PAPI – PPRI de la Canche

Partie 1. Diagnostic territorial
Volet 2. Caractérisation des aléas
LCOM 13.2
Aléa débordement déterminé par modélisation hydrologique et hydraulique

Avec le concours financier :

hydratec
setec

Immeuble Central Seine
42-52 quai de la Rapée
75582 Paris Cedex 12

Email : hydra@hydra.setec.fr

T : 01 82 51 64 02
F : 01 82 51 41 39

Directeur d'affaire : BST

Responsable d'affaire : LPU

N°affaire : 37093

Fichier : 37093_LCOM13-2_Modelisation_v3.docx

Version	Date	Etabli par	Vérifié par	Nb pages	Observations / Visa
1	20/03/2016	NMT	LPU	45	
2	03/04/2016	NMT	LPU	60	Ajout du calage par rapport aux ZIC et de la sensibilité du modèle au Strickler.
3	27/04/2017	NMT	LPU	75 (hors atlas)	Ajout des scénarios de référence (construction et simulation)

Table des matières

1 CADRE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE 9
1.1 Contexte de l'étude 9
1.2 Objectifs de l'étude 9
1.3 Déroulé de l'étude 10
1.4 Objet du présent livrable 11
2 MODELISATION HYDROLOGIQUE 12
2.1 Présentation du logiciel utilisé 12
2.2 Découpage en bassins versants élémentaires 12
2.3 Génération des pluies 13
2.3.1 Choix des postes pluviométriques 13
2.3.2 Discrétisation des pluies journalières sur la période intense 14
2.3.3 Génération des pluies sur les bassins versants élémentaires 15
2.4 Modélisation mise en œuvre 15
2.4.1 Module SCS 16
2.4.2 Module RSVL 17
2.4.3 Paramétrage 17
3 MODELISATION HYDRAULIQUE 18
3.1 Présentation du logiciel HydraRiv utilisé 18
3.2 Présentation des modélisations mises en œuvre 18
3.3 Structure du modèle 19
3.3.1 Lit mineur 19
3.3.2 Lit majeur 20
3.3.3 Singularités 22
3.3.4 Conditions aux limites 22
3.3.5 Synthèse 23
3.4 Topographie prise en compte 25
4 CALAGE DES MODELES 26
4.1 Crues de calage 26
4.2 Prise en compte des ouvrages de rétention des bassins versants 26
4.3 Données de calage 26
4.3.1 Mesures des stations 26
4.3.2 Laisses de crue 27
4.3.3 Zones Inondées Connues (ZIC) 27
4.4 Résultats du calage 29
4.4.1 Calages aux stations hydrométriques 29
4.4.2 Calage par rapport aux laisses de crue 35
4.4.3 Calage par rapport aux ZIC 35
4.5 Paramétrage retenu – enseignements du calage 39

4.5.1 Aptitude du sol à ruisseler ... 39
4.5.2 Conditions initiales des sols ... 40
4.5.3 Infiltration vers la nappe ... 40
4.5.4 Routages des hydrogrammes calculés ... 40
4.5.5 Paramètres hydrauliques de vallée – coefficients de Strickler ... 41
4.6 Conclusion ... 41
5 TESTS DE SENSIBILITE ... 42
5.1 Sensibilité au coefficient de Strickler ... 42
5.2 Réactivité à la pluie tombée ... 44
5.3 Sensibilité à la condition limite aval ... 46
6 SIMULATION DES SCENARIOS DE REFERENCE ... 47
6.1 Construction des scénarios de référence ... 47
6.1.1 Les crues des scénarios de référence ... 47
6.1.2 Configurations d'ouvrages possibles ... 48
6.1.3 Niveau marin ... 49
6.2 Simulation des scénarios de référence ... 49
6.2.1 Crues de référence avec ouvrages (scénarios S1 et S3) ... 49
6.2.2 Crues de référence sans les ouvrages (scénarios S2, S4 et S5) ... 49
6.2.3 Ruptures de digues ... 50
6.3 Génération des cartes de hauteurs de submersion et vitesses d'écoulement et des cartes d'aléas ... 51
6.3.1 Hauteurs de submersion ... 51
6.3.2 Vitesses ... 51
6.3.3 Aléas ... 51
6.3.4 Représentation cartographique ... 51

ANNEXES

Annexe 1 - Atlas du modèle hydraulique de la Canche

Annexe 2 - Analyse cartographique sur les sous bassins versants élémentaires

Annexe 3 - Cartes des zones inondées modélisées au droit des ZIC – crue de décembre 1999

Annexe 4 - Test de sensibilité au coefficient de Strickler : Limnigrammes et hydrogrammes aux stations d'Hesdin et de Brimeux et limnigramme à la station d'Attin

Annexe 5 - Courbes de tarages aux stations d'Hesdin sur la Ternoise et à Brimeux sur la Canche obtenues pour une pluie deux fois plus forte que celle de la crue de décembre 1999.

Annexe 6 - Paramétrage retenu pour le calage du modèle hydrologique

Annexe 7 - Liste des communes couvertes par la modélisation

Table des illustrations

Figure 2-1 : Schéma conceptuel d'arborescence d'un sous-réseau hydrologique 12

Figure 2-2 : Découpage en bassins versants élémentaires 13

Figure 2-3 : Postes pluviométriques sur et autour du bassin versant de la Canche 14

Figure 2-4 : Corrélation entre les postes pluviométriques horaires et journaliers 15

Figure 2-5 : Structure du module SCS 16

Figure 2-6 : Structure du module RSVL 17

Figure 3-1 : Etendue proposée pour la modélisation de vallée 19

Figure 3-2 - Exemple de profil en travers de lit mineur 19

Figure 3-3 : Modélisation du lit majeur avec des profils en travers 20

Figure 3-4 : - Modélisation du lit majeur avec des pavés 21

Figure 3-5 : Modélisation ZUI dans le centre-ville d'Hesdin 22

Figure 3-6 – Structure générale du modèle hydraulique 24

Figure 4-1 : Position des données disponibles pour le calage 28

Figure 4-2 : Courbe de tarage de la station d'Hesdin sur la Ternoise 29

Figure 4-3 : Courbe de tarage de la station de Brimeux sur la Canche 30

Figure 4-4 : Hydrogrammes et limnigrammes aux stations d'Hesdin et de Brimeux pour la crue de décembre 1999 31

Figure 4-5 : Hydrogrammes et limnigrammes aux stations d'Hesdin et de Brimeux pour la crue de février 2002 32

Figure 4-6 : Hydrogrammes et limnigrammes aux stations d'Hesdin et de Brimeux pour la crue de décembre 2012 33

Figure 4-7 : Hydrogrammes et limnigrammes à la station d'Attin pour la crue de décembre 2012 34

Figure 4-8 : Zones inondées par modélisation et selon les ZIC sur la Canche entre Brimeux et la Calotterie pour la crue de décembre 1999 36

Figure 4-9 : Zones inondées par modélisation et selon les ZIC sur la Planquette entre Fressin et Cavron-Saint-Martin pour la crue de décembre 1999 37

Figure 4-10 : Aléa remontée de nappe sur la Planquette entre Fressin et Cavron Saint-Martin 38

Figure 4-11 : Zones inondées par modélisation et selon les ZIC sur la Course à Estrée et Estréelles pour la crue de décembre 1999 39

Figure 4-12 : Stockages totaux des bassins versants élémentaires retenus pour le calage 40

Figure 5-1 : Sensibilité au Strickler : Hydrogrammes à la station d'Hesdin sur la Ternoise Crue de décembre 1999 43

Figure 5-2 : Sensibilité au Strickler : Hydrogrammes à la station de Brimeux sur la Canche Crue de décembre 1999 43

Figure 5-3 : Sensibilité au Strickler : Hydrogrammes à la station d'Attin sur la Canche Crue de décembre 1999 44

Figure 5-4 : Hydrogrammes aux stations d'Hesdin sur la Ternoise et de Brimeux sur la Canche pour la pluie de décembre 1999 et la même pluie multipliée par deux 45

Figure 6-1 : Principe de génération des crues théoriques 48

Figure 6-6 : Position des trois scénarios de brèche proposés 50

Figure 1 : Pluviométrie annuelle moyenne des bassins versants élémentaires 55

Figure 2 : Pluviométrie journalière décennale selon SHYREG des bassins versants élémentaires 56

Figure 3 : Pluviométrie journalière centennale selon SHYREG des bassins versants élémentaires 57
Figure 4 : Géologie des bassins versants élémentaires 58
Figure 5 : Pentes des bassins versants élémentaires 59
Figure 6 : Courbe de tarage de la Ternoise à Hesdin 69
Figure 7 : Courbe de tarage de la Canche à Brimeux 69
Figure 8 : Bassins versants élémentaires du modèle hydrologique 71

Tableau 3-1 : Longueurs et numéros de branches associées aux différents biefs modélisés 20
Tableau 3-2 : Levés topographiques de lit mineur existants 25
Tableau 3-3 : Levés topographiques des campagnes 1 et 2 25
Tableau 4-1 : Début et fin des périodes intense et préparatoires pour les crues de calage 26
Tableau 4-2 : Laisses de crue répertoriées pour les crues de calage 27
Tableau 4-3 : Débit maximal et volume aux stations d'Hesdin sur la Ternoise et de Brimeux sur la Canche 34
Tableau 4-4 : Cotes mesurées et calculées au droit des laisses de crue 35
Tableau 5-1 : Sensibilité au coefficient de Strickler : Ecarts de cotes et débits maximaux atteints 42
Tableau 6-1 : Période de retour des crues faibles, moyenne et extrême 47
Tableau 6-2 : Débits caractéristiques de la Canche et de ses principaux affluents 47
Tableau 6-3 : Grille de classification de l'aléa en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement des eaux de crues 51
Tableau 1 : Paramétrage retenu pour le calage du modèle hydrologique 73
Tableau 2 : Liste des communes traversées par un cours d'eau modélisé 75

1 Cadre et objectifs de l'étude

1.1 Contexte de l'étude

Le bassin versant de la Canche, d'une superficie de 1 275 km2, situé dans le Pas de Calais, regroupe 203 communes pour 104 500 habitants et 12 communautés de communes.

Des inondations ont touché tout ou partie du territoire en : 1988, 1993, 1994, 1999, 2002, et plus récemment 2012 et 2013.

Suite à la crue de décembre 1994, la DDTM62 a réalisé le PPRI de 21 communes situées en aval de la Canche exposées au risque d'inondation par débordement de la Canche. Ce « PPRI de la Canche aval » a été approuvé par le Préfet en 2003.

En parallèle, les Etablissements Publics de Coopération Intercommunale (EPCI) du bassin versant de la Canche ont réalisé des aménagements pour la protection des populations contre les crues (dans la vallée / dans les bassins versants, des ouvrages légers / des ouvrages structurants…). Cependant, la récurrence des épisodes d'inondation a fait émerger la nécessité d'une démarche coordonnée et cohérente à l'échelle du bassin versant entier, qui se concrétisa dans le « PAPI d'Intention » de la Canche, porté par le Symcéa, labellisé en 2014. Le PAPI d'intention est une première étape, qui vise à établir un premier diagnostic du territoire et permet de mobiliser les maîtres d'ouvrage en vue de la réalisation du « PAPI Complet ».

Le Programme d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) est un outil contractuel entre les collectivités locales et l'Etat, qui décline un ensemble d'actions visant à réduire l'aléa ou la vulnérabilité des personnes et des biens de manière progressive, cohérente et durable. Ces actions doivent être déclinées en 7 axes, de façon équilibrée :

- Axe 1 - L'amélioration de la connaissance et de la conscience du risque,
- Axe 2 - La surveillance, la prévision des crues et des inondations,
- Axe 3 - L'alerte et la gestion de crise,
- Axe 4 - La prise en compte du risque inondation dans l'urbanisme,
- Axe 5 - Les actions de réduction de la vulnérabilité des personnes et des biens,
- Axe 6 - Le ralentissement des écoulements,
- Axe 7 - La gestion des ouvrages de protection hydraulique.

Le PAPI est élaboré par les collectivités locales dans le cadre de l'appel à projet lancé en 2002 par le ministère de l'écologie et du développement durable, prolongé en 2011 par un nouvel appel à projets PAPI. Pour bénéficier de l'appui de l'État, notamment via le fond de prévention des risques naturels majeurs (FPRNM), le projet doit être labellisé par un comité partenarial au niveau national ou local, regroupant entre autres des représentants de l'État et des collectivités locales.

Parallèlement, et suite aux épisodes d'inondation de 2012, les services de l'Etat ont réalisé une analyse de la procédure du PPR approuvé et ont programmé l'acquisition de données topographiques fines (de type LIDAR) sur l'ensemble du bassin versant de la Canche. A l'issue de ces démarches, une procédure de révision du PPRI a été engagée.

1.2 Objectifs de l'étude

Aujourd'hui, le Symcéa et la DDTM62 associent leurs démarches.

L'étude a pour objet la réalisation conjointe DDTM62/Symcéa du PAPI complet de la Canche et d'un nouveau PPRI de la Canche sur la base d'un diagnostic approfondi et partagé.

L'étude porte sur l'ensemble des problématiques inondation pouvant affecter le territoire : les ruissellements sur les versants, les débordements de cours d'eau (Canche et affluents), les remontées de nappe, et l'influence maritime, et ce, sur l'ensemble du bassin versant de la Canche.

Les temps forts de réalisation du PAPI concernent :

- L'établissement et le partage du diagnostic,
- La rédaction et la présentation des actions envisagées dans le cadre du cahier des charges PAPI selon 7 axes,
- La labellisation.

La révision attendue du PPR comprend :

- la définition des aléas et des enjeux pour les communes concernées par la procédure administrative,
- l'élaboration des documents réglementaires du PPRI (note de présentation, cartes du zonage réglementaire, règlement, bilan de la concertation).

Les objectifs finaux de labellisation du PAPI et de mise en place des PPRI passent par la mise en place d'une concertation active pour que les deux projets soient partagés et acceptés.

1.3 Déroulé de l'étude

L'étude se déroule en 3 parties :

- Partie 1 : Le diagnostic territorial, socle commun aux parties 2 et 3,
- Partie 2 : PAPI,
- Partie 3 : PPR.

La première partie de diagnostic territorial se décompose en 4 volets :

- Volet 1 : Diagnostic initial du fonctionnement du bassin versant et connaissance des phénomènes historiques
- Volet 2 : Caractérisation des aléas
- Volet 3 : Caractérisation des enjeux exposés
- Volet 4 : Evaluation du risque inondation sur le bassin versant de la Canche

Le deuxième volet de diagnostic initial du fonctionnement du bassin versant et connaissance des phénomènes historiques comprend 4 livrables :

- **Livrable LCOM12 : Méthode de détermination des aléas**
  Ce livrable présente les méthodes retenues, sur la base de la phase de recueil de données, pour l'analyse hydrologique et pour qualifier les aléas ruissellement sur les parties amont du bassin versant et les aléas débordement pour les vallées et les secteurs aval. Pour ces derniers, le facteur aggravant des remontées de nappes sera pris en compte si nécessaire.

- **Livrable LCOM13 : Rapport sur les aléas déterminés**
  Ce livrable prend la forme d'un dossier explicitant la méthode de détermination des aléas, justifiant et commentant les scénarios choisis et leurs résultats. Il est subdivisé en cinq sous-parties :
  - LCOM13.1 : Analyse hydrologique
  - LCOM 13.2 : Aléa débordement : Modélisation hydrologique et hydraulique
  - LCOM13.3 : Analyse des débordements et des ruissellements par analyse hydrogéomorphologique
  - LCOM 13.4 : Aléa remontée de nappe
  - LCOM 13.5 : Aléa remontée de nappe

- **Livrable LCOM 14 : Les cartes des aléas première version**
  Il s'agit de la cartographie des aléas ruissellement, débordement, remontée de nappe et submersion marine.

