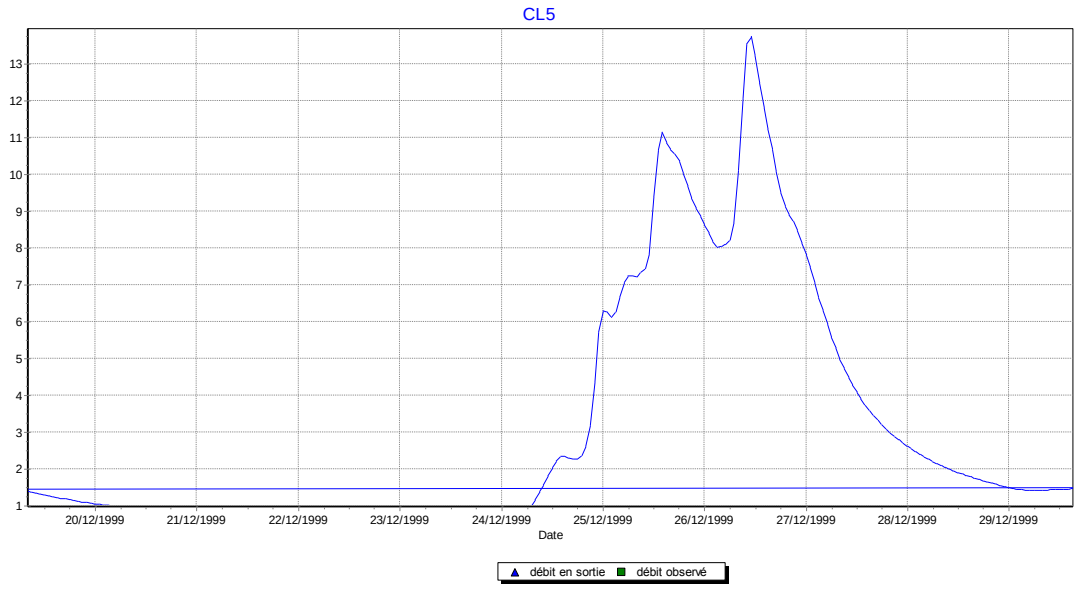
Sachant que les pluies tombant sur un manteau neigeux contribuent à la fonte, on peut également tester un facteur de fonte de 6 mm/j sous condition de présence d'un manteau de 12 cm d'épaisseur.

Ces deux hypothèses sont entrées dans GESRES en ajoutant à la pluie tombée la lame d'eau de fonte. On obtient les hydrogrammes suivants :

Fonte 0.5 mm/h : le débit passe à 9,5 m3/s



Fonte 1 mm/h : le débit passe à 14 m3/s



4.12.1.7 Conclusions

En conclusion, la période de gel qui a précédé l'épisode de 1999 est réelle mais de durée limitée. Elle a pu concerner les plateaux de manière plus significative et donc le haut bassin. Dans un secteur naturellement perméable, l'effet du gel est évidemment plus significatif. Nous ne pouvons aller plus loin dans l'analyse. Le passage d'un débit de 6-7 m3/s à un débit de 16-22 m3/s est cependant difficile à expliquer par ce seul fait.

La fonte du manteau neigeux a indubitablement eu une influence sur les débits. Une augmentation par 2 est possible si un manteau d'une douzaine de centimètres existait préalablement à l'évènement (crue de redoux).

Les travaux de curage à l'aval du pont des marais pourraient expliquer en partie la situation de 1999 car le profil aval contrôle les lignes d'eau sur ce secteur très plat (pente de la ligne d'eau très faible). Dans ce secteur, la présence d'embâcles peut également être très impactante sur les niveaux d'eau. Le Maire de Marles-les-Mines a fait part de la présence de déchets de toute sorte emportés par les eaux lors de l'évènement de 1999.

Dans l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible de fournir un débit pour la crue de 1999. Les 3 raisons précédentes ont pu se cumuler pour engendrer les niveaux d'eau observés à Marles.

4.13 Scénarios de rupture

4.13.1 Préambule

Comme indiqué aux chapitres précédents, les digues sont en général en mauvais état. De nombreux scénarios peuvent se produire et ont des conséquences bien différentes :

- Si toutes les digues résistent alors le laminage des débits est moindre et l'aval est davantage touché.
- Si les digues cèdent alors un laminage et des transferts s'initient et le Grand Nocq, la Busnes montent en débit. Les zones d'expansion concourent également au laminage des débits. ¨Par le passé, les deux crues exceptionnelles (1999 et 2002) ont conduit à des ruptures.

La situation la plus probable est donc l'apparition de ruptures. Des déversements au-dessus des digues sans rupture sont cependant possibles pour des lames d'eau inférieures à +20 cm et sur des durées courtes.

Un scénario est défini par un nombre de brèches, la largeur des brèches et l'instant de formation. Le nombre de brèches est limité par l'effet amont aval des laminages des débits. En effet, une brèche qui se produit à Manqueville en laminant les débits réduit les risques de ruptures à l'aval ce d'autant plus que des palplanches renforcent les ouvrages.

Sur la Clarence, une rupture à Marles réduit les risques de rupture à Chocques. De même, l'édification d'un merlon pour réduire les transferts au droit de la route de l'Abbaye à Chocques augmente les risques de rupture à l'aval.

4.13.2 Scénarios retenus

<u>Localisation</u>

La localisation des brèches est déterminée à partir des critères suivants :

- Etat des digues
- Désordres constatés et brèches historiques,
- Points bas
- Secteurs à enjeux directement affectés

Nous proposons de tester les scénarios suivants :

- Des ruptures amont : à Manqueville et à l'amont immédiat du pont à Marles,
- Des ruptures intermédiaires sur la Clarence en amont immédiat de la route de l'Abbaye et une rupture en amont de la zone urbanisée de Lillers,
- Une rupture dans la zone urbanisée de Lillers, une rupture à l'amont de Gonnehem,
- Une rupture à l'aval de Gonnehem.

<u>Instant d'ouverture des brèches</u>

La rupture par déversement sur la crête de la digue constitue le mécanisme le plus fréquent de ruine des digues en remblai.

La rupture commence par l'érosion du pied de la digue côté val où les vitesses sont les plus fortes. Cette érosion se propage ensuite de manière régressive vers la rivière jusqu'à atteindre le point de surverse. L'ouverture d'une brèche est alors rapide.

Cette rupture se produit si la sollicitation (lame de surverse et durée de surverse) est suffisante.

La mise en vitesse de l'écoulement sur le parement aval dépend de la hauteur du parement aval, de sa pente et de son revêtement (rugosité).

La résistance à l'érosion de la digue en pied de parement aval dépend du revêtement du parement et de la nature du remblai (cohésion, compacité).

Les conditions d'écoulement de surverse pouvant induire une érosion importante en fonction du type de remblai sont cependant mal connues d'un point de vue quantitatif et les références dans la littérature sont peu nombreuses.

Des valeurs de hauteurs de surverse critiques (entrainant un début d'érosion du parement aval et non la formation d'une brèche) ont été proposées pour les barrages en trois catégories (Source : Froehlich D, 1995).

Qualité de construction du barrage	Description du barrage	Hauteur de surverse critique
Bonne	Parements amont et aval en bon état, pratiquement pas de fuites, pas de tassement notable	0,6 m
Moyenne	Fuites modérées, quelques tassements en crête, quelques érosions sur les parements	0,3 m
Mauvaise	Fuites importantes, érosions sur les parements, des affaissements significatifs sur la crête, fissurations dans le remblai	0,0

Figure 72: Hauteurs de surverse critiques

On retiendra que l'érosion démarre dès le début de la surverse avec de faibles lames d'eau (inférieures à 10 cm) pour les ouvrages dont la qualité de construction a été médiocre. En revanche, un ouvrage bien compacté et enherbé peut supporter des lames d'eau plus importantes (typiquement 10 à 30 cm) pendant quelques heures.

Nous retiendrons dans le cas des digues pour lesquelles le processus dominant est la surverse une lame d'eau de 20 cm du fait de la cohésion des parements.

La surverse n'est pas le seul processus qui peut intervenir dans l'apparition d'une brèche. Sur les digues de la Clarence, l'érosion interne peut être pour certaines digues le phénomène déclencheur. C'est le cas lorsque la digue présente une proportion significative de terriers d'animaux fouisseurs.

Dans ces conditions, les hypothèses sont les suivantes :

- Manqueville : par surverse, lame d'eau de 20 cm,

- Marles : érosion interne à l'interface ancienne/nouvelle digue
- La Nave en omont de la zone urbanisée de Lillers : par surverse, lame d'eau de 20 cm,
- Clarence amont pont de l'Abbaye : par surverse, lame d'eau 20 cm,
- La Nave à Lillers : par surverse, lame d'eau de 20 cm,
- La Clarence à Gonnehem, amont et aval : érosion interne dès atteinte d'une charge sur l'ouvrage de 1 mètre.

largeur des brèches et temps d'ouverture

La largeur des brèches peut être appréhendée selon deux approches :

- Une approche théorique
- Une approche historique

Approche théorique

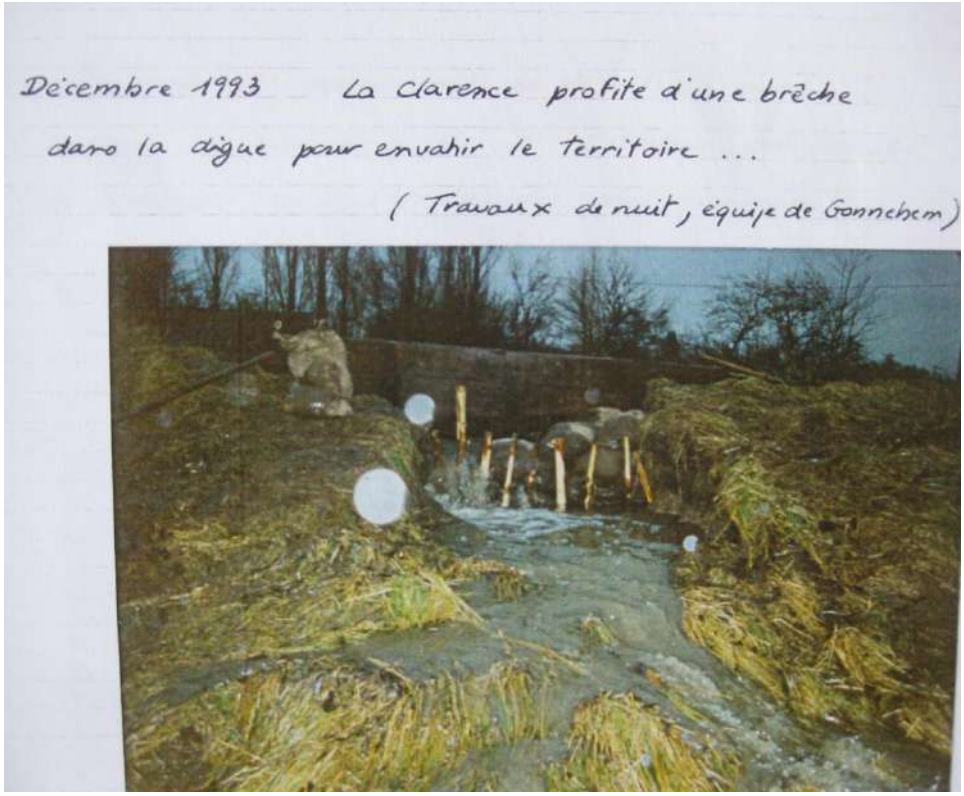
Dans bien des cas, le cours d'eau est perché par rapport au fond de vallée. En cas de brèche, il y a changement de cours, enfoncement et abaissement substantiel du niveau d'eau donc réduction des forces permettant d'élargir la brèche. La largeur dépend de la qualité de la fondation (fosse d'érosion), de la qualité des matériaux de la digue qui vont devenir berges (dans notre cas matériaux cohésifs), du débit amont et de sa durée.

La durée des crues fait que la brèche ne peut excéder significativement la largeur du cours d'eau car cette largeur en réduisant les forces tractrices de l'écoulement réduit la vitesse d'élargissement. Les vitesses d'élargissement couramment rencontrées en début de processus sont de l'ordre du mètre par minute. On peut faire l'approximation d'ouverture instantanée de la brèche.

La largeur au miroir du cours d'eau est comprise entre 5 et 8 mètres. L'approche théorique conduit donc à des largeurs de cet ordre de grandeur.

Approche historique

La photo ci après présente un début du processus d'érosion du talus en 1993. Constatons que c'est à partir d'une brèche déjà bien formée que démarre le processus d'élargissement comme l'a analysé G Charrier au cours de sa thèse sur le sujet.



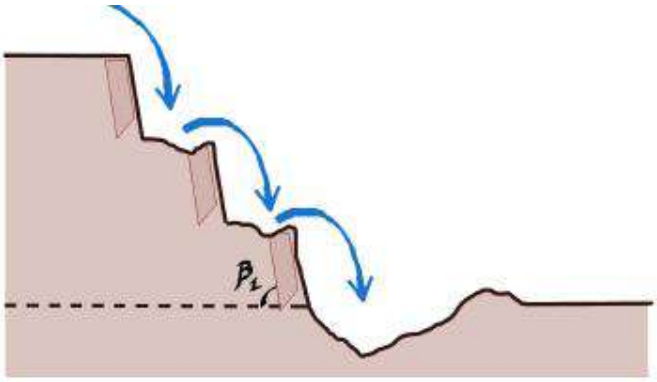


Figure 40 – Headcut à plusieurs marches (fondation érodable).

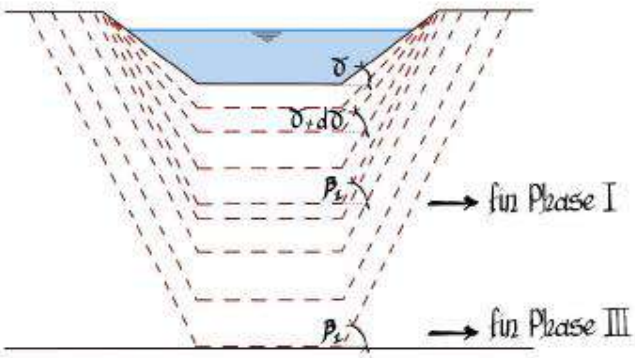


Figure 41 – Evolution générale du profil transversal des brèches durant les 3 premières phases de développement. Le chenal pilote subit une érosion verticale progressive et l'angle des parois (γ) augmente jusqu'à la valeur critique β_1 où l'élargissement peut débuter.

Source : thèse de G. Charrier, 2015

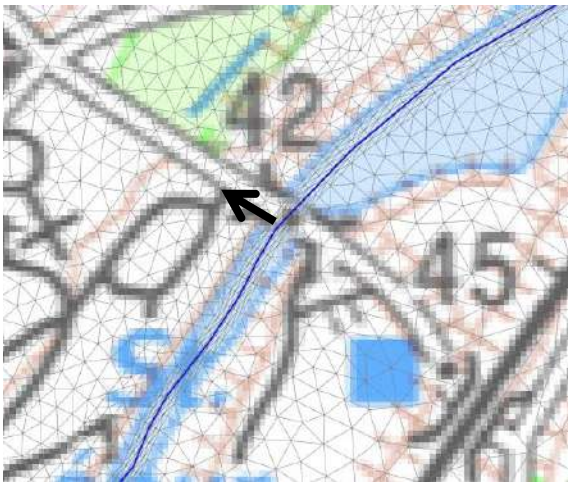
Au niveau de Manqueville, la brèche de 1999 était de largeur environ 7 mètres (de l'ordre de grandeur de la largeur du lit).

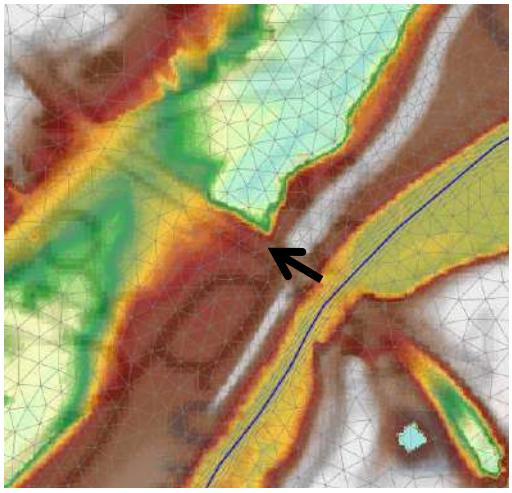
Les deux approches conduisent à retenir des largeurs de 7 mètres.

4.13.3 Précision sur la localisation des brèches

4.13.3.1 Scénario 1 sur la CLarence : SC1 – CLA

Les figures ci-dessous illustrent la situation de la brèche réalisée au droit du merlon en rive gauche au niveau de l'Eglise de Marles.



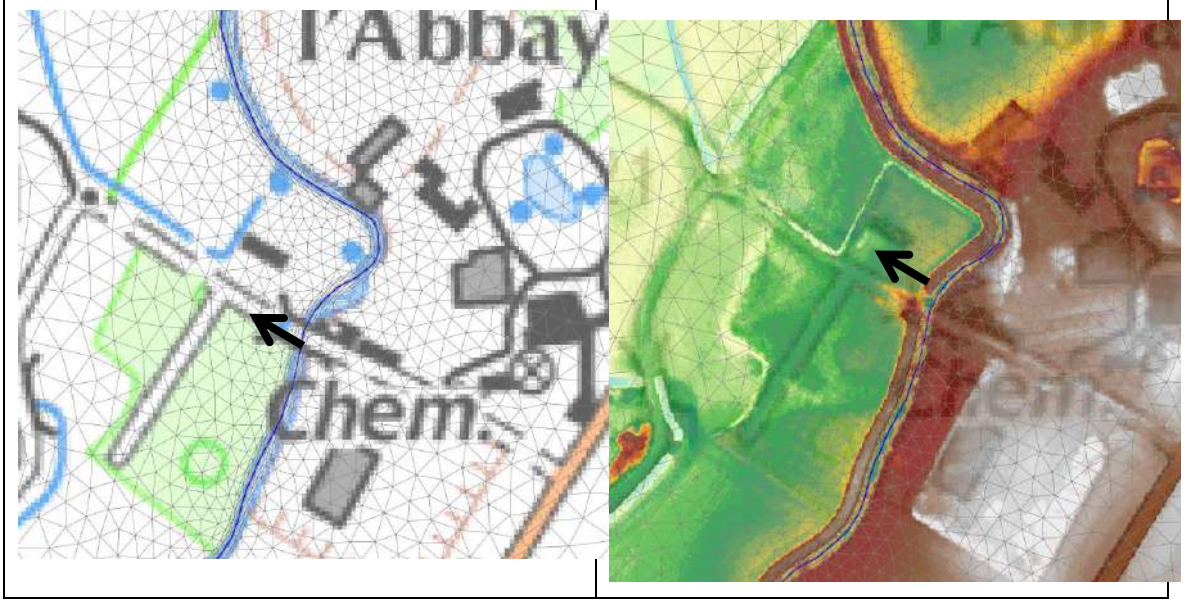


Les caractéristiques de la brèche sont rappelées ci-dessous :

- Largeur de la brèche : 7 mètres
- Cote d'eau initiale de déclenchement de la brèche : 39,7 mNGF
- Cote TN finale : 39,7 mNGF

4.13.3.2 Scénario 2 sur la CLarence : SC3 – CLA

Les figures ci-dessous illustrent la situation de la brèche réalisée au niveau de l'abbaye de Chocques. La brèche se situe en rive gauche, en amont immédiat du chemin qui franchit la Clarence.