- **Livrable LCOM15 : Études complémentaires**
  L'analyse des aléas obtenus permet de dégager les éventuelles études complémentaires à mettre en œuvre pour améliorer la qualité des résultats. Celles-ci sont hiérarchisées en fonction des besoins.

1.4 Objet du présent livrable

Le présent rapport constitue un rapport intermédiaire du livrable LCOM13.2: Modélisation hydrologique et hydraulique.

Ce document traite de la construction des modèles hydrologique et hydraulique ainsi que de leur calage visant à déterminer les zones inondables et les aléas relatifs aux phénomènes de débordement du cours d'eau..

Il commence par exposer la modélisation hydrologique mise en œuvre. Celle-ci s'appuie sur le découpage des bassins versants de la Canche et de ses affluents en sous bassins versants élémentaires et sur la génération des pluies sur ces espaces à partir de chroniques mesurées à différents postes pluviométriques.

Une seconde partie est dédiée à la construction du modèle hydraulique, avec notamment la description de sa structure et de la topographie prise en compte.

Enfin, les résultats du calage, puis des tests de sensibilité des modèles sont ensuite présentés, ainsi que les enseignements que l'on peut en tirer. Enfin, la construction des scénarios de référence et la production des cartographies associées sont exploitées.

2 Modélisation hydrologique

La modélisation hydrologique (ou encore appelée modélisation pluie-débit) vise à calculer les hydrogrammes générés par le bassin versant et qui alimentent les cours d'eau.

2.1 Présentation du logiciel utilisé

La modélisation hydrologique de la présente étude est réalisée à l'aide du logiciel de modélisation HydraBV, logiciel sous licence setec hydratec.

Pour chaque sous-bassin versant élémentaire, le logiciel calcule l'hydrogramme ruisselé à l'exutoire.

HydraBV offre la possibilité d'organiser les sous-bassins versants entre eux sous forme d'un réseau hydrologique reproduisant fidèlement les zones de production (les bassins versants) et les zones de propagation des ruissellements (thalwegs).

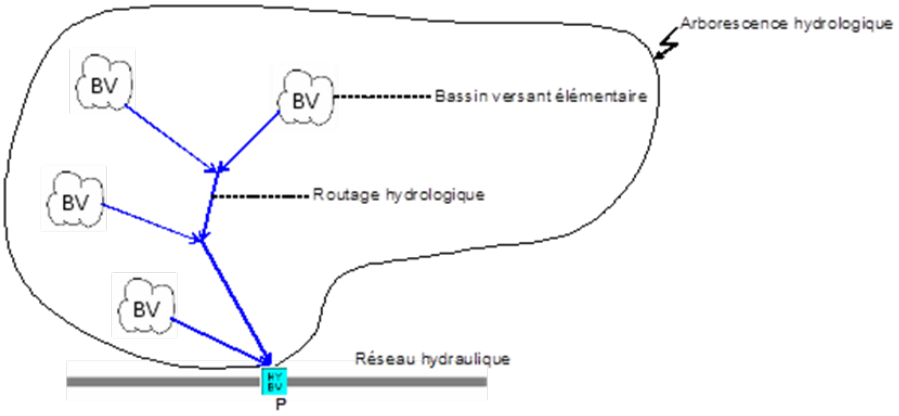


Figure 2-1 : Schéma conceptuel d'arborescence d'un sous-réseau hydrologique

2.2 Découpage en bassins versants élémentaires

Les bassins versants de la Canche et de ses affluents sont découpés en sous-bassins élémentaires. Le découpage s'appuie notamment sur les ouvrages de rétention les plus importants présents sur les bassins versants et identifiés par le Symcéa, ainsi que sur les linéaires modélisés. Le découpage vise par ailleurs à représenter l'homogénéité de la géologie, des pentes, de l'occupation des sols et de la pluviométrie annuelle moyenne de chaque sous bassin versant élémentaire (voir les cartes présentées en annexe 2). La carte qui suit présente le maillage en bassins versants élémentaires.

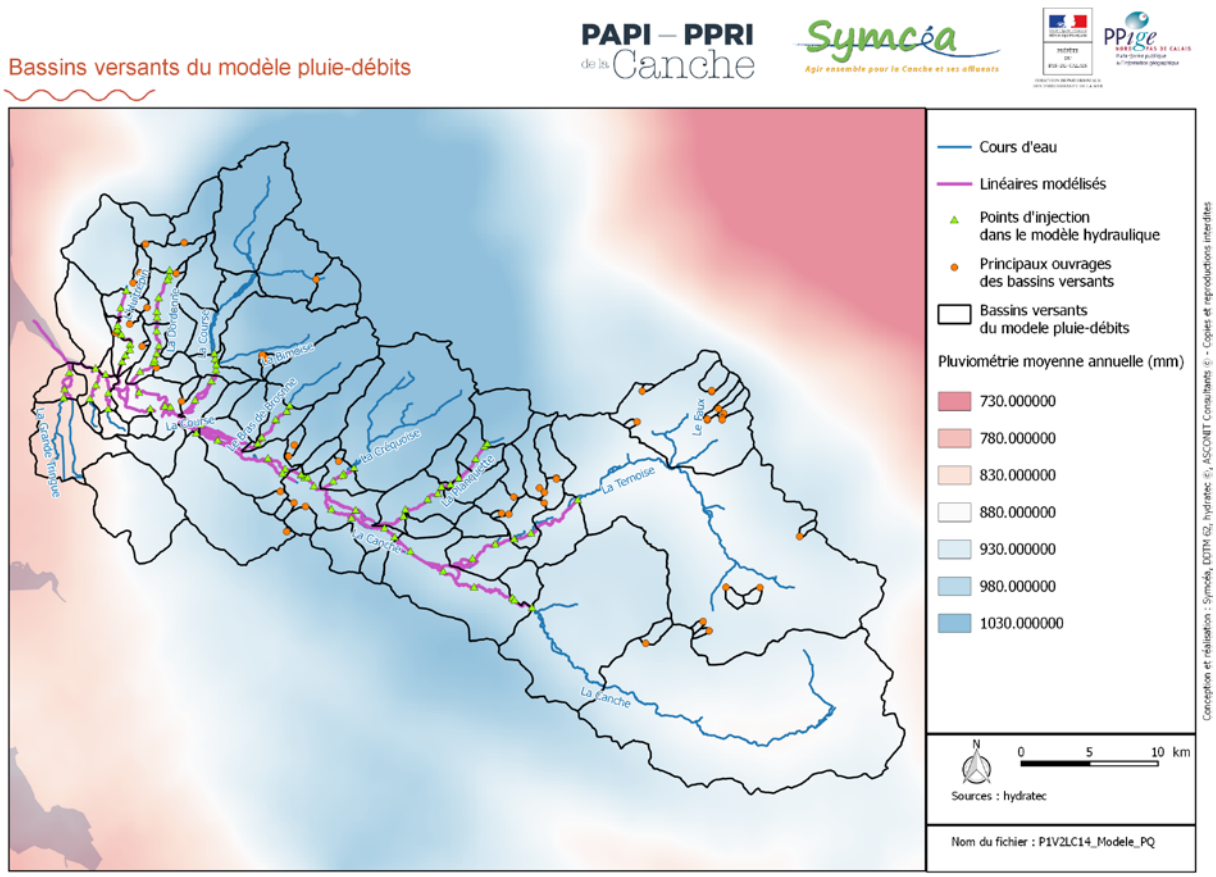


Figure 2-2 : Découpage en bassins versants élémentaires

Les bassins versants élémentaires les plus petits représentent les bassins versants des ouvrages de rétention pris en compte.

Les hydrogrammes calculées en chaque sous bassin versant élémentaire sont ensuite injectés dans le modèle hydraulique. Ceux qui ne sont pas contigus zones modélisées sont propagés jusqu'à leur point d'injection.

Pour limiter des apports ponctuels trop importants qui ne reflètent pas le comportement physique des vallées, l'hydrogramme de certains des sous bassins versants est subdivisé en plusieurs points d'apport dans le modèle hydraulique. Les hydrogrammes injectés sont déterminés au prorata de la surface de bassin versant interceptée en chaque point d'injection.

2.3 Génération des pluies

Les pluies constituent les données d'entrée du modèle hydrologique. Les pluies utilisées ici sont les hauteurs de précipitation horaires lorsqu'elles existent et journalières sinon, relevées aux postes pluviométriques de Météo France.

2.3.1 Choix des postes pluviométriques

Les postes pluviométriques présents sur le territoire d'étude et à proximité permettent de définir la pluviométrie sur l'ensemble du bassin versant de la Canche tout en offrant une bonne représentativité de la pluie moyenne annuelle. Choisir des mesures ponctuelles est adapté ici puisque les crues à caractériser sont des événements hivernaux résultants de pluies homogènes et non d'orages locaux.

La carte ci-après indique les postes pluviométriques à disposition et les années pendant lesquelles des mesures sont disponibles.

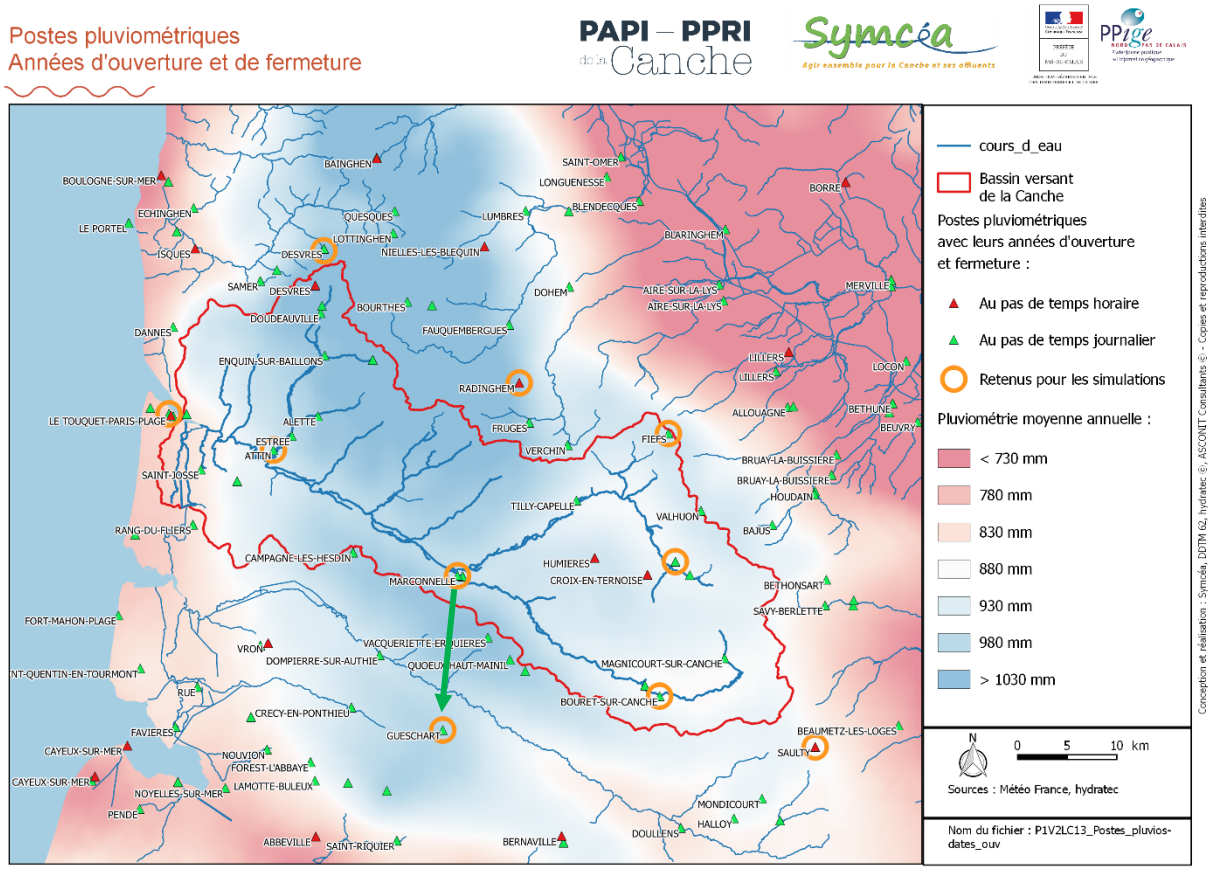


Figure 2-3 : Postes pluviométriques sur et autour du bassin versant de la Canche

Les postes retenus sont choisis de façon à :

- Assurer une répartition spatiale des postes pluviométriques permettant de couvrir l'ensemble du bassin versant de la Canche,
- Etre représentatif des variations de pluie moyenne annuelle du bassin versant,
- Etre ouverts pendant l'année hydrologique des épisodes de crue à simuler (en 1999-2000, 2001-2002 et 2012-2013).

Selon ces critères, neuf postes pluviométriques sont sélectionnés pour fournir les données d'entrée du modèle hydrologique (entourés en orange sur la carte précédente).

Le poste de Marconnelle a été fermé en 2011, par conséquent, il est remplacé par celui de Gueschart pour représenter la pluviométrie de la crue de décembre 2012.

2.3.2 Discrétisation des pluies journalières sur la période intense

Pour les postes pluviométriques ne disposant que de données journalières sur la période intense de la crue, une chronique horaire est reconstituée à partir de celle d'un poste horaire voisin. La discrétisation consiste à conserver pour chaque pas de temps horaire la proportion entre la lame d'eau tombée chaque heure et le cumul journalier du poste.

Il est admis que les perturbations se propagent d'Ouest en Est sur le bassin versant de la Canche. Les postes pluviométriques les plus proches de la Manche reçoivent en premier les épisodes pluvieux. A chaque poste qui dispose de données horaires est associé un secteur orienté Nord-Sud au sein duquel les pluies surviennent au même moment. La corrélation est ainsi effectuée entre les postes situés au sein d'un même secteur.