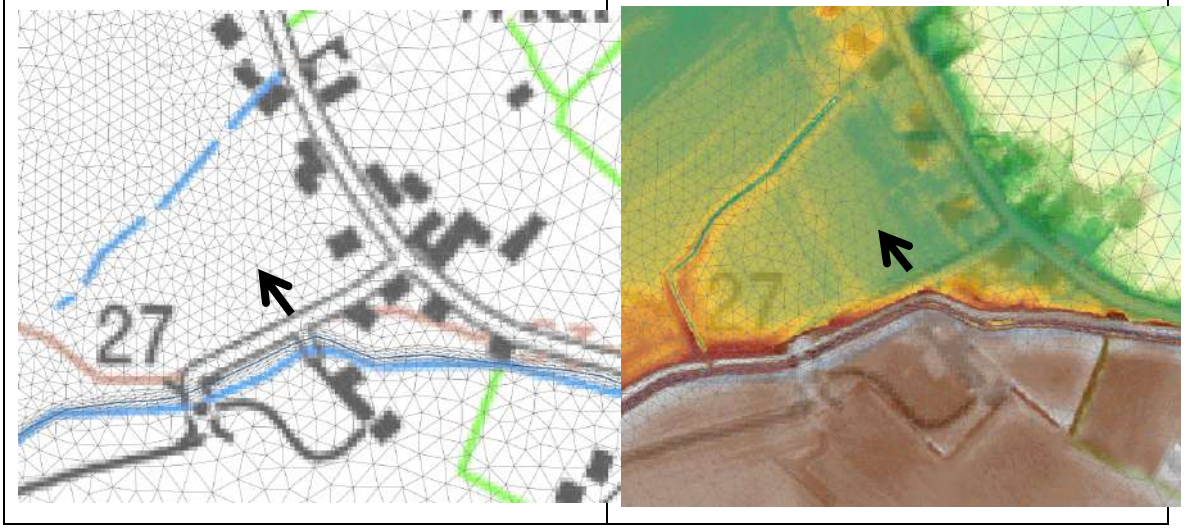


Les caractéristiques de la brèche sont rappelées ci-dessous :

- Largeur de la brèche : 7 mètres
- La cote d'eau initiale de déclenchement de la brèche correspond à une lame d'eau de 20 centimètres au niveau du point bas du chemin de l'abbaye, c'est-à-dire 22,9 + 0,2 = 23,1 mNGF
- Cote TN finale : 21,5 mNGF

4.13.3.3 Scénario 3 sur La Nave : SC1 – NAV

Les figures ci-dessous illustrent la situation de la brèche réalisée au niveau de Manqueville sur la Nave. La brèche se situe en rive gauche, au niveau de la surverse qui a eu lieu en 2005.

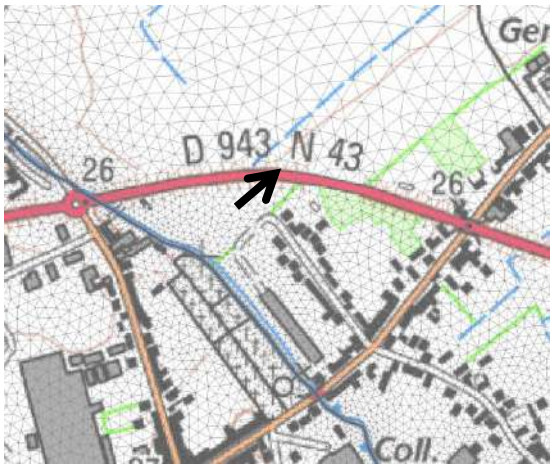


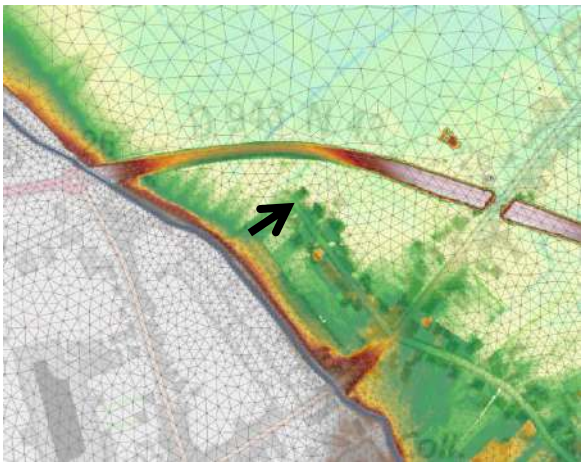
Les caractéristiques de la brèche sont rappelées ci-dessous :

- Largeur de la brèche : 7 mètres
- La cote d'eau initiale de déclenchement de la brèche correspond à une lame d'eau de 20 centimètres au niveau du point bas de la crête de digue, c'est-à-dire 25,6 + 0,2 = 25,8 mNGF
- Cote TN finale : 23,8 mNGF

4.13.3.4 Scénario 4 sur La Nave : SC2 – NAV

Les figures ci-dessous illustrent la situation de la brèche réalisée en amont de la commune de Lillers sur la Nave. La brèche se situe en rive gauche, en aval du croisement entre la D 943 et de la rue d'Ham.



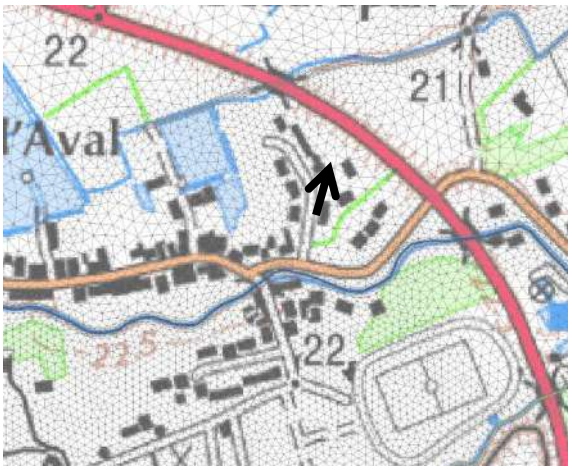


Les caractéristiques de la brèche sont rappelées ci-dessous :

- Largeur de la brèche : 7 mètres
- La cote d'eau initiale de déclenchement de la brèche correspond à une lame d'eau de 20 centimètres au niveau du point bas de la crête de digue, c'est-à-dire 23,45 + 0,2 = 23,65 mNGF
- Cote TN finale : 23 mNGF

4.13.3.5 Scénario 5 sur La Nave : SC3 – NAV

Les figures ci-dessous illustrent la situation de la brèche réalisée en aval de la commune de Lillers sur la Nave. La brèche se situe en rive gauche, en amont du croisement entre la D 943 et de la D69.

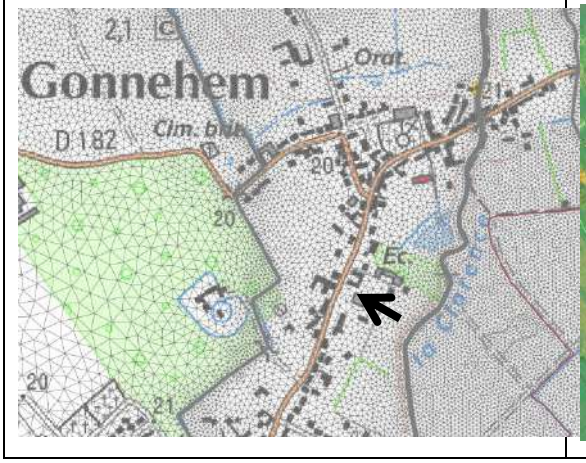


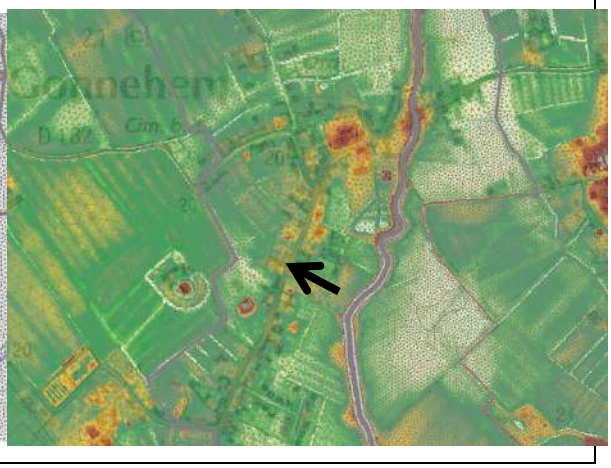
Les caractéristiques de la brèche sont rappelées ci-dessous :

- Largeur de la brèche : 7 mètres
- La cote d'eau initiale de déclenchement de la brèche correspond à la cote maximale atteinte au droit de la brèche projetée : 22,35 mNGF.
- Cote TN finale : 21,15 mNGF

4.13.3.6 Scénario 6 sur La CLARENCE : SC4 – CLA - AMONT

Les figures ci-dessous illustrent la situation de la brèche réalisée en amont de la commune de Gonnehem sur la Clarence. La brèche se situe en rive gauche, dans l'extrados d'un méandre du cours d'eau.