La carte ci-après présente les corrélations effectuées entre les postes ainsi que les trois secteurs Nord-Sud définis précédemment :

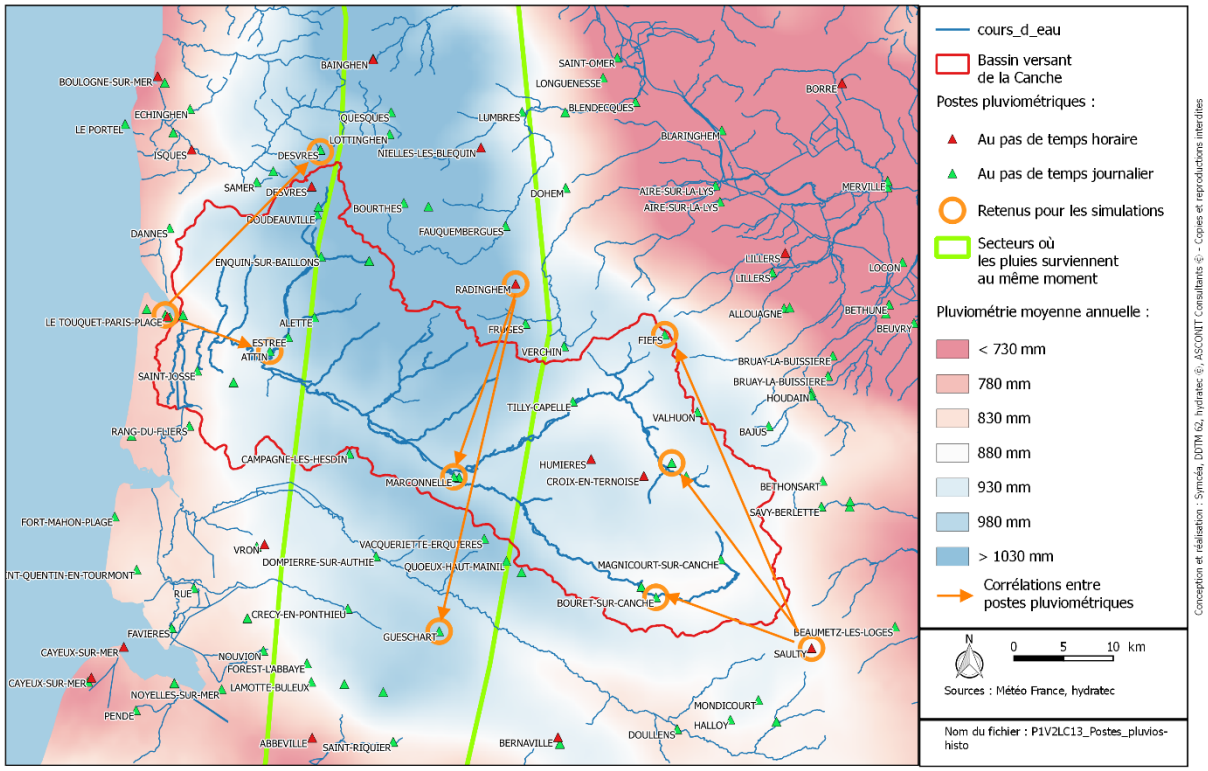


Figure 2-4 : Corrélation entre les postes pluviométriques horaires et journaliers

2.3.3 Génération des pluies sur les bassins versants élémentaires

A partir des chroniques horaires aux dix postes pluviométriques présentés ci-dessus, les pluies sont générées sur les bassins versants élémentaires. Pour chacun d'eux, le calcul de la pluie se fait à partir de la chronique du poste le plus proche pondérée par la pluviométrie moyenne annuelle.

2.4 Modélisation mise en œuvre

Le modèle pluie-débit permet la conversion de la pluie brute tombée sur chaque bassin versant élémentaire en hydrogrammes à injecter dans le modèle hydraulique. Afin de reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin versant de la Canche, il est choisi d'utiliser deux modules :

- Module SCS pour le calcul du débit de ruissellement,
- Module RSVL pour le calcul du débit d'échange avec la nappe superficielle.

Le module SCS permet de reproduire les pics de débits générés même par des pluies de faible intensité qui sont par exemple visibles sur la Ternoise grâce aux mesures de la station d'Hesdin. Par ailleurs, les hydrogrammes mesurés aux stations d'Hesdin sur la Ternoise et de Brimeux sur la Canche montrent une variation interannuelle de 15 à 30% du débit de base sur les trois premiers mois d'une année hydrologique (septembre à novembre). Ce phénomène atteste de la présence et du rôle de la nappe alluviale dans la réponse hydrologique du bassin versant de la Canche, d'où le recours au module RSVL qui apporte le débit de base issu des échanges avec la nappe.

Ces deux modules sont décrits ci-après.

L'hydrogramme résultant sur chaque bassin versant élémentaire est la somme des hydrogrammes donnés par ces deux modules. Un routage permet ensuite de le propager jusqu'à son point d'injection dans le modèle hydraulique.

2.4.1 Module SCS

Ce module s'applique plutôt à des bassins versants majoritairement ruraux peu perméables et est présenté sur la Figure 2-5. Dans ce modèle, le sol est décomposé en deux couches superposées :

- la Réserve Facilement Utilisable (RFU),
- la couche de sol intermédiaire (J).

La RFU est la couche de sol directement alimentée par la pluie brute et qui se vidange par évapotranspiration. En cas de saturation, l'excédent rejoint la couche de sol intermédiaire.

La couche de sol intermédiaire, alimentée par l'excédent de la couche RFU, se vidange par ressuyage et par ruissellement. De plus, cette couche peut aussi se vider par pertes vers les couches profondes (absentes ici).

L'hypothèse fondamentale de ce module consiste à supposer que la couche de sol intermédiaire se comporte comme une éponge dont le taux d'absorption varie en sens inverse du niveau d'imbibition : la partie non absorbée ruisselle. Par ailleurs, le sol se ressuie lentement, le débit de ressuyage étant supposé proportionnel à la hauteur de la lame d'eau accumulée dans le sol.

Ce modèle est défini par 5 paramètres :

- RFU : Hauteur de la Réserve Facilement Utilisable exprimée en mm.
- J_0 : La hauteur d'interception potentielle du sol en mm.
- K : Le temps de réponse du bassin au ruissellement rapide, en jours.
- Tr : Le temps de réponse du bassin au ressuyage, en jours.
- f_0 : Perte par infiltration vers les couches profondes en mm/j.

La transformation en hydrogramme de la lame d'eau totale écoulée est ensuite réalisée par la méthode de l'hydrogramme unitaire (fonction de transfert de la méthode Socose). Cette méthode est toutefois améliorée par une nouvelle formulation proposée par le Cemagref, introduisant un paramètre supplémentaire « β » (à caler), qui permet de mieux prendre en compte la forme de l'hydrogramme à la décrue.

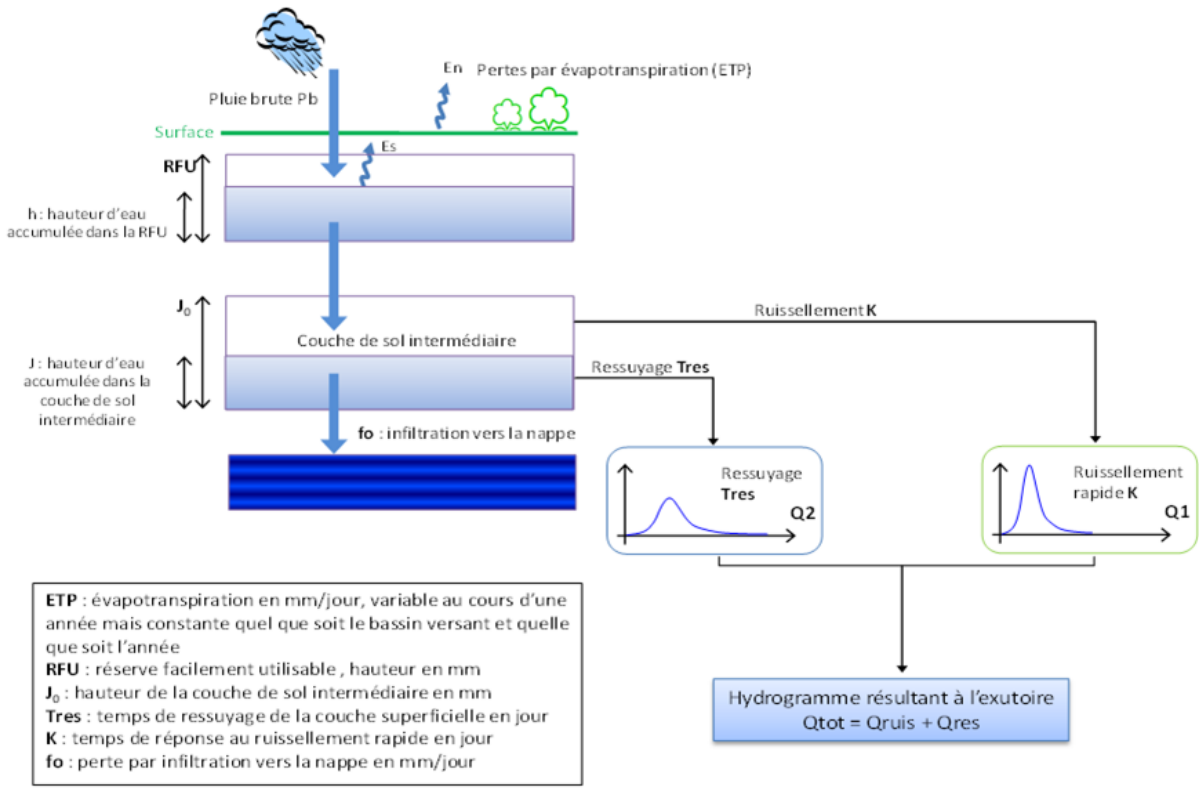


Figure 2-5 : Structure du module SCS

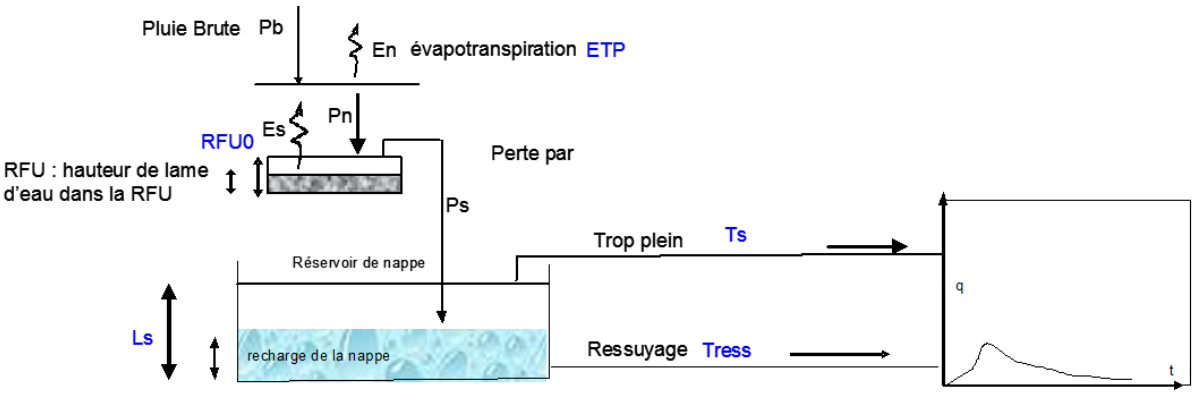
2.4.2 Module RSVL

Le module RSVL est un module dit « de nappe » (ou réservoir linéaire). Il représente le comportement de la nappe perchée temporaire qui se forme dans les couches superficielles du sol. Ce modèle tient compte explicitement du phénomène d'infiltration et de saturation du sol (voir la figure ci-après).

Le réservoir de nappe, alimenté par l'excédent de la couche RFU, se vidange ici **uniquement par ressuyage**.

Le débit vers la rivière est fonction de la recharge de la nappe.

Les paramètres de calage intervenant dans le calcul sont la capacité d'interception du sol (RFU et J), le temps de ressuyage du sol et le temps de réponse en cas de trop plein.



Les paramètres de calage du modèle sont :

ETP : Evapotranspiration exprimée en mm/j. Considérée comme variable au cours d'une année mais constante quelle que soit le bassin versant et quelle que soit l'année considérée.

RFU0 : Hauteur de la RFU

Tress : Temps de ressuyage - réponse de la nappe en jour

Ls : Capacité du réservoir souterrain

Ts : Temps de réponse en cas de trop plein

Figure 2-6 : Structure du module RSVL

2.4.3 Paramétrage

La superficie du bassin versant est divisée en deux. Dans un premier temps, il est fixé que 15% de la surface totale génère le ruissellement, tandis que les 85% restants alimentent la nappe alluviale.

a) *Module SCS*

Le calcul du Curve Number (CN), tel que proposé par le Soil Conservation Service, est effectué sur chaque bassin versant élémentaire. Celui-ci tient compte de la pédologie et de l'occupation des sols. Il permet de caractériser la capacité d'un bassin versant à ruisseler. Plus le Curve Number est élevé, plus le sol ruisselle.

A partir du Curve Number est déduit le stockage potentiel du sol ou la hauteur de la couche de sol intermédiaire Jo du module SCS. Le stockage total du sol J_{tot} est défini comme la somme de la hauteur de la couche de sol intermédiaire Jo et de la réserve facilement utilisable RFU.

Le temps de réponse au ruissellement K du module SCS est définit comme 80% du temps de concentration. Ce dernier est estimé à partir des formules usuelles (Passini, Ventura, Giandotti, Kiprich, Johnstone & Cross et Bransby), de la même façon que pour l'estimation des débits caractéristiques des bassins versants de la Canche et de ses affluents. En fonction des caractéristiques de chaque bassin versant (superficie, pente moyenne, longueur,…), le temps de réponse au ruissellement varie de 1,5 à 10 heures selon les sous-bassins versants.

Les autres paramètres des modules SCS et RSVL sont fixés par défaut et seront ajustés lors du calage des modèles hydrologique et hydraulique.

3 Modélisation hydraulique

La modélisation hydraulique de la Canche et de ses affluents est effectuée avec le logiciel HydraRiv. Les linéaires modélisés ainsi que le type de représentation retenu sont ajustés à partir des données collectées lors de la phase de diagnostic initial.

3.1 Présentation du logiciel HydraRiv utilisé

HYDRARIV est un progiciel de modélisation hydrologique et hydraulique des espaces fluviaux. Il est conçu pour intégrer dans un même modèle des schémas de représentation contrastés, tels que la schématisation filaire, les casiers et les maillages bi dimensionnels. Cette souplesse permet d'adapter au mieux la modélisation à la spécificité des configurations rencontrées dans le domaine fluvial et aux objectifs de modélisation poursuivis.

HYDRARIV est une application totalement autonome, gérant à la fois la génération et l'édition des modèles via une interface graphique dédiée, le pilotage des calculs et l'exploitation des résultats.

Le noyau de calcul est constitué par le logiciel HYDRA, développé et exploité par Hydratec depuis plus de 30 ans.

Toutes les informations sur le logiciel HYDRARIV sont accessibles sur le site internet : http://www.hydratec-software.com/.

3.2 Présentation des modélisations mises en œuvre

Deux types de modélisation hydraulique sont mis en œuvre :

- une modélisation hydraulique détaillée, là où les enjeux soumis aux risques de débordement sont les plus nombreux : sur la Canche moyenne et aval, la Planquette, l'aval de la Course, la Dordonne et l'Huitrepin (d'après les informations recueillies au cours du volet 1 de l'étude) ;
- une modélisation hydraulique dite « de propagation » :
    - là où les enjeux touchés par les débordements sont peu nombreux : l'aval de la Créquoise, l'aval du Bras de Brosne et les Tringues ;
    - sur les parties aval de la Ternoise et de la Canche amont, par anticipation sur d'éventuels besoins ultérieurs (modélisation d'aménagements par exemple) et pour une meilleure compréhension hydraulique du secteur de la confluence (dont horloge des crues).

La différence entre ces deux méthodes de modélisation réside dans le fait que les ouvrages jalonnant les cours d'eau (ponts, seuils…) sont intégrés à la modélisation détaillée, mais pas à la modélisation hydraulique de propagation. Par conséquent, la modélisation hydraulique détaillée permet de distinguer les hauteurs d'eau en amont et en aval des ouvrages. Dans le cas d'une modélisation de propagation, c'est une ligne d'eau moyenne qui est calculée (pas de perte de charge locale).

L'étendue de ces deux types de modélisation est présentée sur la figure ci-après.

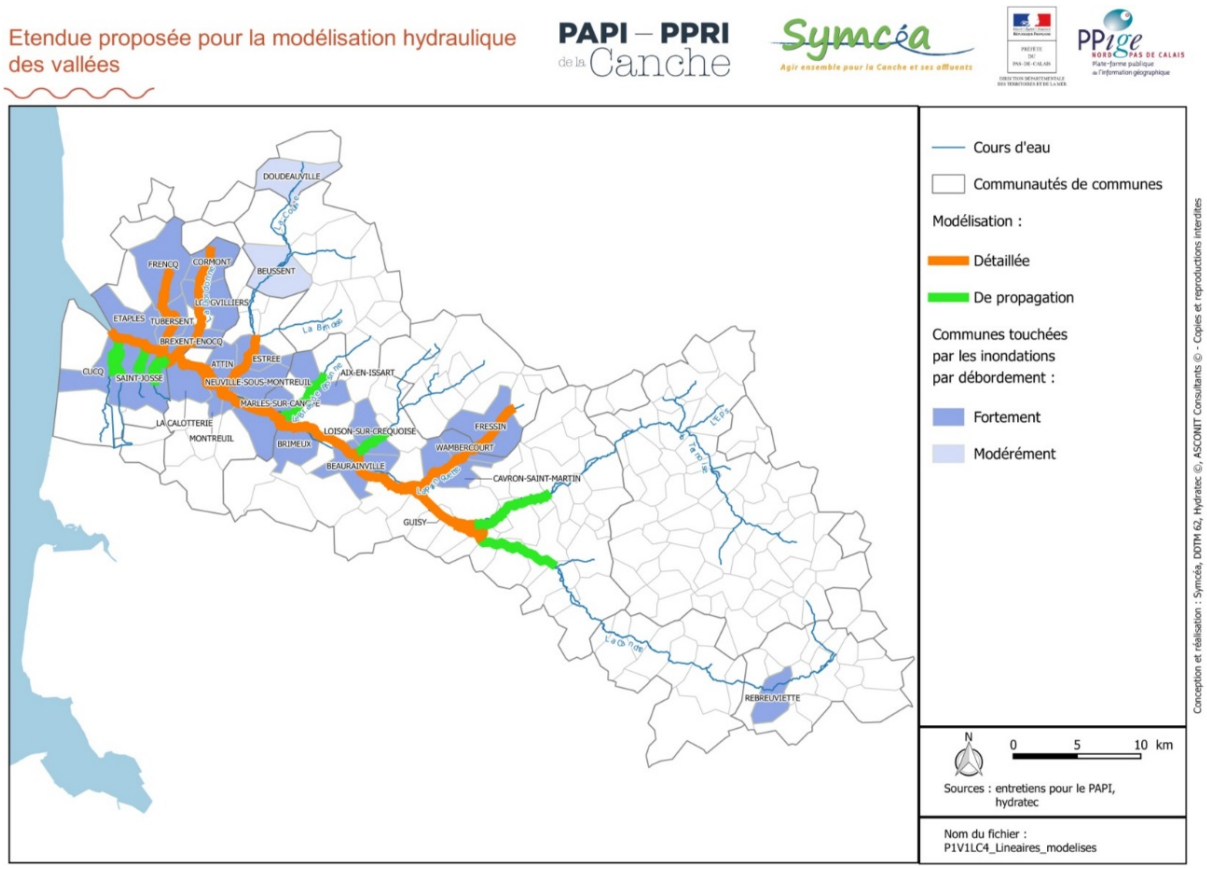


Figure 3-1 : Etendue proposée pour la modélisation de vallée

Par ailleurs, le modèle s'étend en aval de la zone d'étude, le long de la digue de l'aéroport afin de modéliser les débordements par-dessus cette digue ou d'éventuelles ruptures de cet ouvrage.

3.3 Structure du modèle

3.3.1 Lit mineur

Les lits mineurs des cours d'eau présentés ci-dessous sont représentés par des biefs filaires, définis par des profils en travers.

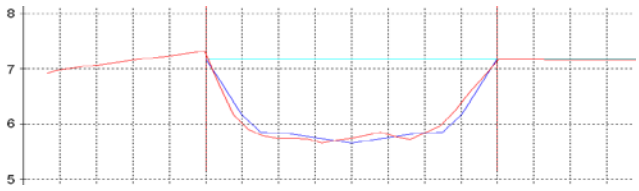


Figure 3-2 - Exemple de profil en travers de lit mineur

L'ensemble de ces linéaires est structuré en 40 branches filaires reprises dans le tableau ci-après :

Cours d'eau	Linéaire modélisé (km)	Numéros de branches associées
Canche	55,6	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
Grande Tringue	3,6	975
Tringue de Molinel	3,2	971
Tringue des Epinettes	2,3	972
Ternoise	16,0	20
Planquette	12,3	30, 31
Créquoise	3,8	40
Bras de Brosnne	5,7	50
Course	7,9	60
Dordonne	10,2	70, 71
Huitrepin	8,0	80
Bras parallèles :		
- A la Canche	34,1	910, 920, 930, 931, 940, 950, 951, 952, 954, 956, 960, 961, 962, 964, 966
- A la Ternoise	3,4	21, 22
- A la Course	3,7	62, 64
- A la Grande Tringue	2	973, 975
TOTAL	**172**	

Tableau 3-1 : Longueurs et numéros de branches associées aux différents biefs modélisés

3.3.2 Lit majeur

Le lit majeur est quant à lui schématisé par :

- Une modélisation mono-dimensionnelle lorsque le lit majeur ne présente pas de dépression topographique. Dans ce cas, l'écoulement est caractérisé par une direction privilégiée, suivant son axe longitudinal. Le lit majeur est représenté avec des profils en travers.

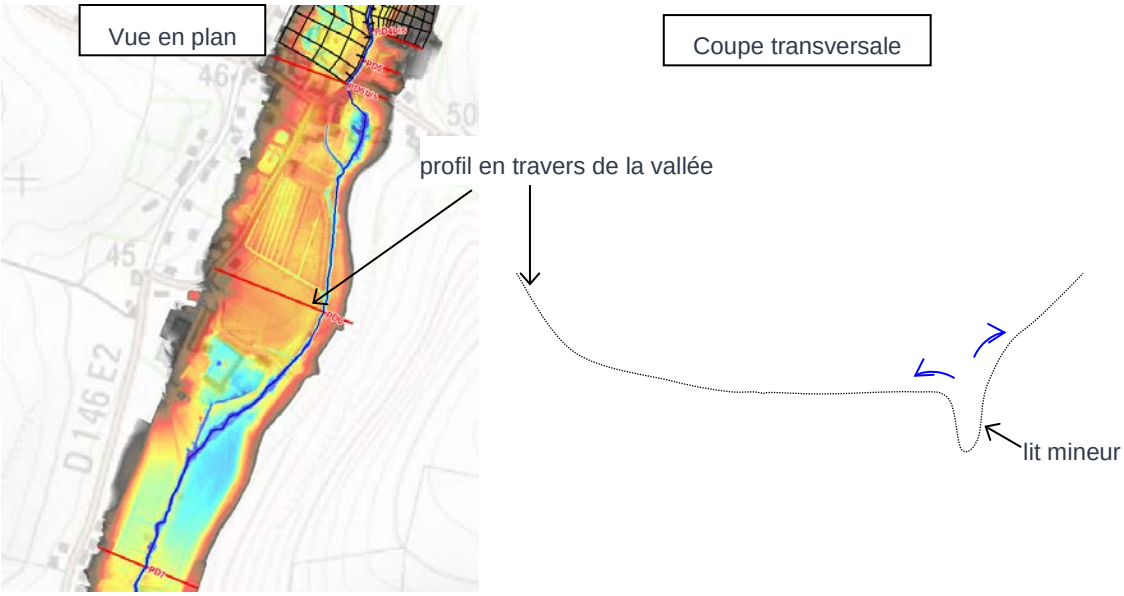


Figure 3-3 : Modélisation du lit majeur avec des profils en travers

- Une modélisation 2D pour les zones de dépression topographique dans les zones d'écoulement fortement bi-dimensionnel. Ces zones sont décrites par une topographie détaillée qui permet de

restituer notamment la carte des vitesses locales. Les pavés sont définis par une cote moyenne de fond et une surface. La taille des mailles est ajustée pour que l'écart de cote du terrain naturel entre deux pavés n'excède pas 20 cm.

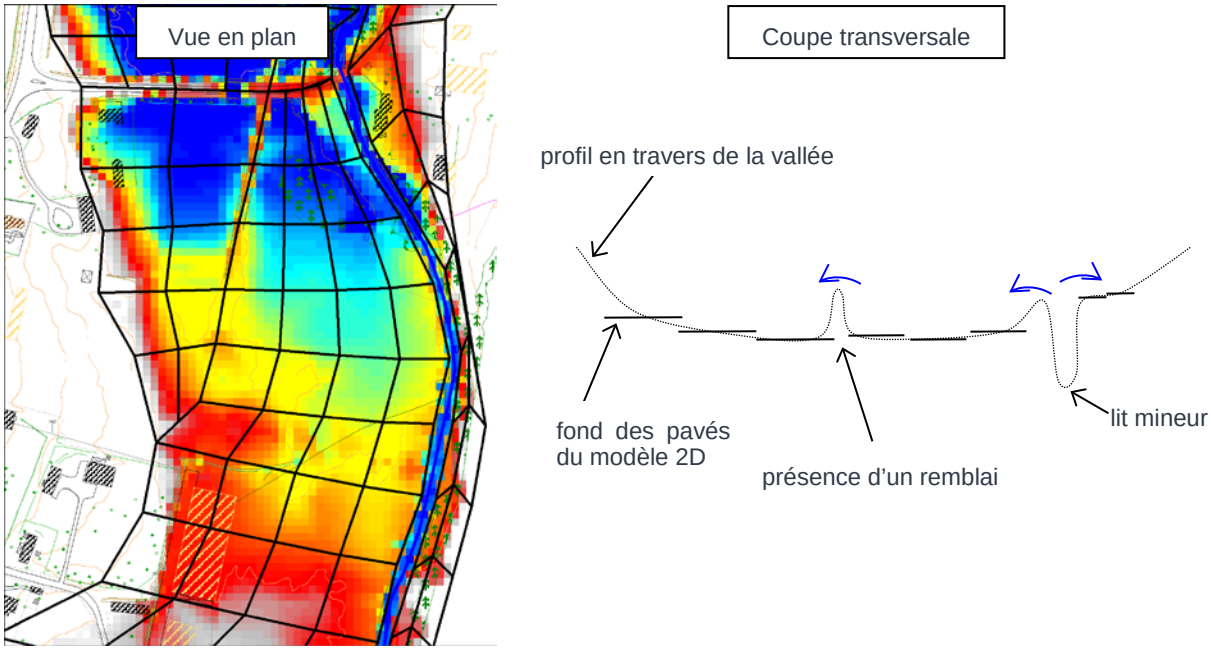


Figure 3-4 : - Modélisation du lit majeur avec des pavés

- Une modélisation en casiers dans les zones d'accumulation dans le lit majeur où la vitesse moyenne est faible. Leurs contours s'appuient sur la topographie naturelle ou sur des obstacles artificiels à l'écoulement des eaux (remblais, digues).

- Afin d'appréhender au mieux la dynamique des écoulements dans les zones urbaines denses, une modélisation 2D dédiée est mise en place (modélisation ZUI dans HydraRiv). Il s'agit d'un concept développé pour représenter certains milieux urbains dont les rues forment des axes d'écoulement privilégiés, bordés d'îlots. Ces derniers schématisent les blocs d'immeubles ou de maisons comme des obstacles dont le remplissage dépend de leur ouverture sur la rue. Ce type de modélisation est adopté pour simuler l'écoulement des crues dans Hesdin. La figure ci-dessous illustre la structure du modèle dans la ville.

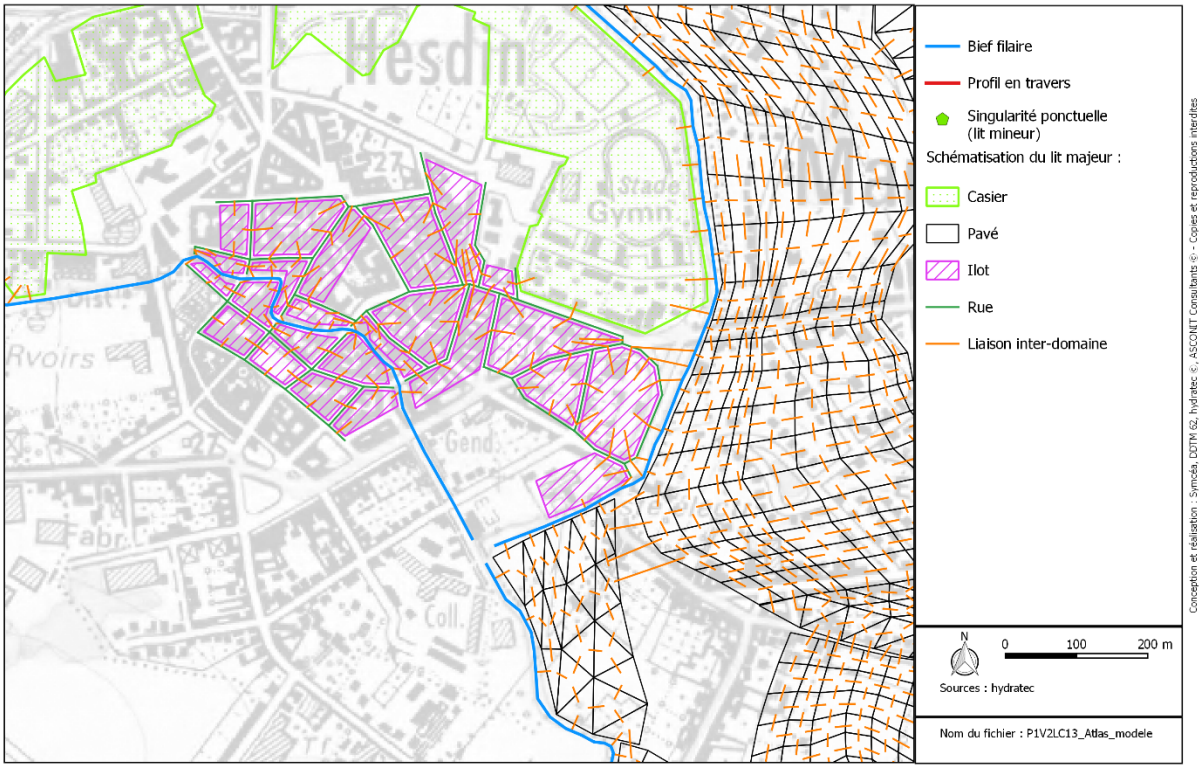


Figure 3-5 : Modélisation ZUI dans le centre-ville d'Hesdin

Tous les domaines utilisés (filaires, casiers, pavés 2D, zones urbaines) sont reliés entre eux par des liaisons dont les différents types traduisent les différentes natures de connexions existantes (frottement sur le sol, buses, déversoir…etc.).

3.3.3 Singularités

Toutes les singularités hydrauliques connues présentes dans les vallées (ponts, seuils, vannages…etc.) sont intégrées à la modélisation « détaillée » sous forme d'une perte de charge appropriée. Il peut notamment s'agir de :

- un point d'apport hydrologique,
- un pont créant une perte de charge,
- un seuil frontal,
- un vannage,
- un ouvrage de dérivation,
- un pompage…etc.

En particulier les ouvrages de décharge sous les infrastructures de transport en remblai sont schématisées.