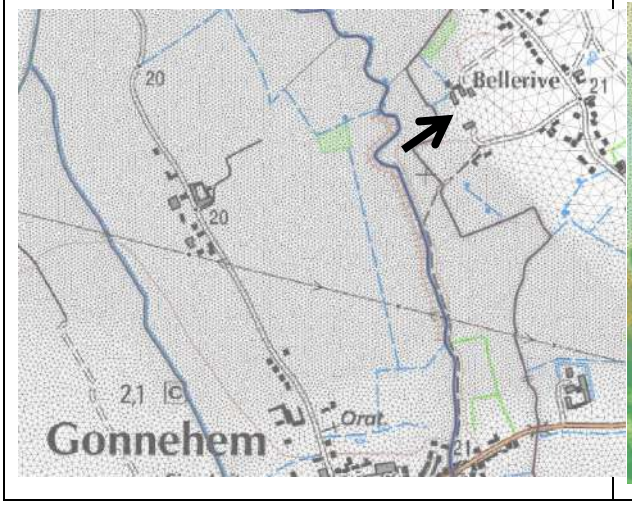


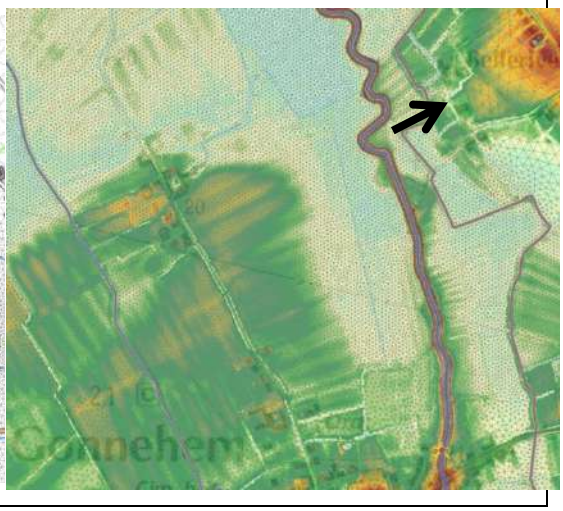
Les caractéristiques de la brèche sont rappelées ci-dessous :

- Largeur de la brèche : 7 mètres
- La cote d'eau initiale de déclenchement de la brèche correspond à une mise en charge de la digue d'un mètre : 21,30 mNGF.
- Cote TN finale : 20,30 mNGF

4.13.3.7 Scénario 7 sur La CLARENCE : SC4 – CLA - AVal

Les figures ci-dessous illustrent la situation de la brèche réalisée en aval de la commune de Gonnehem sur la Clarence. La brèche se situe en rive droite, dans l'extrados d'un méandre du cours d'eau.



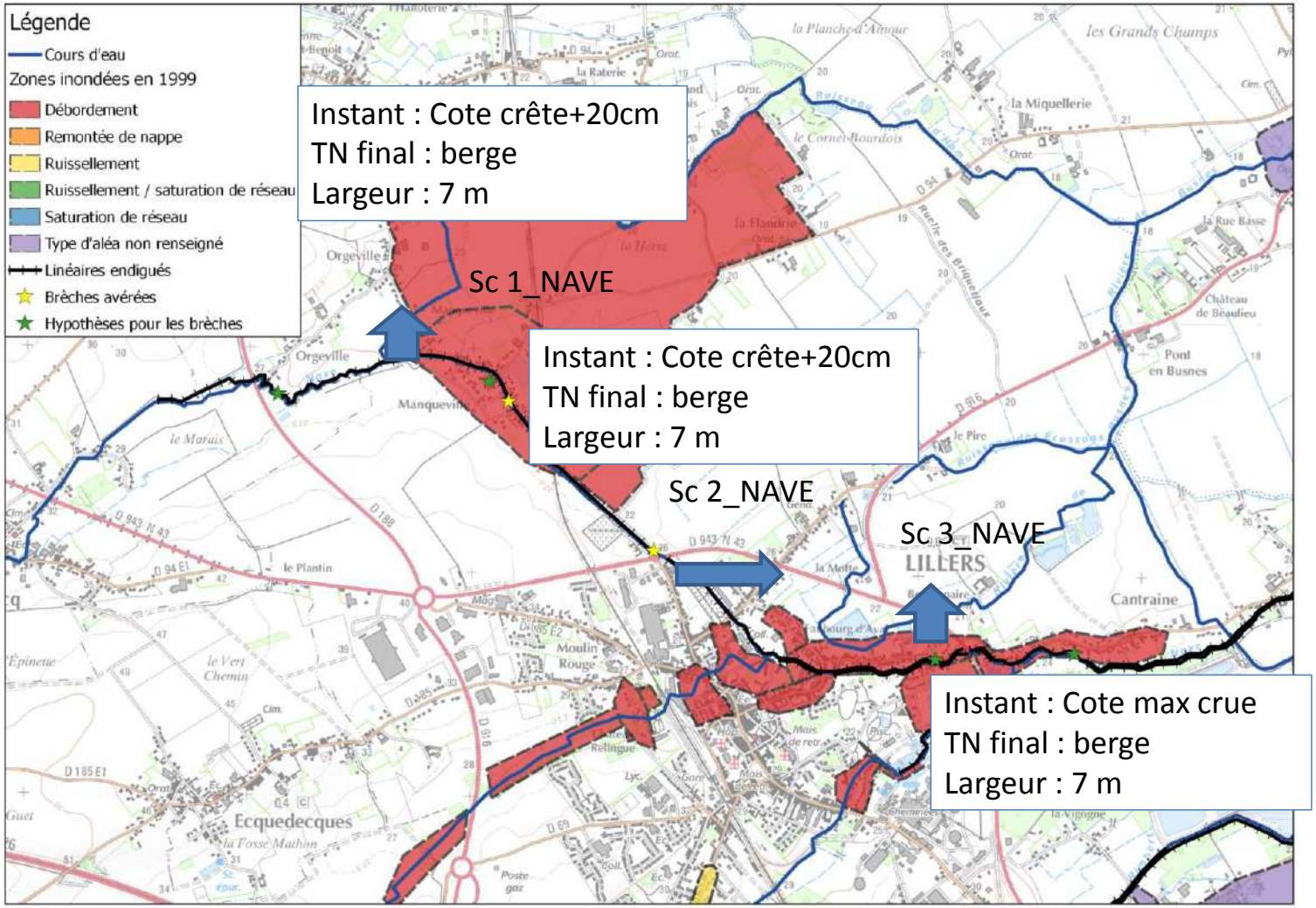


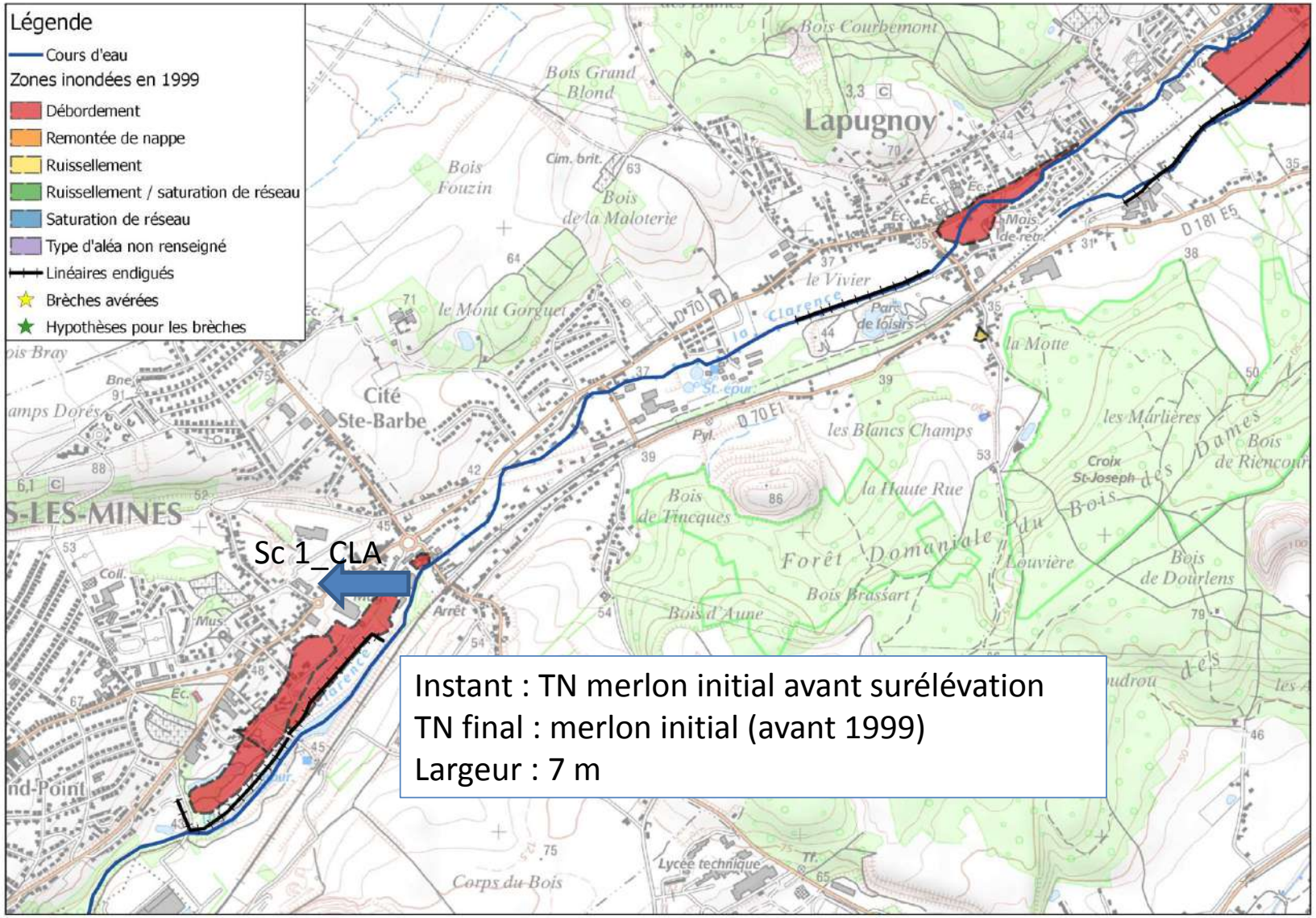
Les caractéristiques de la brèche sont rappelées ci-dessous :