3.3.4 Conditions aux limites

a) *Limite amont*

En amont de chaque bief, sont injectés les hydrogrammes générés par les ruissellements en tête des bassins versants (issus du modèle pluie-débits).

b) *Limite aval*

La condition limite aval est un marégramme au Touquet. Celui-ci est repris, pour les crues de décembre 1999 et décembre 2012 des simulations effectuées par le SHOM. Pour la crue de février 2002, pour laquelle il n'a pas été simulé, il s'agit d'une extrapolation du marégramme mesuré à Boulogne-sur-Mer.

3.3.5 Synthèse

Le modèle hydraulique présente la structure suivante :

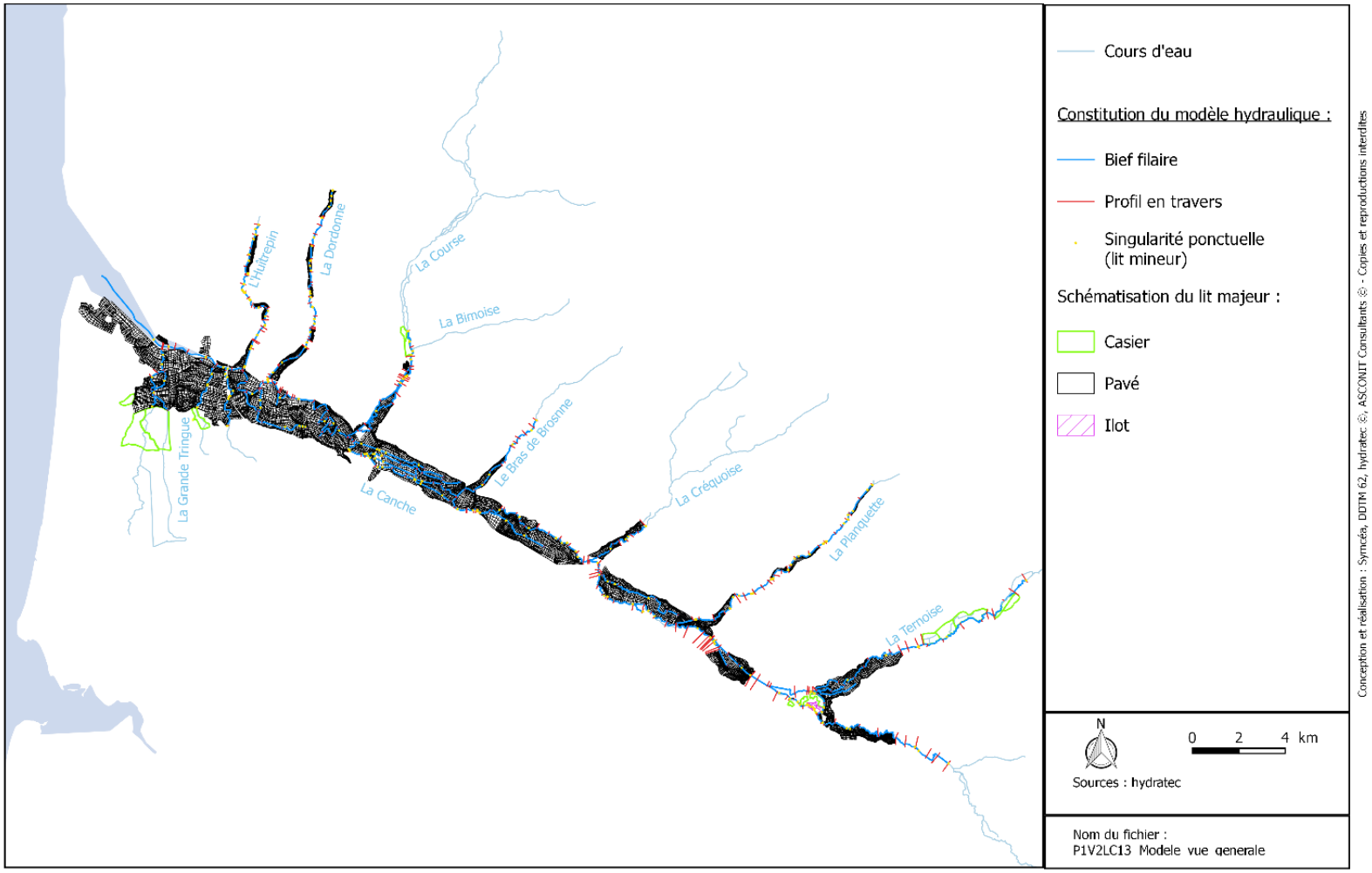


Figure 3-6 – Structure générale du modèle hydraulique

Il compte 172 km de biefs filaires dont la topographie est prise en compte grâce à 363 profils en travers. Sur ces biefs sont disposées près de 230 singularités.

Plus de 21 000 pavés et 14 casiers permettent de mailler 55 km² de vallées.

L'atlas présenté en annexe 1 permet de visualiser l'ensemble des éléments du modèle hydraulique.

3.4 Topographie prise en compte

Les données topographiques ayant servi à schématiser le lit mineur et la vallée sont issues :

- Des levés de profils en travers (PT) et d'ouvrages effectués pour les études antérieures :

Cours d'eau	Etendue	Date	MO	Détail
Canche	aval Brimeux / Estuaire	2015	DREAL	54 PT, 24 ponts, 1 moulin
Dordonne	centre Cormont / confluence	2013	CCMTO	23 PT, 18 ponts, 1 seuil
Huitrepin	aval Frencq / confluence			18 PT, 29 ponts, 1 barrage

Tableau 3-2 : Levés topographiques de lit mineur existants

- Des profils et ouvrages levés pour la présente étude lors des deux campagnes en avril et en octobre 2016.

Cours d'eau	Etendue	Date	MO	Détail
Canche	aval Wail / confluence Ternoise + affluents rive gauche aval Brimeux	2016	DDTM62	20 + 29 PT 17 ponts 3 seuils 40 ouvrages de décharge en basse vallée
Course	Aval Recques-sur-Course / confluence Canche			23 PT, 2 ponts, 7 seuils
Bras de Brosnne	Aval Sempy / confluence Canche			11 PT
Créquoise	Amont Loison-sur-Créquoise / confluence Canche			7 PT
Planquette	amont Fressin / confluence Canche			21 PT, 13 ponts, 6 seuils
Ternoise	Auchy-lès-Hesdin / confluence Canche			19 PT

Tableau 3-3 : Levés topographiques des campagnes 1 et 2

Les données topographiques à disposition pour la construction du modèle sont donc actuelles et permettent de transcrire correctement les caractéristiques topographiques de la vallée et des ouvrages hydrauliques (seuils) et de franchissement (ponts).

Le lit majeur est quant à lui schématisé à partir des données topographiques LIDAR fournies par la DDTM62. Le levé, réalisé en 2015, est maillé au pas d'un point tous les 43 cm.

4 Calage des modèles

4.1 Crues de calage

Sur la base de l'analyse typologique des crues historiques, présentée dans le livrable LCOM13 : Analyse hydrologique des crues historiques du volet 2, les crues de calage retenues sont les suivantes :

- décembre 1999,
- février 2002,
- décembre 2012.

Le tableau qui suit indique les dates de début et de fin des périodes préparatoires et intenses pour chacun de ces trois événements.

	Période préparatoire		**Période intense**	
	Début	Fin	Début	Fin
Décembre 1999	1er septembre 1999 à 7h	21 décembre 1999 à 7h	21 décembre 1999 à 7h	3 janvier 2001 à 7h
Février 2002	1er septembre 2001 à 7h	21 février 2002 à 7h	21 février 2002 à 7h	5 mars 2002 à 7h
Décembre 2012	1er septembre 2012 à 7h	19 décembre 2012 à 7h	19 décembre 2012 à 7h	9 janvier 2013 à 7h

Tableau 4-1 : Début et fin des périodes intense et préparatoires pour les crues de calage

Pour chacune des crues, la période préparatoire est simulée sur le modèle pluie-débits avec un pas de temps de calcul journalier. La période intense est quant à elle simulée sur le modèle pluie-débits au pas de temps horaire et sur le modèle hydraulique avec un pas de temps variable, de l'ordre de la minute.

4.2 Prise en compte des ouvrages de rétention des bassins versants

Les dates de création des ouvrages de rétention des bassins versants sont inconnues. D'après le Symcéa, ces bassins ont pour la majorité été construits récemment. Ainsi, ils ne sont pas pris en compte dans les simulations effectuées pour caler les modèles hydrologique et hydraulique.

4.3 Données de calage

Trois types de données sont disponibles pour le calage des modèles. Il s'agit des hydrogrammes et limnigrammes mesurés aux stations hydrométriques, de laisses de crue ponctuelles et de Zones Inondées Connues (ZIC).

4.3.1 Mesures des stations

Seules trois stations ont des données disponibles pour les crues de calage (voir leur localisation sur la carte ci-après).

Les stations DREAL d'Hesdin sur la Ternoise (ouverte en 1969) et de Brimeux sur la Canche (ouverte en janvier 1982) disposent de mesures de débit et de cote pour les trois crues de calage. Les valeurs de pointe n'étant toutefois pas toujours bien enregistrées.

La station de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie d'Attin sur la Canche (ouverte en décembre 2011) a mesuré l'évolution de la cote d'eau pour la crue de décembre 2012. Sur la période intense, aucune mesure n'est disponible avant le 22 décembre à 17h45, soit pendant près de trois jours et demi après le début de la période intense.

4.3.2 Laisses de crue

La phase de diagnostic initial a permis de relever quatre laisses de crue pour les crues de calage. Leur emplacement ainsi que la crue à laquelle elles se réfèrent sont mentionnés dans le tableau qui suit, elles sont aussi localisées sur la carte ci-après :

Numéro	Emplacement	Crue	Cote
C01c	Moulin Bacon	Décembre 1999	6,01 mNGF
C01d	Moulin Bacon	Décembre 2012	6,12 mNGF
C02	Passerelle d'Attin (tablier coté aval)	Décembre 2012	5,94 mNGF
C03	Passerelle de la Grenouillère	Décembre 2012	5,97 mNGF

Tableau 4-2 : Laisses de crue répertoriées pour les crues de calage

Aucune laisse de crue n'a été répertoriée pour la crue de février 2002.

4.3.3 Zones Inondées Connues (ZIC)

Les Zones Inondées Connues (ZIC) sont renseignées dans les données SIG fournies par le Symcéa pour les crues de décembre 1999 et février 2002. Aucune ZIC n'est mentionnée pour la crue de décembre 2012.

La carte ci-après positionne l'ensemble des données disponibles pour le calage des modèles hydrologique et hydraulique.

Données de calage

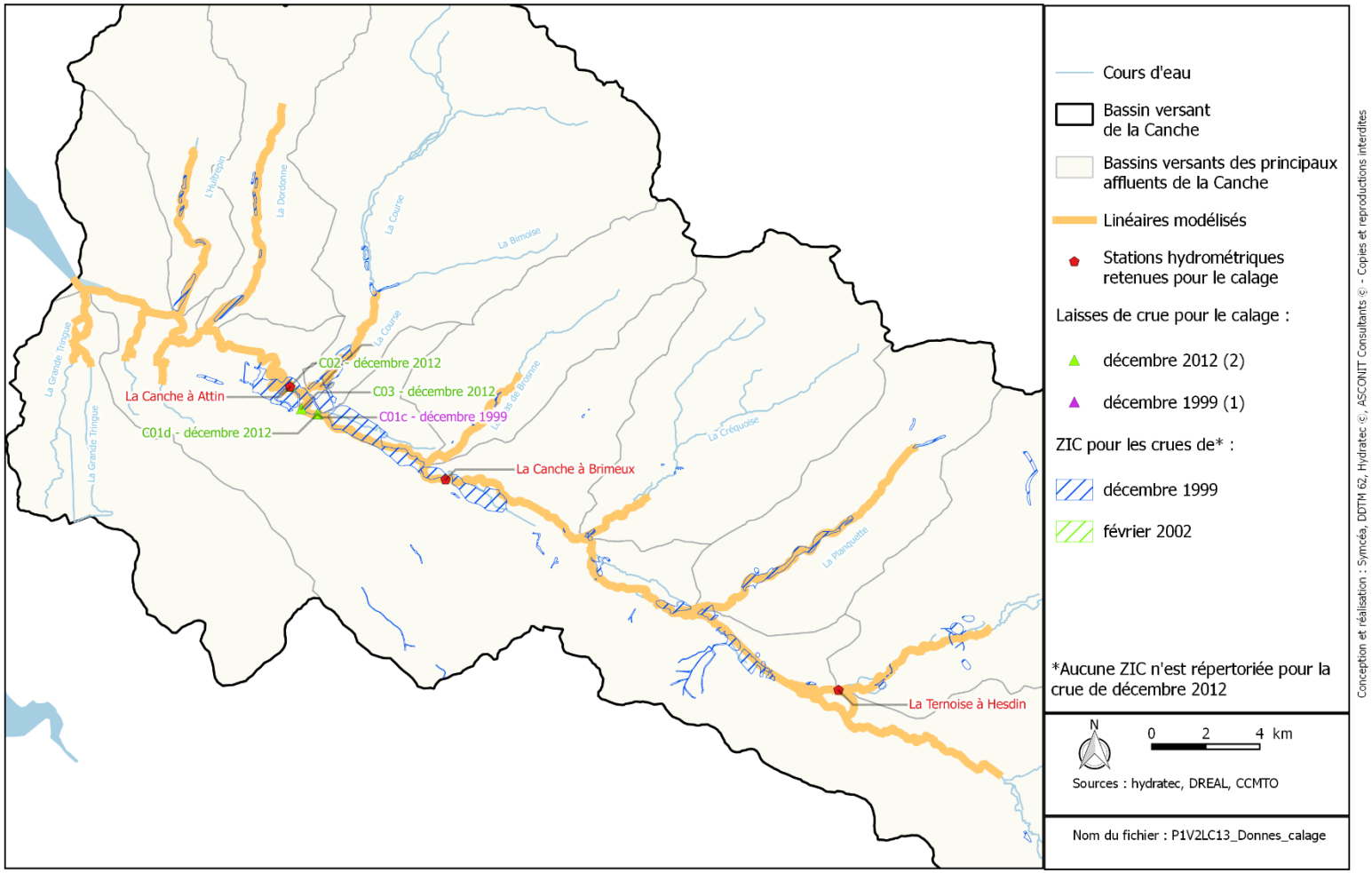


Figure 4-1 : Position des données disponibles pour le calage

4.4 Résultats du calage

4.4.1 Calages aux stations hydrométriques

a) *Courbes de tarage*

Pour les stations d'Hesdin sur la Ternoise et de Brimeux sur la Canche, les courbes de tarage fournies par la DREAL sont comparées à celles calculées.

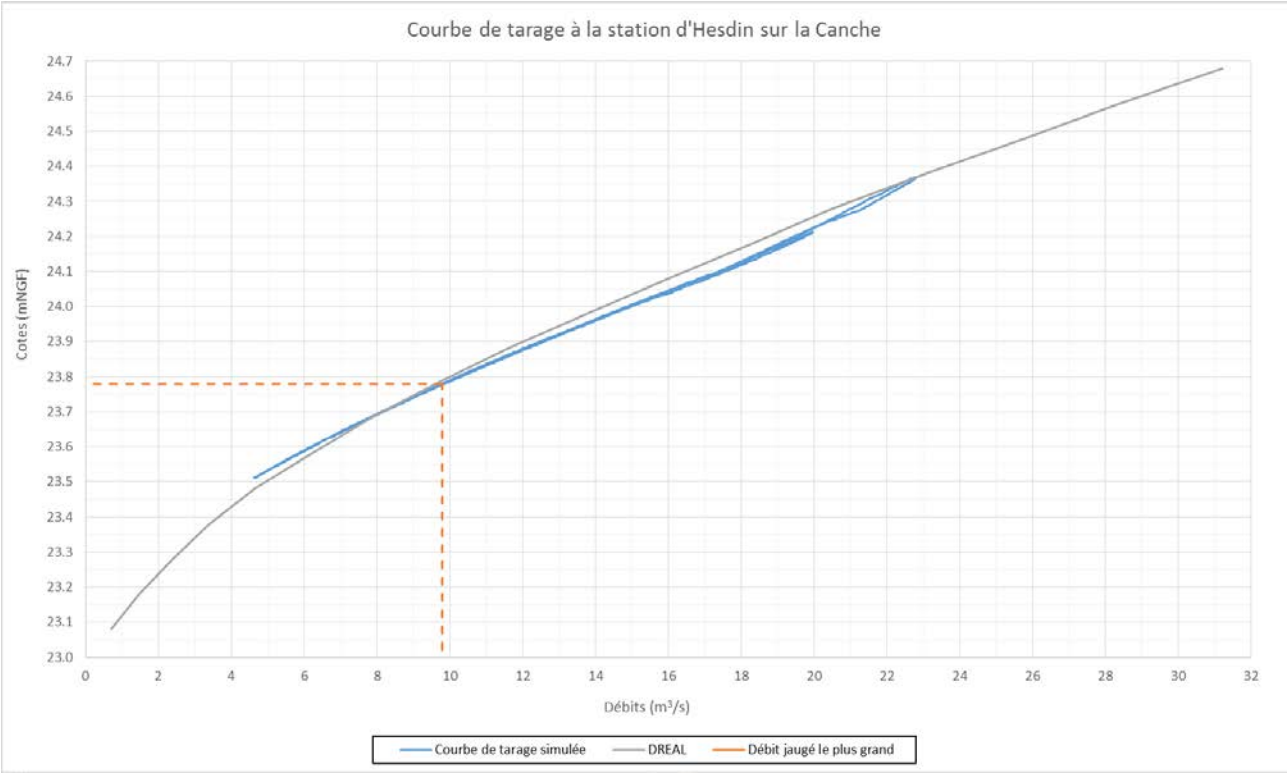


Figure 4-2 : Courbe de tarage de la station d'Hesdin sur la Ternoise

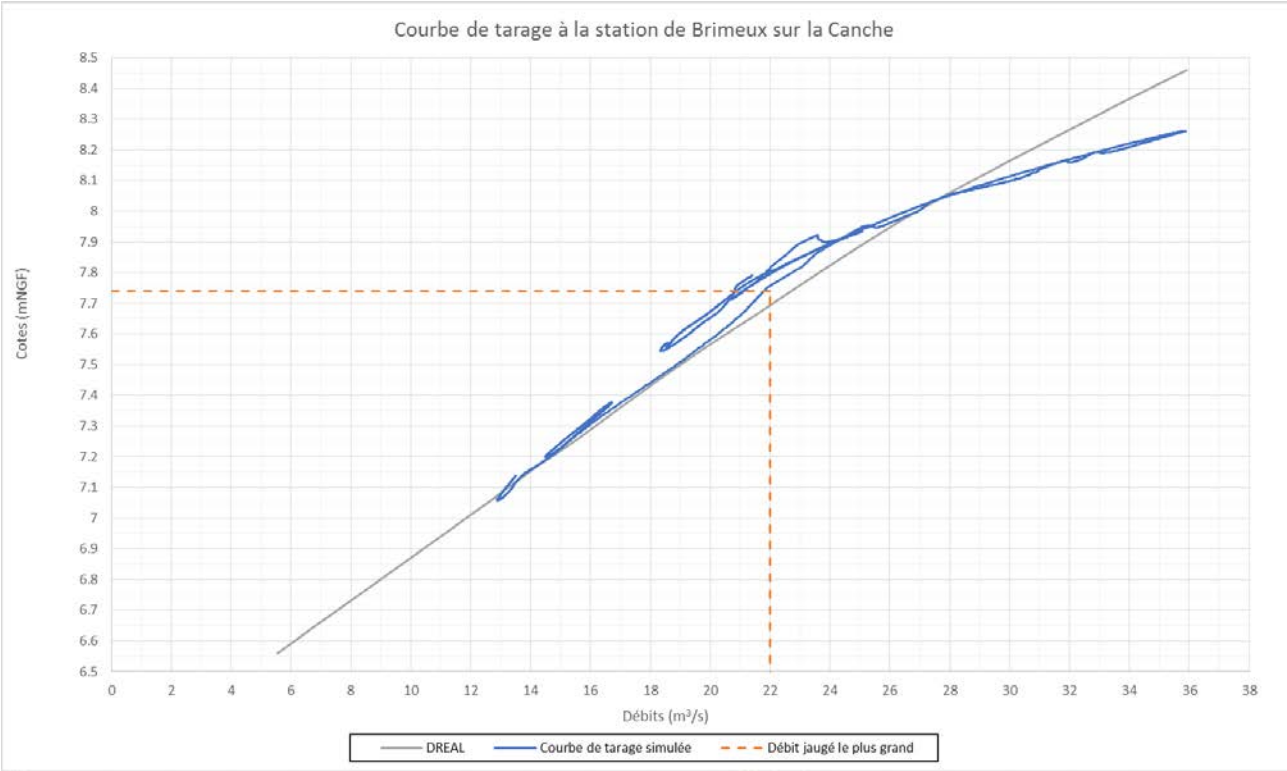


Figure 4-3 : Courbe de tarage de la station de Brimeux sur la Canche

La courbe de tarage calculée à la station d'Hesdin reproduit fidèlement celle de la DREAL sur la plage maximale de débits simulée. Aucun débordement n'a lieu au droit de la station sur la plage de débits simulés.

A Brimeux, il est choisi de faire correspondre la courbe simulée à celle de la DREAL pour les débits inférieurs à 26 m^3/s, puisqu'il s'agit de la portion de courbe tracée à partir des jaugeages. A partir de 26 m^3/s, la pente moyenne de la courbe simulée augmente puisqu'au-delà de ce débit le lit mineur déborde en amont de la station. Ce débordement n'a probablement pas pu être considéré sur la courbe de tarage de la DREAL puisqu'elle a été construite par extrapolation des jaugeages réalisés pour des débits contenus dans le lit mineur (débit jaugé le plus grand de 22 m^3/s).

b) *Hydrogrammes et limnigrammes*

Les trois figures ci-après comparent les hydrogrammes et limnigrammes calculés (en bleu) aux stations d'Hesdin sur la Ternoise et de Brimeux sur la Canche avec ceux affichés dans la Banque Hydro (en vert) pour les trois crues de calage.

L'allure des hydrogrammes est bien reproduite, tant en montée de crue qu'en décrue, ainsi que la dynamique de la crue (moment de la montée de crue et survenue du pic de crue).

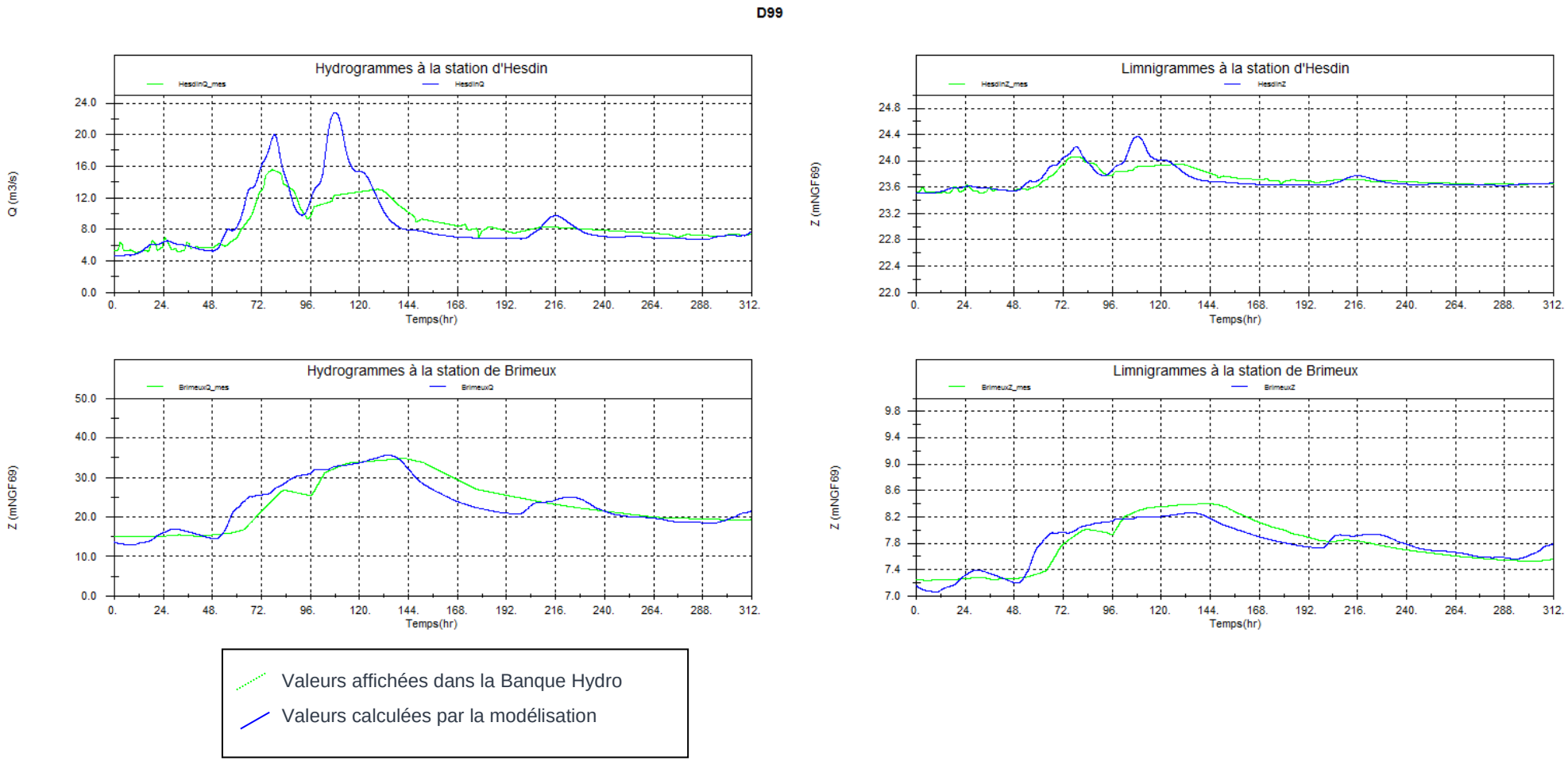


Figure 4-4 : Hydrogrammes et limnigrammes aux stations d'Hesdin et de Brimeux pour la crue de décembre 1999

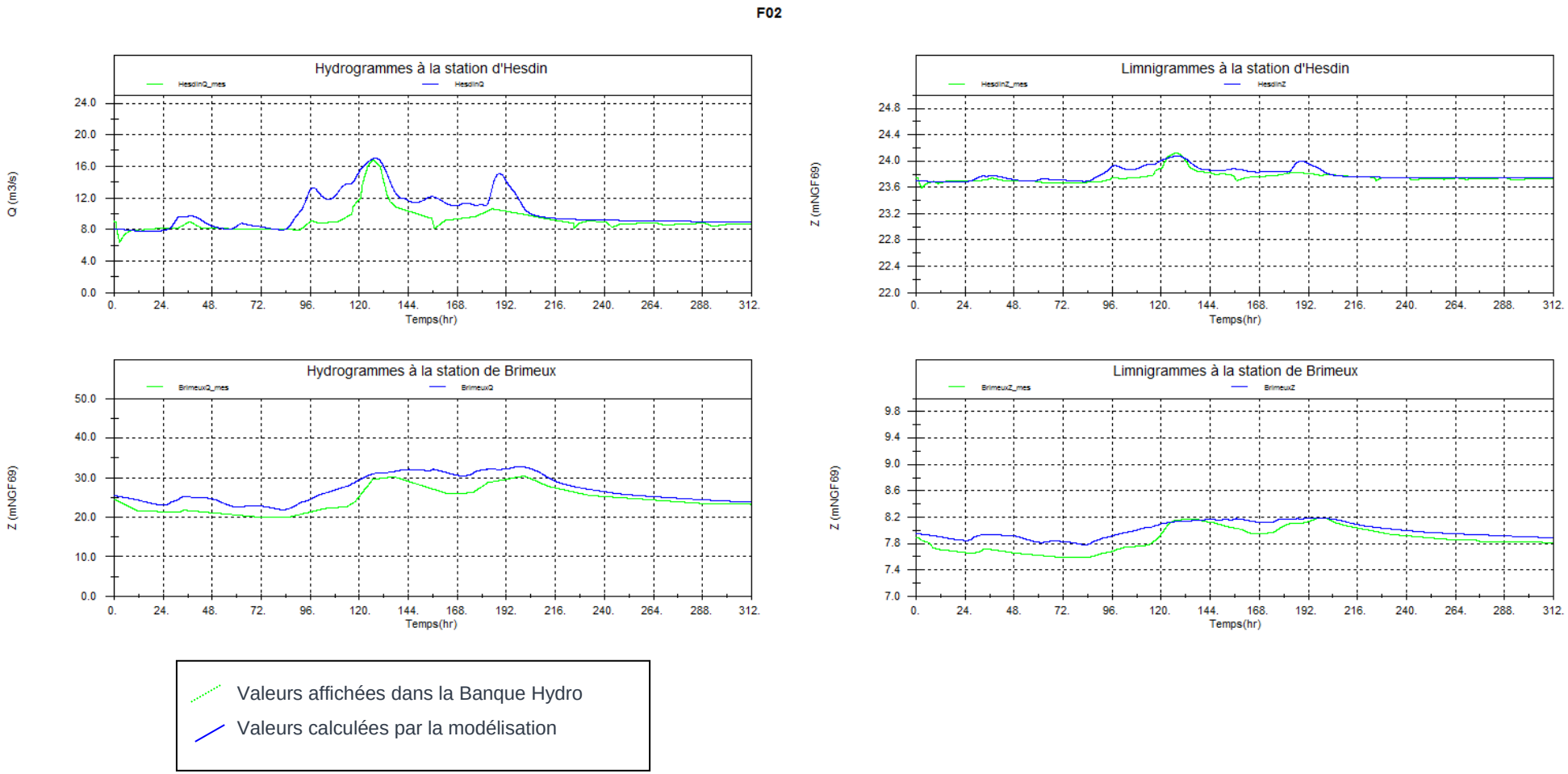
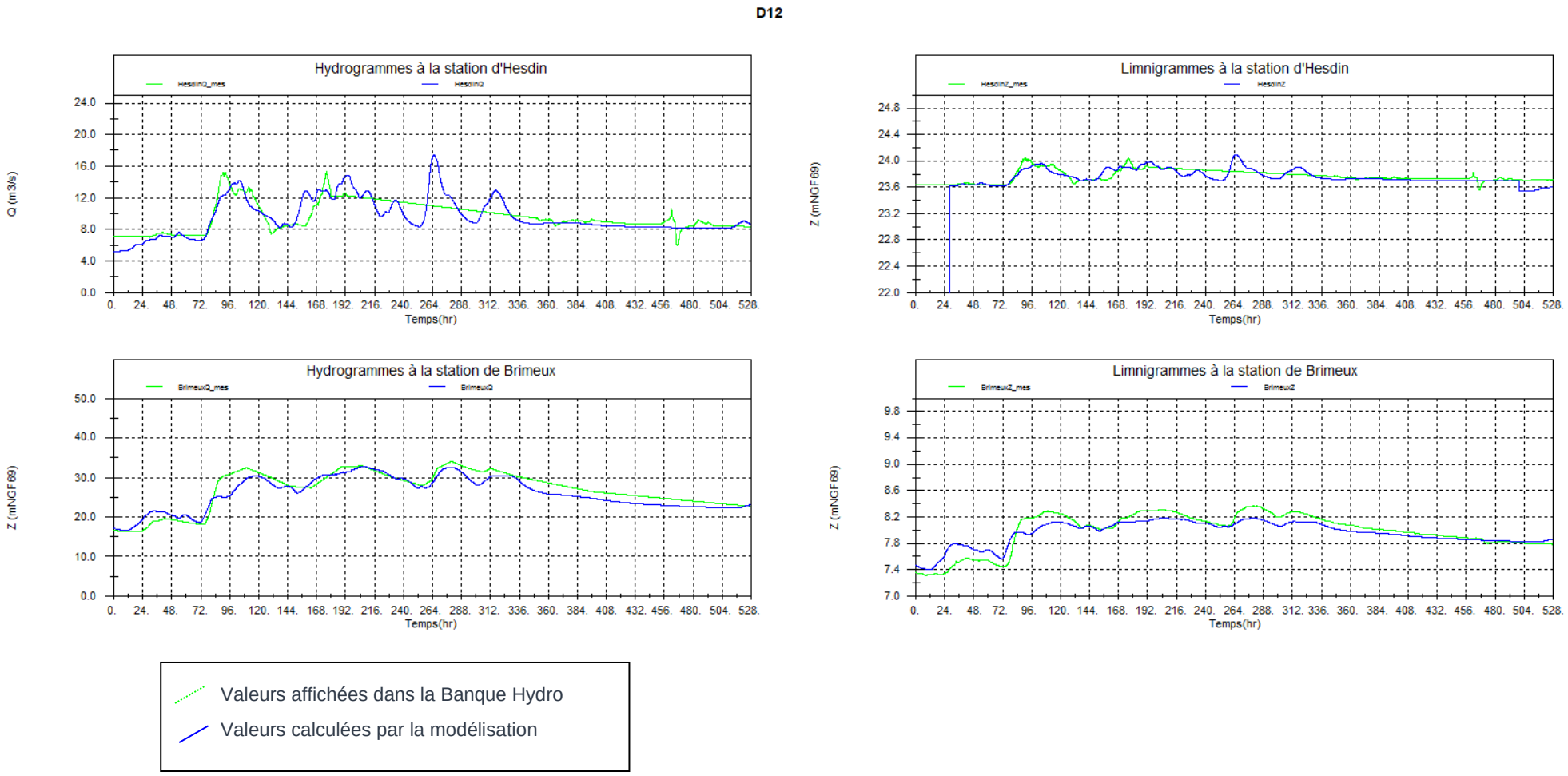