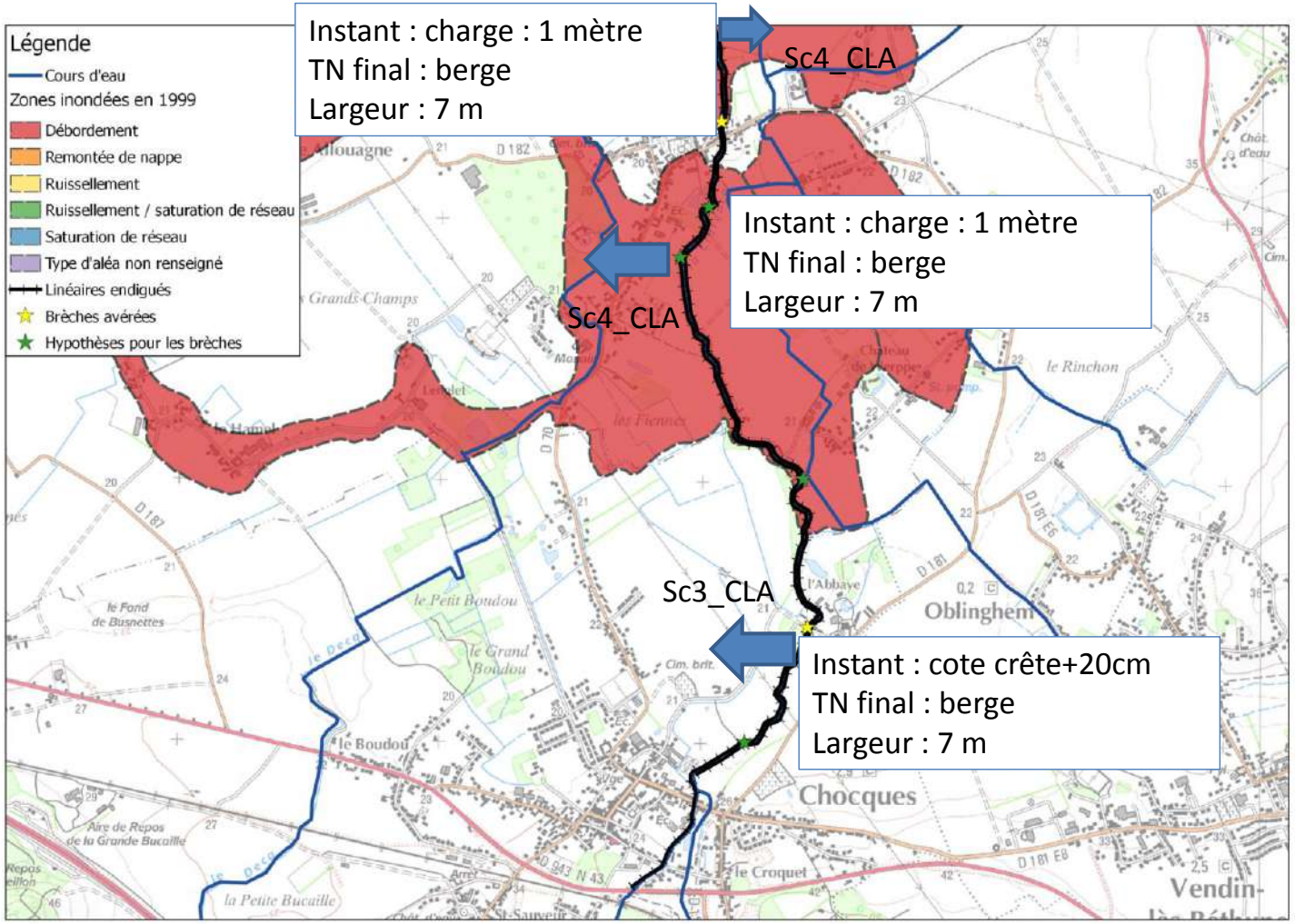
- Largeur de la brèche : 7 mètres
- La cote d'eau initiale de déclenchement de la brèche correspond à une mise en charge de la digue d'un mètre : 20,50 mNGF.
- Cote TN finale : 19,50 mNGF

4.13.3.8 Coordonnées des sites de ruptures

Nom du site	X	Y
SC1_CLA	665167.29	7044898.41
SC3_CLA	670325.6	7050002.72
SC1_NAV	661673.27	7053630.05
SC2_NAV	662955.61	7052617.93
SC3_NAV	663994.24	7052253.68
SC4_CLA_AVAL	669903.11	7052555.52
SC4_CLA_AMONT	669845.05	7051455.33


Légende
Cours d'eau
Zones inondées en 1999
Débordement
Remontée de nappe
Ruissellement
Ruissellement / saturation de réseau
Saturation de réseau
Type d'aléa non renseigné
Linéaires endigués
Brèches avérées
Hypothèses pour les brèches
Instant : Cote crête+20cm
TN final : berge
Largeur : 7 m
Sc 1_NAVE
Instant : Cote crête+20cm
TN final : berge
Largeur : 7 m
Sc 2_NAVE
Sc 3_NAVE
Instant : Cote max crue
TN final : berge
Largeur : 7 m
Orgeville
Manqueville
LILLERS
Ecquedecques
Moulin Rouge
Cantraine
Pont en Busnes
Château de Beaulieu
la Miquellerie
les Grands Champs
la Planche d'Amour
le Cornet-Bourdois
la Rue Basse
le Marais
le Plantin
le Vert Chemin
Épinette
la Fosse Mathon
le Pire


Légende
Cours d'eau
Zones inondées en 1999
Débordement
Remontée de nappe
Ruissellement
Ruissellement / saturation de réseau
Saturation de réseau
Type d'aléa non renseigné
Linéaires endigués
Brèches avérées
Hypothèses pour les brèches
Sc 1_CLA
Lapugnoy
Cité
Ste-Barbe
Bois Courbemont
Bois Grand Blond
Bois Fouzin
Bois de la Maloterie
le Mont Gorguet
le Vivier
la Clarence
Parc de loisirs
la Motte
les Blancs Champs
la Haute Rue
Bois de Tincques
Forêt Domaniale du Louvière
Bois Brassart
Bois d'Aune
les Marlières
Bois des Dames
Bois de Riencourt
Bois de Dourlens
Croix St-Joseph
Lycée technique
Corps du Bois
Instant : TN merlon initial avant surélévation
TN final : merlon initial (avant 1999)
Largeur : 7 m


Légende
Cours d'eau
Zones inondées en 1999
Débordement
Remontée de nappe
Ruissellement
Ruissellement / saturation de réseau
Saturation de réseau
Type d'aléa non renseigné
Linéaires endigués
Brèches avérées
Hypothèses pour les brèches
Instant : charge : 1 mètre
TN final : berge
Largeur : 7 m
Sc4_CLA
Sc4_CLA
Instant : charge : 1 mètre
TN final : berge
Largeur : 7 m
Sc3_CLA
Instant : cote crête+20cm
TN final : berge
Largeur : 7 m
Oblinghem
Chocques
le Rinchon
le Petit Boudou
le Grand Boudou
le Boudou
le Croquet
la Petite Bucaille
le Fond de Busnettes
Aire de Repos de la Grande Bucaille
Vendin-

4.14 Choix de l'évènement de référence

4.14.1 Rappel de la méthodologie

Pour estimer l'évènement de référence, les méthodes disponibles sont les suivantes :

- Réaliser un ajustement statistique des débits maximaux enregistrés à une station hydrométrique, en déduire le débit centennal, puis extrapoler ces résultats à chacun des sous bassins versant en faisant l'hypothèse d'une relation avec la surface du bassin versant,
- Réaliser un ajustement statistique des débits maximaux enregistrés à une station hydrométrique, en déduire le débit décennal, puis appliquer la méthode du gradex progressif pour extrapoler l'ajustement pour les plus grandes périodes de retour ; enfin extrapoler ces résultats à chacun des sous bassins versant en faisant l'hypothèse d'une relation avec la surface du bassin versant,
- Réaliser un ajustement statistique des débits maximaux enregistrés à une station hydrométrique, en déduire le débit décennal, puis appliquer la méthode du gradex pour extrapoler l'ajustement pour les plus grandes périodes de retour ; enfin extrapoler ces résultats à chacun des sous bassins versant en faisant l'hypothèse d'une relation avec la surface du bassin versant,
- Réaliser un modèle pluie débit calé sur les observations puis utiliser ce modèle en appliquant un évènement pluviométrique de période de retour 100 ans,
- Réaliser un modèle pluie débit calé sur les observations puis utiliser ce modèle en appliquant une série de pluies tirée d'un modèle générateur stochastique de pluie,
- Réaliser un modèle pluie débit et un modèle de propagation hydraulique calé sur les observations puis utiliser ce modèle en appliquant une pluie de référence.

Chaque méthode a des avantages et inconvénients. Les méthodes qui font appel au gradex sont peu adaptées à nos conditions. Les approches statistiques sur les débits moyens maximaux sont néanmoins possibles.

4.14.2 Approche statistique sur les débits

4.14.2.1 Problématique

Les particularités du système hydraulique font qu'à Robecq, les hydrogrammes de crue sont fortement laminés. Une vaste zone de stockage existe à l'aval de Chocques sur la Clarence et des transferts de la Nave vers d'autres bassins ont lieu. A Robecq, l'approche statistique par les débits maxima journaliers n'est pas pertinente. La visualisation des hydrogramme conduit à étudier plutôt l'échantillon des débits moyens sur une durée de 3 jours, c'est à dire le volume d'eau qui transite à l'aval pendant 3 jours.

A Marles, le laminage ne joue par un rôle significatif. Des approches statistiques standard pourraient être envisagés. Cependant, la taille de l'échantillon ne le permet pas. Aussi retiendrons-nous un ajustement statistique des débits journaliers issus d'un modèle stochastique de pluie.

4.14.2.2 Ajustement statistique des débits moyens sur une durée de 3 jours à Robecq

La détermination des débits de référence correspondant à la durée 3 jours à la station de Robecq est effectuée par ajustement statistique de Gumbel.

33 années de données sont disponibles pour les différents débits maximaux moyens sur la durée X (VCX).

Les ajustements de Gumbel ont été effectués sur les maximas annuels des débits cumulés sur X jours et ce sur l'année hydrologique (septembre à août).

- L'ajustement n°1 tient compte des 33 années de données.
- L'ajustement n°2 ne tient pas compte des années pour lesquelles les valeurs sont « estimées » (c'est-à-dire mesurées ou reconstituées) et que le gestionnaire juge incertaine[1].

Le Tableau 3 indique pour chaque cumul, les années qui ne sont pas prises en compte dans l'ajustement n°2.

	VC3
Années non retenues	1970
	1987
	1989
	1990
	2002
	2012
Total	5

Tableau 3 : Années non retenues dans l'ajustement n°2

Le tableau ci-après présente les valeurs des débits moyens sur 3 jours depuis 1970 à Robecq :

Année	Date début	Date fin	Débit moyen 3 jours (m3/s)
1970	12-mars	14-mars	3.780
1971	27-janv	29-janv	1.510
1972	18-mai	20-mai	1.220
1972	20-nov	22-nov	1.250
1974	18-mars	20-mars	1.270
1974	16-nov	18-nov	4.130
1975	02-déc	04-déc	2.830
1984	06-févr	08-févr	2.650
1987	23-mars	25-mars	3.970
1989	05-avr	07-avr	3.570

[1] Codification issue de la Banque Hydro

1990	15-févr	17-févr	2.670
1992	03-juin	05-juin	3.160
1993	11-janv	13-janv	5.170
1995	28-janv	30-janv	7.570
1996	29-août	31-août	1.740
1997	07-juin	09-juin	2.710
1998	05-janv	07-janv	3.750
1998	03-nov	05-nov	5.200
1999	26-déc	28-déc	7.860
2001	05-janv	07-janv	6.140
2002	26-févr	28-févr	6.100
2004	13-janv	15-janv	3.150
2005	04-juil	06-juil	4.320
2006	14-juin	16-juin	3.130
2007	24-juil	26-juil	4.970
2007	10-déc	12-déc	4.080
2009	23-janv	25-janv	3.990
2009	28-nov	30-nov	3.950
2011	13-janv	15-janv	3.610
2012	05-mars	07-mars	5.620
2012	26-déc	28-déc	7.040
2014	07-févr	09-févr	4.820
2015	14-janv	16-janv	4.660
2016	31-mai	02-juin	7.600

Les résultats des ajustements sont synthétisés dans le tableau ci-après:

	Ajustement	gradex (m^3/s)	xo (m^3/s)	Nb de données	Débits en m^3/s pour les temps de retour		
					10 ans	20 ans	50 ans
VC3	N°1	1,5	3,17	33	6,5	7,6	9
	N°2	1,58	3,05	27	6,6	7,8	9,2

Tableau 4 : Ajustement de Gumbel sur VC3

Les différences entre les deux échantillons ne sont pas significatives. L'échantillon n°2 sera retenu.

Cette méthode est approximative pour deux raisons :

- L'écrêtement des débits est encore sensible et un effet de seuil existe à partir de 9 m3/s,
- Le débit moyen sur 3 jours est affecté par les débits qui transitent du Grand Nocq vers la Clarence à la décrue. Ces transferts sont artificiels et variables en fonction des évènements et des déphasages entre les contributions, des brèches éventuelles qui sont survenues. L'approche statistique par des lois adaptées à des débits naturels n'est plus rigoureuse.

Cette approche estime à 20 ans la période de retour de la crue de 2016, entre 10 et 20 ans celle de 2012, entre 20 et 30 ans celle de 1999.

4.14.2.3 Simulation d'une série de pluie générée

Méthodologie

Cette méthode de détermination des débits de crue se décompose en 2 phases :

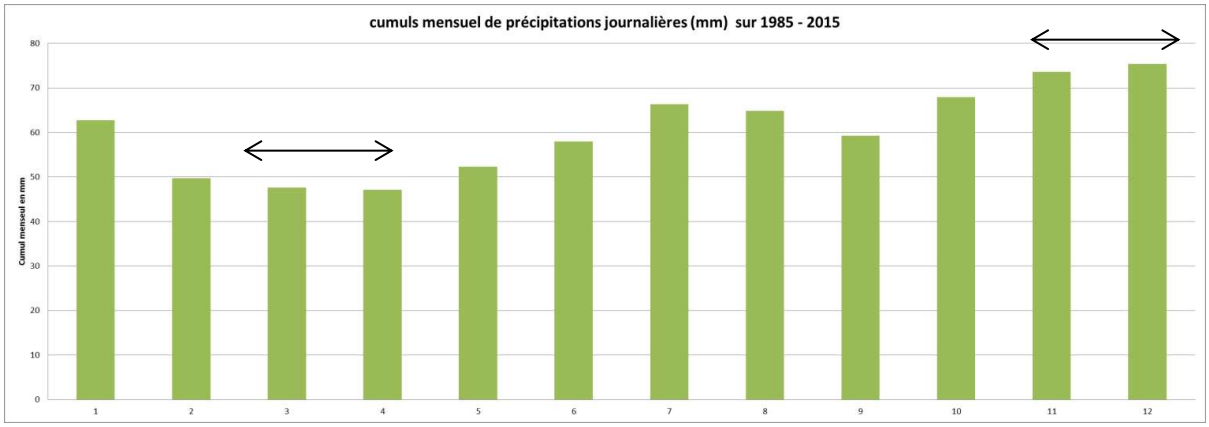
- Utilisation du générateur stochastique de pluie intégré à $GESRES_{ISL}$. pour reproduire des séries de pluies comparables à celles observées et pour les étendre.

- Analyse statistiques des débits simulés à partir des pluies générées.

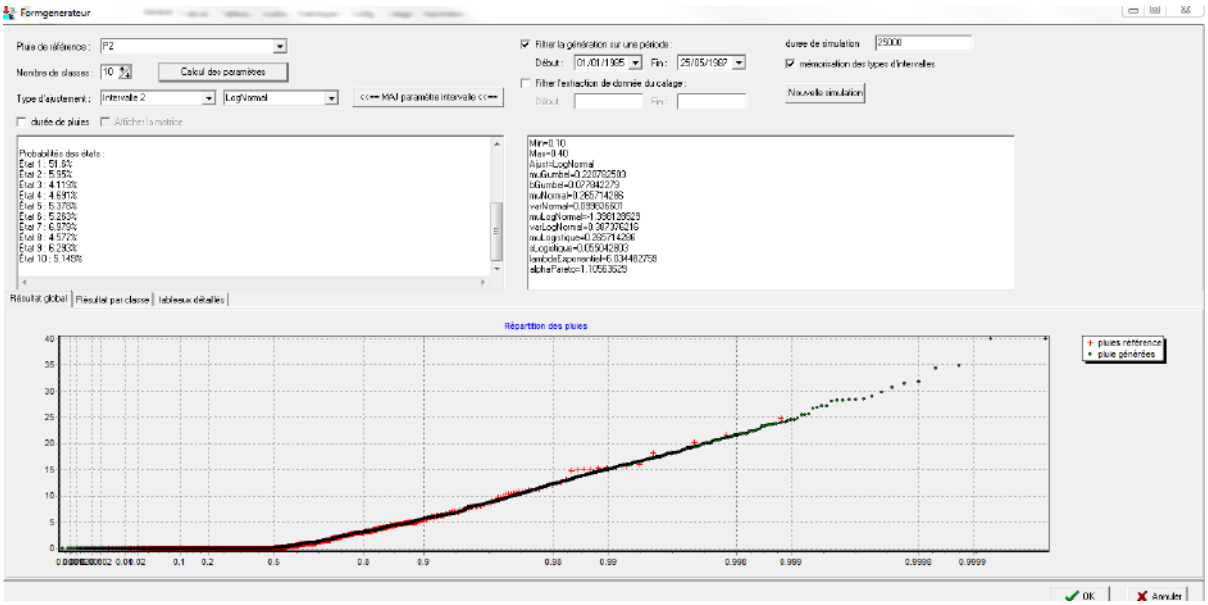
Extension de la chronique de pluie : utilisation du générateur stochastique de pluie

Le générateur stochastique de pluie intégré à $GESRES_{ISL}$ est utilisé pour reproduire des séries de pluies comparables à celles observées et pour les étendre.

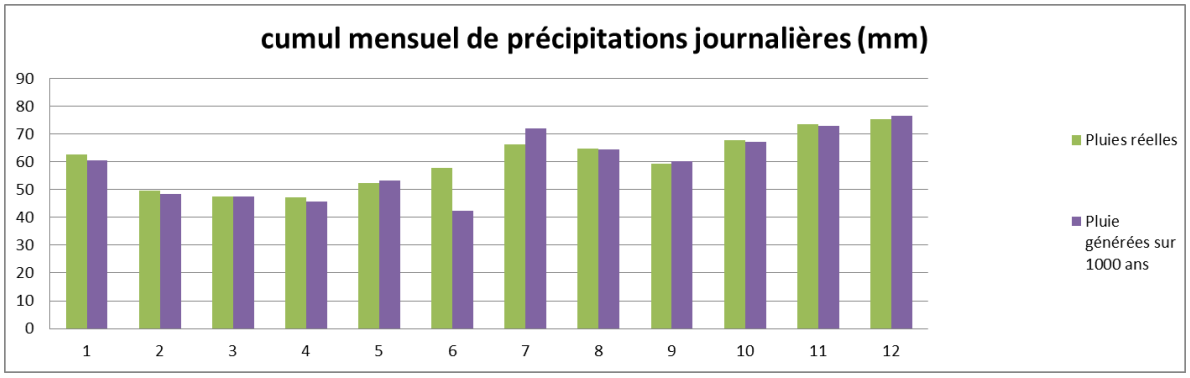
Dans un premier temps, on découpe l'année en différentes périodes en fonction des cumuls moyens mensuels de précipitations. Dans le cas présent, on retiendra 10 périodes numérotées de 1 à 10 et établies à partir des cumuls moyens mensuels de pluies brutes sur le bassin versant sur la période 1985-2015 (cf. figure ci-après). Les mois de mars/avril et novembre/décembre sont regroupés.