Figure 4-5 : Hydrogrammes et limnigrammes aux stations d'Hesdin et de Brimeux pour la crue de février 2002



Valeurs affichées dans la Banque Hydro

Valeurs calculées par la modélisation

Figure 4-6 : Hydrogrammes et limnigrammes aux stations d'Hesdin et de Brimeux pour la crue de décembre 2012

A noter que les mesures de débit à la station d'Hesdin présentent des lacunes, notamment pour les crues de décembre 1999 et décembre 2012. Ces données manquantes, ne permettent pas d'appréhender correctement les pics de crue pour ces deux épisodes. En décembre 1999, cela est nettement visible sur le second pic de crue où seule une mesure de débit est disponible pour les journées du 30 et du 31 décembre et aucune le 1er janvier. En comparant l'hydrogramme simulé à celui mesuré, il apparait clairement que la mesure ne transcrit pas le débit maximal du second pic de crue de cet épisode. Le premier pic de crue, ayant eu lieu le 27 décembre 1999, semble aussi légèrement sous-estimé avec le débit mesuré. En effet, aucune mesure n'a été effectuée entre le 26 décembre à 18 h45 et le 27 décembre à 16 h. Pour l'événement de décembre 2012, on note une l'absence de données entre le 27 décembre 2012 et le 2 janvier 2013.

Les cotes maximales simulées à Brimeux sont globalement inférieures à celles mesurées. Cela s'explique par les débits Banque Hydro probablement sous-estimés à partir de 25 m^3/s en raison des débordements en lit majeur.

Le tableau qui suit permet de comparer le débit maximal et le volume mesurés et calculés au droit des deux stations pour la crue de février 2002 ; seul événement ne présentant a priori pas de lacune majeure dans la fréquence des mesures.

		Station d'Hesdin	Station de Brimeux
Débit (m^3/s)	Mesuré	17	31
	Calculé	17	33
	Ecart	< 1%	7%
Volume (m^3)	Mesuré	10 276 000	27 479 000
	Calculé	11 488 000	30 180 000
	Ecart	12%	10%

Tableau 4-3 : Débit maximal et volume aux stations d'Hesdin sur la Ternoise et de Brimeux sur la Canche

Les débits de pointe sont reproduits à 0,5% à Hesdin et à 7% près à Brimeux près, ce qui est très satisfaisant. L'écart plus important à Brimeux s'explique par un bassin versant intercepté plus étendu, donc des incertitudes sur les apports plus importantes.

Les volumes sont reproduits à 12% près à Hesdin et 10% près à Brimeux, ce qui est correct. Une attention particulière a été portée à ne pas sous-estimer le volume de crue afin de se placer dans un contexte sécuritaire et de ne pas surestimer l'efficacité des éventuels ouvrages projetés dans la suite de l'étude.

En complément, une comparaison entre les cotes mesurées et calculées est effectuée à la station de l'Agence de l'Eau à Attin pour la crue de décembre 2012. Il s'agit de la seule des trois crues simulées à avoir été mesurée à cette station qui a ouvert en 2011. La figure suivante présente les limnigrammes calculés et mesurés pour cette crue.

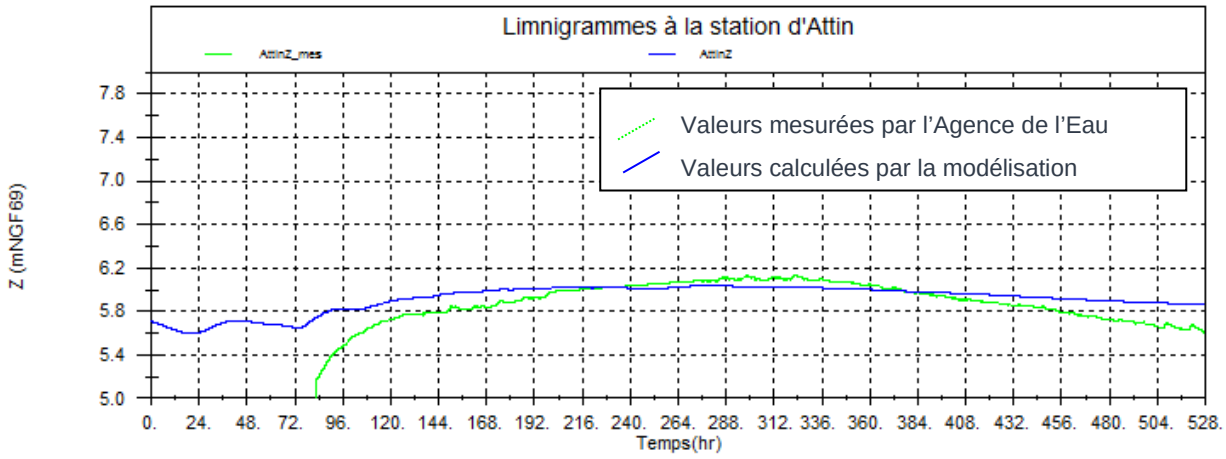


Figure 4-7 : Hydrogrammes et limnigrammes à la station d'Attin pour la crue de décembre 2012

On observe une différence de -9 cm au pic de crue entre les cotes simulées et mesurées. L'élévation brutale du niveau d'eau observé entre 80 et 100h sur la série de mesures semble provenir d'un effet d'inertie important suite à la remise en fonctionnement de la sonde. Selon l'Agence de l'Eau la fiabilité des mesures est à prendre avec prudence du fait de l'absence d'un protocole d'étalonnage strict et d'un système de mesure vieillissant. Par

ailleurs, le limnigramme simulé met en évidence que l'influence de la marée n'atteint pas la station d'Attin pour la crue de décembre 2012.

4.4.2 Calage par rapport aux laisses de crue

Le tableau ci-après permet de comparer les cotes d'eau simulées avec celles mesurées en chaque laisse de crue disponible.

N°	Localisation	Crue	Cote mesurée (mNGF)	Cote calculée (mNGF)	ΔZ (m)
C01c	Moulin Bacon	Décembre 1999	6.01	6.14	0.13
C01d	Moulin Bacon	Décembre 2012	6.12	6.20	0.08
C02	Passerelle d'Attin	Décembre 2012	5.94	6.04	0.10
C03	Passerelle de la Grenouillère	Décembre 2012	5.97	6.15	0.18

Tableau 4-4 : Cotes mesurées et calculées au droit des laisses de crue

Les écarts entre mesure et calcul sont de l'ordre de 10 - 15 cm ce qui est tout à fait convenable.

Au droit de la laisse C03, la cote maximale calculée est 18 cm au-dessus de celle mesurée alors qu'à proximité immédiate, à la station d'Attin, le calcul donne une cote 9 cm en-dessous de la mesure. La cote calculée paraît donc pertinente compte-tenu des incertitudes de mesure à ces deux points de calage.

4.4.3 Calage par rapport aux ZIC

L'extension de la zone inondée calculée avec le modèle hydraulique est comparée à celle des ZIC pour la crue de décembre 1999 (voir atlas en annexe 3). Il s'agit du seul épisode modélisé pour lequel des ZIC sont disponibles sur les linéaires modélisés.

Compte-tenu des incertitudes sur le tracé des ZIC, il s'agit de comparer les grands ensembles inondés, plus que le tracé précis de la zone inondable. La modélisation reproduit assez fidèlement les zones inondées par débordement constatées.

Les trois principaux écarts observés sont présentés ci-dessous.

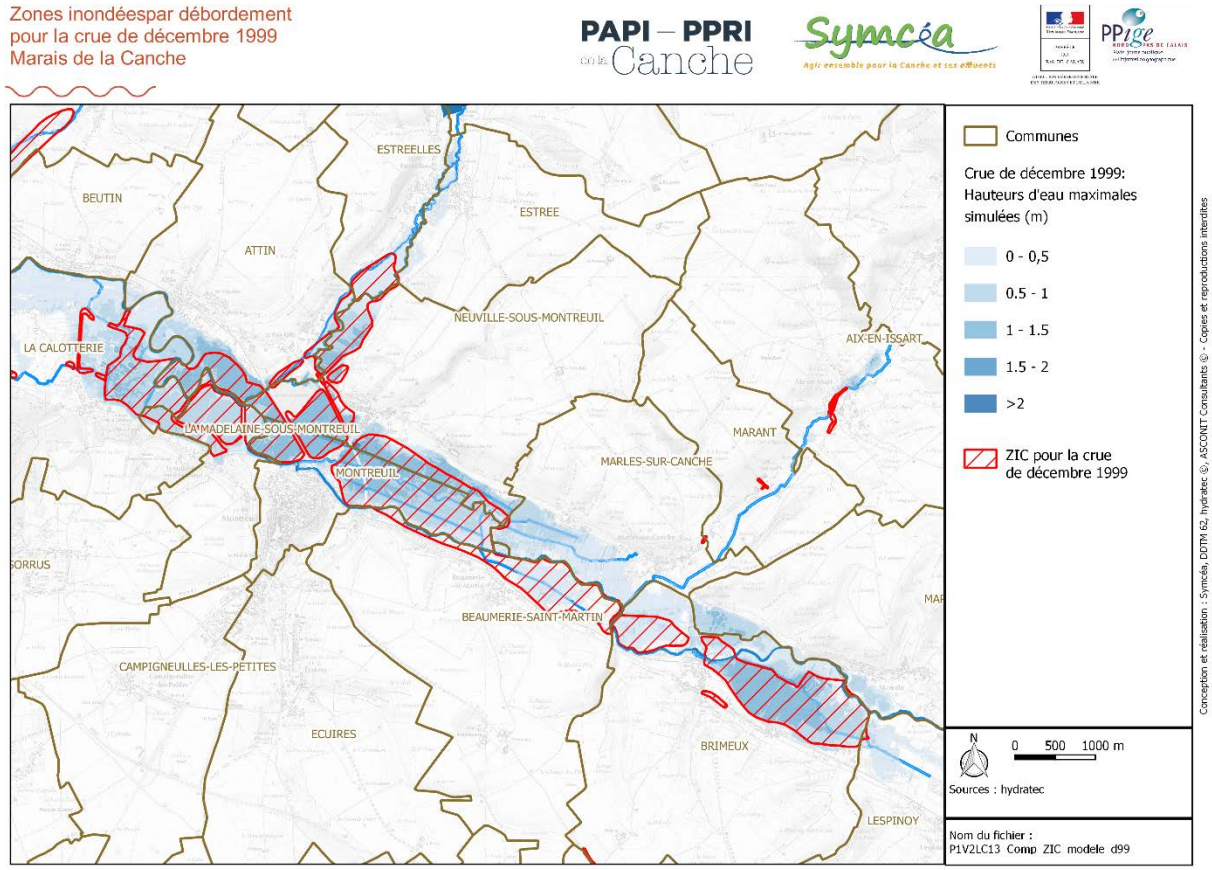


Figure 4-8 : Zones inondées par modélisation et selon les ZIC sur la Canche entre Brimeux et la Calotterie pour la crue de décembre 1999

Dans les marais de la Canche, entre Brimeux et la Calotterie, la modélisation donne une zone inondée qui englobe totalement la ZIC et qui la majore. On note un écart sur la commune de Marles-sur-Canche, qui, selon la ZIC n'est pas inondée. Pourtant les résultats de la modélisation semblent en accord avec la topographie locale qui décrit la Canche comme une rivière perchée avec un fond de vallée dans les marais en rive droite. L'absence de ZIC à Marles-sur-Canche doit probablement provenir d'un vide d'information de la part de cette commune.

Sur la Planquette, une ZIC indique une inondation continue en lit majeur, depuis l'aval de la rue Godiamont à Fressin jusqu'à la rue du Stade à Cavron-Saint-Martin, avec notamment la D154 partiellement submergée. Cette zone inondée n'est pas reproduite avec la modélisation ; pour cette crue, la Planquette ne sort pas de son lit mineur. Les résultats de la modélisation paraissent toutefois pertinents puisque lors des entretiens, il avait été mentionné que sur les communes traversées par la ZIC, l'inondation n'atteignait pas le rez-de-chaussée des maisons alors que 45 bâtiments sont dénombrés dans cette ZIC. Par ailleurs, Monsieur le maire de Fressin a confirmé que, pour cet épisode, les seuls enjeux touchés sur sa commune résultaient de ruissellement depuis les coteaux et de la présence d'embâcles sur un seuil aujourd'hui arasé. D'autre part, la présence de cette ZIC peut s'expliquer par une inondation par remontée de nappe. Pour les plus hautes eaux de nappe, la ZIC est en effet partiellement inondée, comme le montre la figure 4-4 du livrable LCOM 13 : Remontée de nappe rappelée ci-après.