Le générateur de pluies est utilisé pour chacune des dix périodes de l'année. La figure ci-après donne un aperçu du générateur de pluie utilisé pour le calage sur la période 2. Les points rouges sont les pluies journalières observées, ceux en vert correspondent aux pluies générées après calage.



La pluie de bassin finale est ensuite créée par combinaison des 10 pluies générées pour les périodes 1 à 10. La figure ci-après compare les cumuls mensuels issus des pluies journalières générées et ceux issus des pluies journalières observées. Les cumuls sont cohérents. Une brève analyse montre que les pluies statistiques le sont aussi, excepté le mois de juin.



Simulation des chroniques de pluies générées

La pluie générée sur 1000 ans est utilisée comme donnée d'entrée du modèle hydrologique pour obtenir la chronique de débits journaliers correspondante à Robecq.

Les débits statistiques de crue sont ensuite obtenus par ajustement statistique des maxima annuels de débits journaliers calculés.

A Marles, les résultats sont les suivants :

T	**Débit journalier MARLES**
1000	9.9
500	9.3
100	7.7
50	7
10	5.4

Le coefficient de forme qui résulte des évènements réels est compris entre 1.8 et 2. Le débit maximal de période de retour 100 ans serait compris entre 14 et 16 m3/s.

Le débit de 2016 aurait une période de retour de l'ordre de 10 ans.

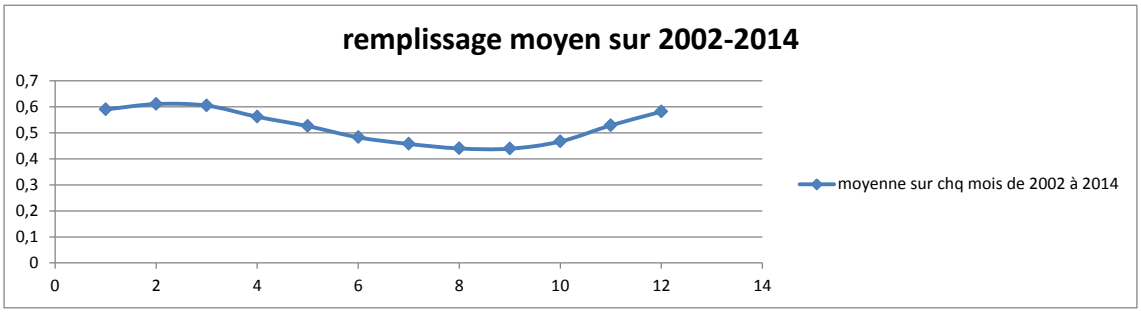
4.14.3 Approche pluie-débit

4.14.3.1 Découpage hydrologique

L'année hydrologique est découpée en deux périodes marquées par une forme de pluie et un degré de saturation des sols.

- De juin à octobre, les pluies sont plus localisées, de courte durée et intenses,
- De novembre à mai, les pluies sont plus longues, d'intensité moindre et le degré de saturation des sols est plus important.

Les conditions de saturations peuvent être illustrées par le pourcentage de remplissage du réservoir sol du modèle GR4. Le graphe ci-après présente la moyenne des remplissages selon les mois de l'année (1=janvier) :



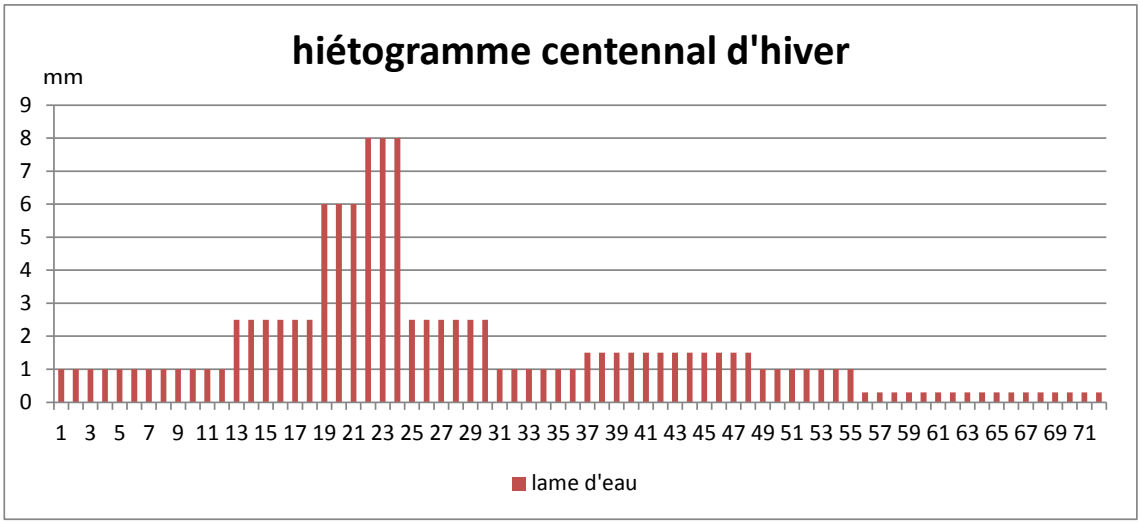
4.14.3.2 Evènements hivernaux

Construction de hiétogramme horaire

On construit un hiétogramme à partir d'un cumul centennal d'hiver et contenant des intensités sur 6 heures importantes et approchées par l'analyse des hiétogrammes réels.

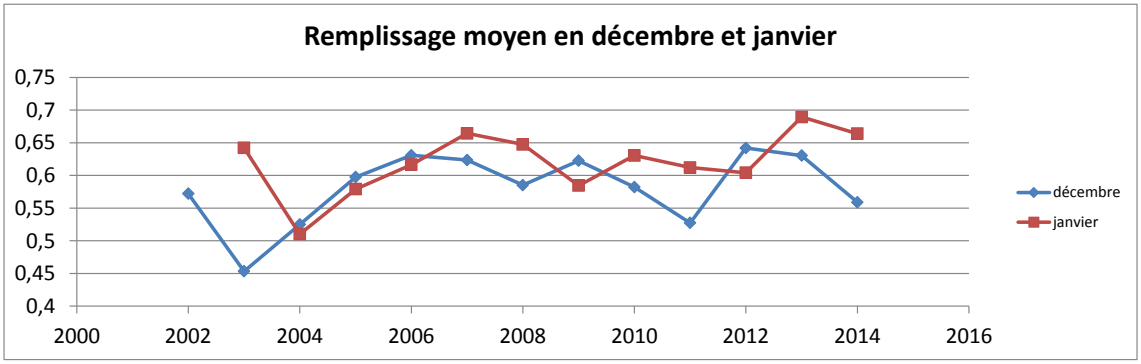
La durée de la pluie est un paramètre déterminant dans la production de débits car le volume stockable à l'aval est important : une pluie d'hiver journalière isolée ne génèrera pas de débit significatif à Robecq. Nous construisons un hiétogramme sur une durée de 3 jours de cumul égal à 120 mm (valeur de la pluie centennale sur 3 jours). A l'intérieur de ce hiétogramme, nous construisons une pluie avec des intensités maximales de 8 mm en se référant aux hiétogrammes réels. La pluie centrée sur 24 heures est prise égale à 78 mm. Elle est de l'ordre de grandeur de celle de décembre 1949, épisode pour lequel une lame d'eau de 100 mm environ est tombée en 3 jours à Lillers.

Le graphe ci-après présente le hiétogramme de projet hivernal :



Conditions initiales de saturation

Les conditions de saturations durant le mois de janvier sont illustrées par le pourcentage de remplissage du réservoir sol du modèle GR4 :



L'année 2012 et janvier 2013 connaissent les saturations les plus importantes.

Signalons la difficile prise en compte des grandes périodes de gel précédant les crues. Ces conditions sont particulièrement sensibles en milieu plutôt perméable. L'état de l'art ne permet pas de prendre en compte de manière précise ces situations.

4.14.3.3 Evènements estivaux

On construit un hiétogramme à partir d'un cumul centennal d'été issu d'un ajustement statistique.

Deux paramètres supplémentaires sont à estimer pour construire le hyetogramme :

- La répartition des pluies à l'intérieur des 6 heures,
- Le coefficient d'abattement adapté au site à analyser.

La répartition des pluies et le coefficient d'abattement sont approchés par l'analyse des évènements réels.

Le tableau ci-après présente les caractéristiques des différents orages survenus sur la période 1998-2016 :

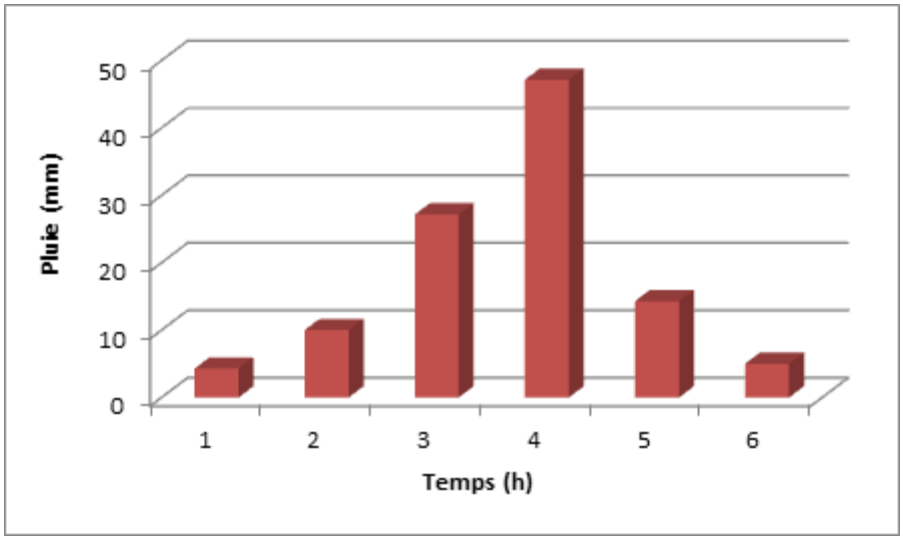
	CUMUL (mm)						MAX		SOURCE
	1 h	2 h	3h	4h	5h	6h	max 1h	max 2h	
mai-16	4,5	12,5	14,5	30,5	34,5	40,5	17	20	Lillers
juil-14	32	37	39				32	37	Lillers
20/07/2007 (1)	20	26	26				20	26	Bruay
23/07/2007 (2)	22	28	28				22	28	
juil-05	33	55	63	70		79	33	55	Lillers
août-02	6	8	12	30	44	64	20	34	Ourton
août-00	5	22					20	25	radar
juin-00	10	25					15	25	radar
juin-98	10	20					10	20	

On constate que les gros orages durent 6 heures. Celui de Juillet 2005 est particulièrement violent et a concerné plusieurs parties du bassin versant.

Nous cherchons à estimer la forme d'orages ponctuels. Il n'y a donc pas de coeficient d'abattement à appliquer.

L'ajustement des pluies d'été donne une lame d'eau de 107 mm pour Lillers. Nous faisons l'hypothèse que ce cumul correspond aux orages violents qui durent 6 heures pour la plupart. Le hyetogramme est alors défini à partir de la pluie tombée en juillet 2005 multiplié par 107/79 coefficient de passage du cumul sur 6 heures de l'orage de 2005 au cumul centennal. L'hypothèse que nous faisons et qui peut se discuter c'est de considérer que l'ajustement des pluies de 24 h d'été est pour les périodes de retour élevées équivalent à l'ajustement des pluies de 6 heures.

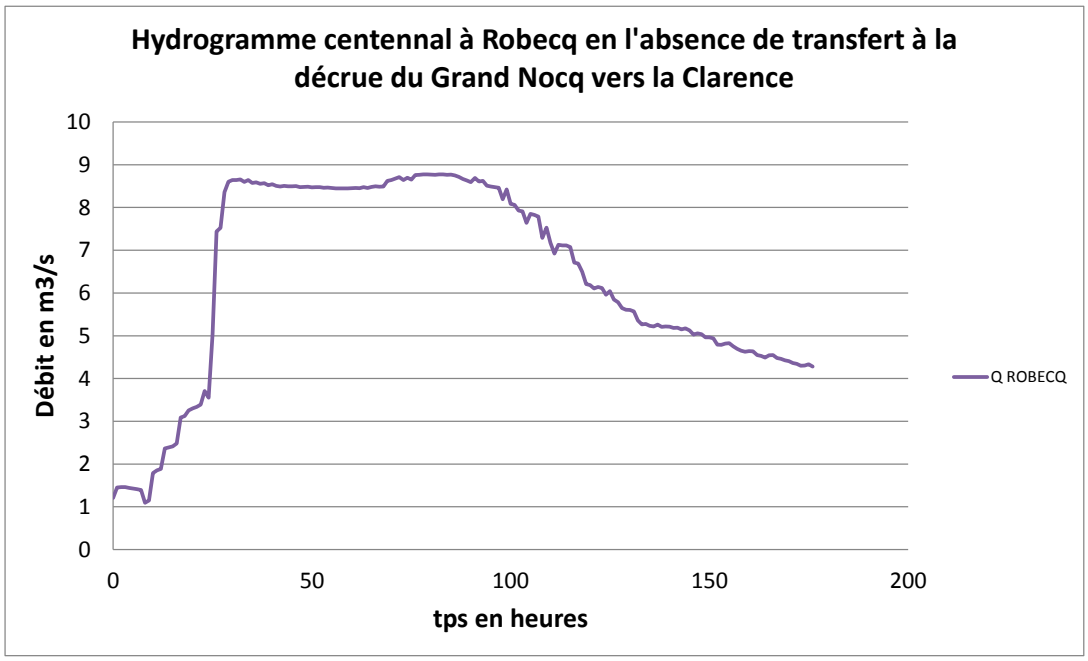
Le graphe ci-après présente le hiétogramme de projet estival :



4.14.3.4 Estimation du débit centennal à Robecq et Marles

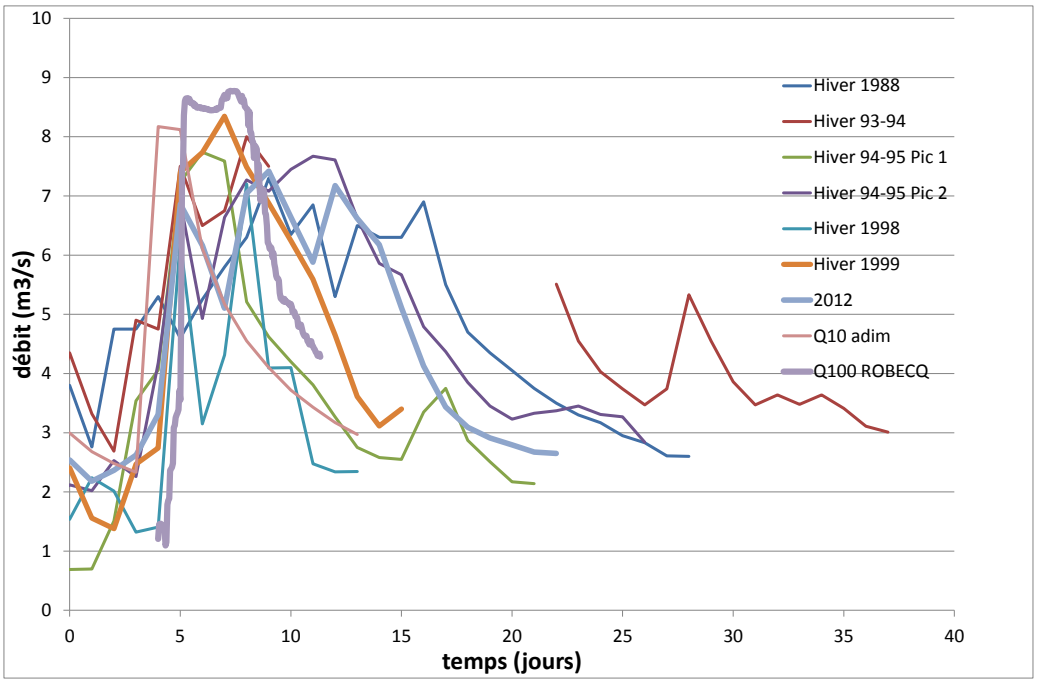
La simulation de la pluie centennale d'hiver à l'aide du modèle hydrologique et sa propagation par le modèle hydraulique fournit les hydrogrammes à Robecq et Marles ; les conditions limites à l'aval sont tirées du PPR de la Lys :

- Sur la Busnes – Confluence avec la Vieille Lys – 17.35 NGF
- Sur la Vielle Lys amont = 16.35 NGF
- Sur la Vieille Lys aval = 16.3 NGF



On constate un plat autour de 9 m3/s lié à l'écrêtement par la vaste plaine en aval de Chocques et les transferts de la nave vers la Busne. La décrue pourrait être affectée par les transferts du Grand Nocq vers la Clarence après le passage de la pointe de la Clarence. Cette contribution de l'ordre de 2 m3/s est difficile à prendre en compte de manière rigoureuse.

Le graphe ci-après présente en superposition l'hydrogramme centennal et les hydrogrammes réels significatifs depuis 1970 ; on constate une décrue plus franche liée à la non prise en compte du transfert.



A la station de Marles, le débit maximal est estimé à 15 m3/s environ.

Le passage de la pluie centennale d'été dans des conditions de saturation de juillet 2005 ne conduit pas à un débit supérieur à 15 m3/s à Marles.

4.14.4 Conclusion sur l'évènement de référence

Pour estimer les débits maxima de période de retour 100 ans à Robecq et Marles, deux approches ont été étudiées : l'approche statistique et la simulation de hiétogramme de référence.

La première approche est appliquée aux débits enregistrés à la station de Robecq. L'ajustement statistique des débits journaliers n'a pas de signification du fait du fort laminage par la plaine de Gonnehem et les transferts de la Nave vers la Busne. On peut tenter de s'intéresser aux volumes d'eau qui passent par la station en étudiant les débits moyens sur 3 jours. Le débit moyen sur 3 jours de période de retour 50 ans est d'environ 9 m3/s. A la station de Marles, seule l'approche par simulation d'une pluie générée est possible compte tenu de la taille de l'échantillon. Le débit journalier de période de retour 100 ans est estimé à 7,7 m3/s. Ces approches statistiques situeraient les évènements de décembre 2012 et 2016 sur des périodes de retour de 10 à 20 ans à Robecq. A Marles, la crue de 2016 est de période de retour 10 à 20 ans alors que décembre 2012 est de moindre importance en débit de pointe.

La seconde approche confirme les ordres de grandeur en les consolidant car la méthode est plus rigoureuse. Le passage du hiétogramme de projet confirme le laminage des hydrogrammes à Robecq à un débit voisin de 9 m3/s tandis que le débit à Marles avoisine 15 m3/s. L'hydrogramme à Robecq a une allure proche de celui de 1999 avec un débit de pointe un peu supérieur. A la décrue, le modèle ne prend pas en compte les éventuels délestages du Grand Nocq vers la Clarence qui avoisinent 2 m3/s comme c'était le cas en 1999.