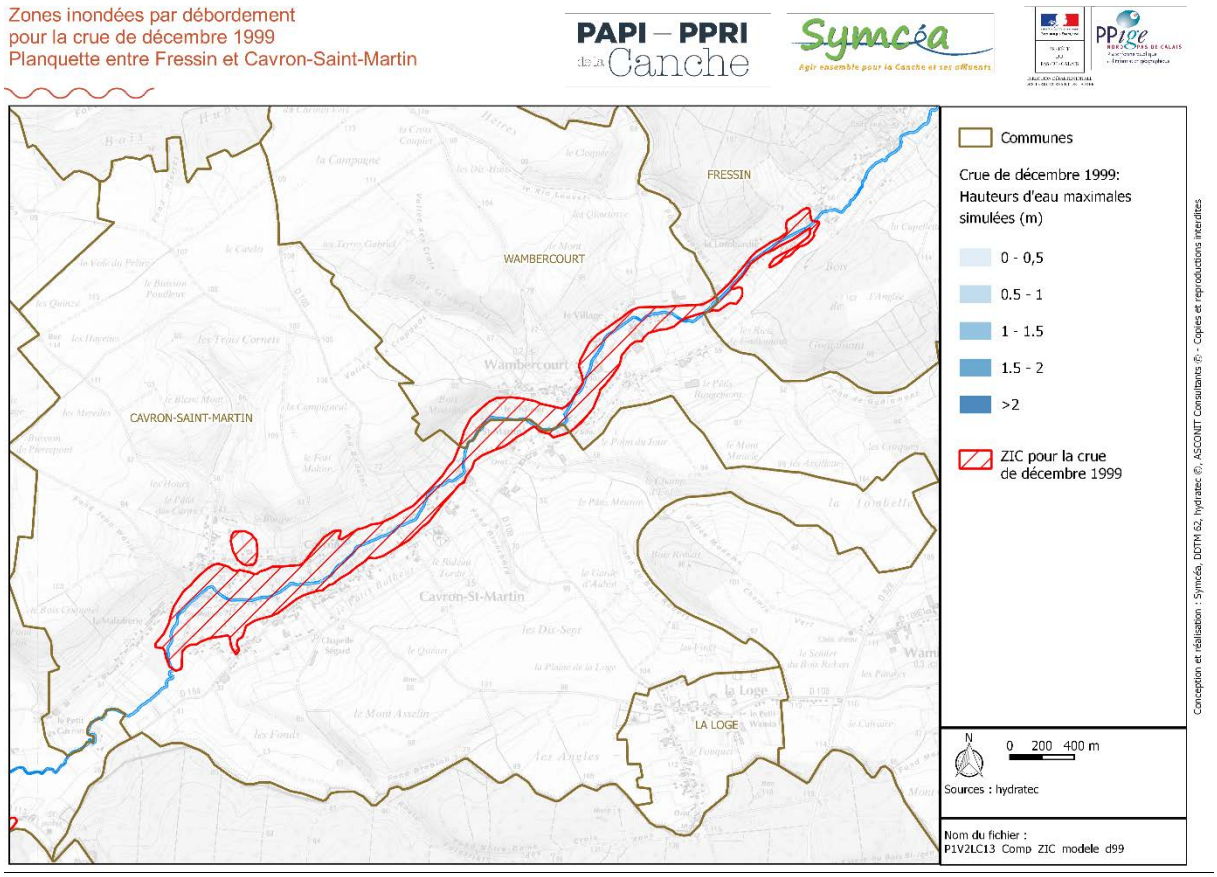


Figure 4-9 : Zones inondées par modélisation et selon les ZIC sur la Planquette entre Fressin et Cavron-Saint-Martin pour la crue de décembre 1999

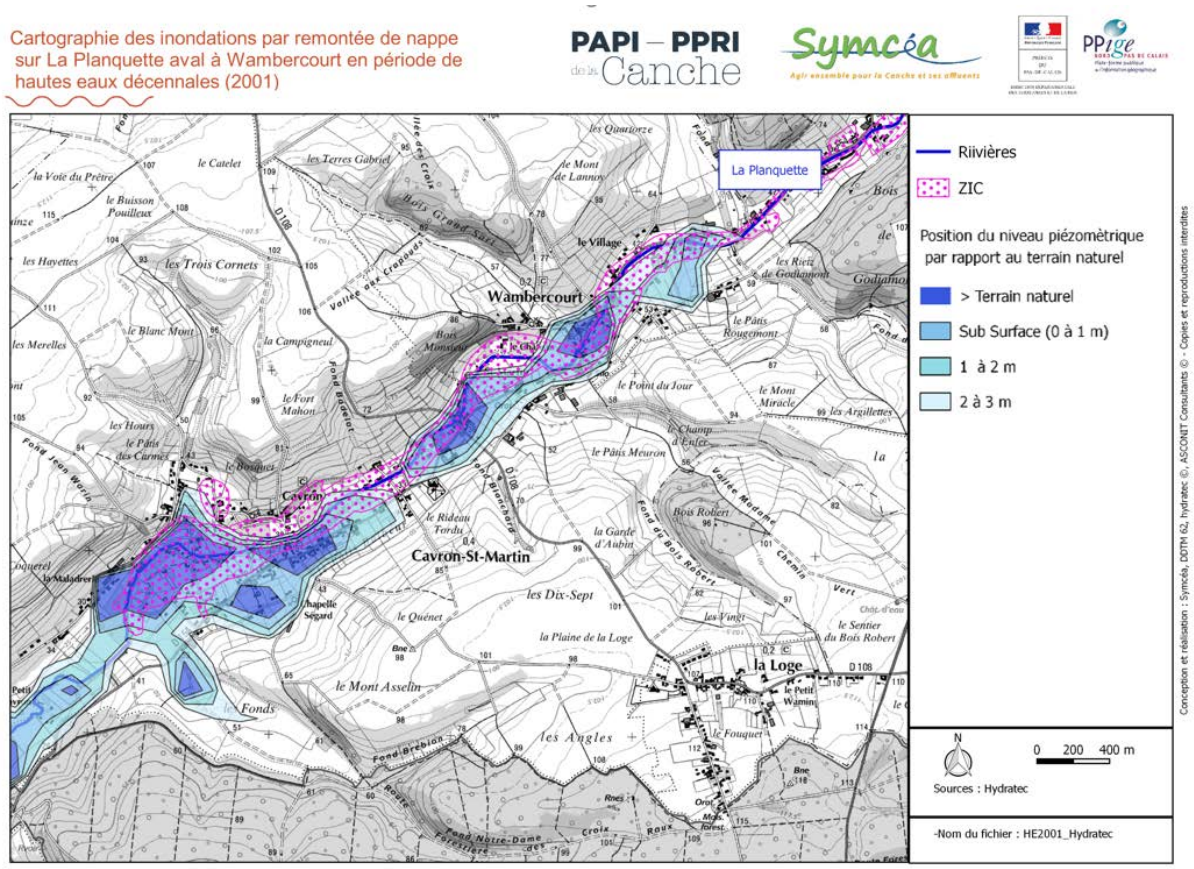


Figure 4-10 : Aléa remontée de nappe sur la Planquette entre Fressin et Cavron Saint-Martin

Sur la Course à Estrée et Estréelles aucune ZIC n'atteste d'une inondation pour la crue de décembre 1999 alors que le modèle indique des débordements en lit majeur affectant des enjeux. Sur la commune d'Estrée, une trentaine de bâtiments (pour la plupart des habitations) situés rue du Marais sont inondés selon le modèle. Selon les informations fournies par la DREAL, ces deux communes ont déjà été soumises à des arrêtés CATNAT pour des dommages causés par des débordements de la Course. Bien qu'aucun arrêté CATNAT ne soit répertorié pour la crue de décembre 1999, cela montre que ces communes sont régulièrement impactées par le débordement de la Course. C'est notamment le cas pour la crue de décembre 2012 ayant touché, selon le modèle, deux habitations sur la commune d'Estréelles qui a fait l'objet d'un arrêté CATNAT.

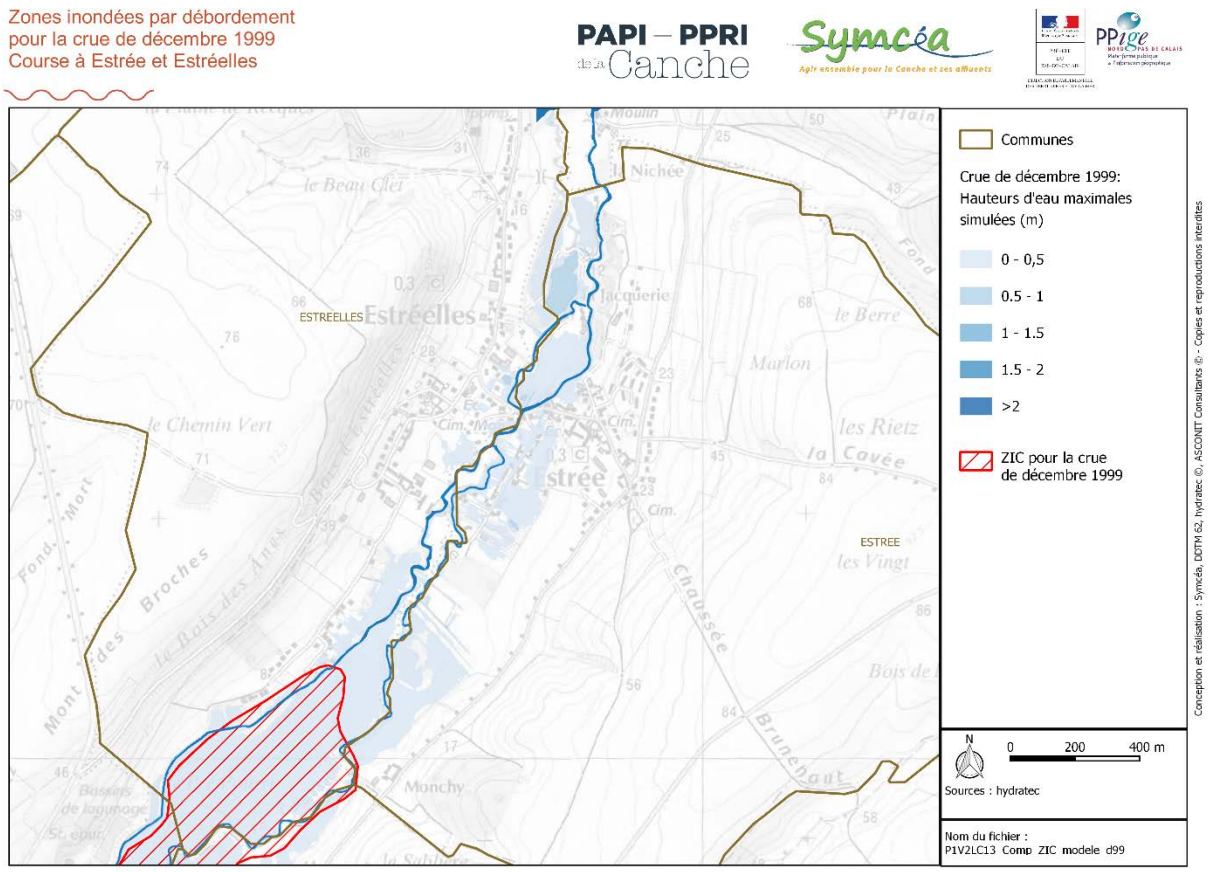


Figure 4-11 : Zones inondées par modélisation et selon les ZIC sur la Course à Estrée et Estréelles pour la crue de décembre 1999

4.5 Paramétrage retenu – enseignements du calage

Les résultats présentés ci-avant sont obtenus avec un jeu de paramètres décrit dans les paragraphes qui suivent.

4.5.1 Aptitude du sol à ruisseler

L'épaisseur totale du sol est répartie entre 20% de RFU et 80 % de hauteur d'interception potentielle du sol (J_o).

J_o vaut entre 80 et 170 mm selon les sites.

La carte qui suit présente les valeurs retenues à l'issue du calage pour le stockage total J_{tot} (RFU + J_0) :

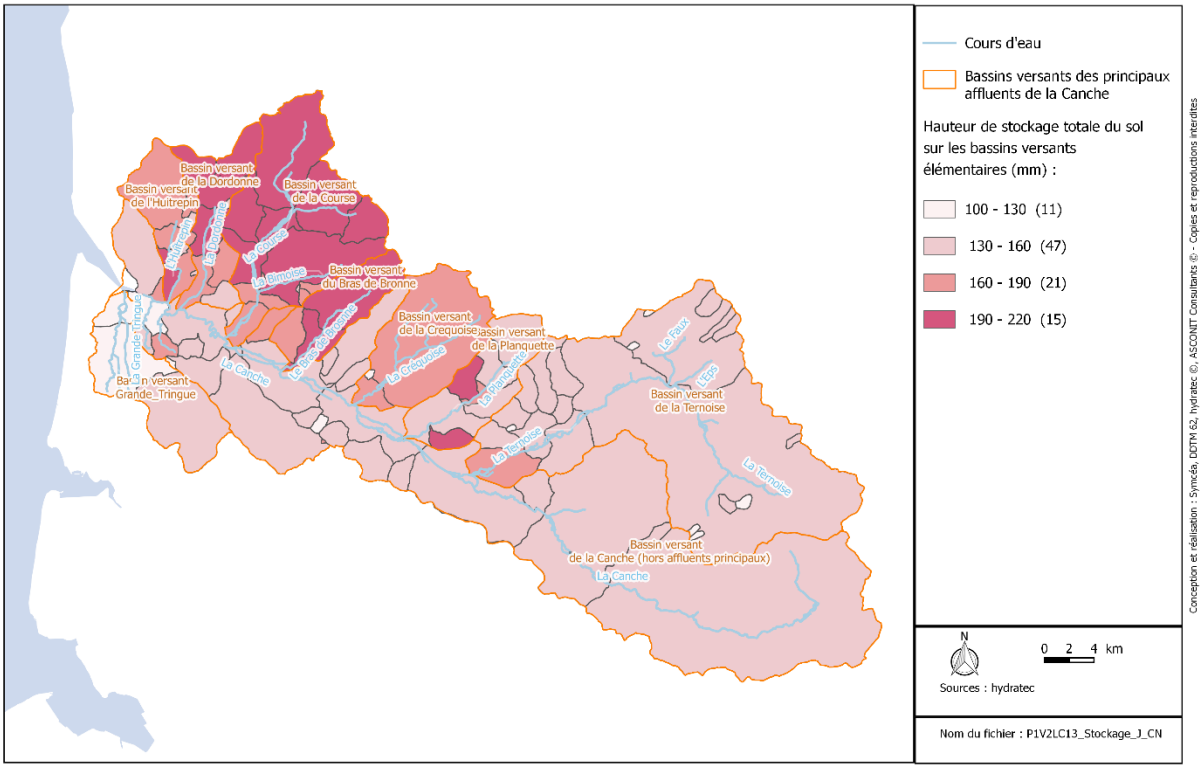


Figure 4-12 : Stockages totaux des bassins versants élémentaires retenus pour le calage

Les hauteurs de sol varient globalement entre 100 et 200 mm.

On constate que les sols des bassins versants du Bras de Brosne, de la Course et de la Dordonne ont une plus forte capacité naturelle à stocker l'eau. Cela s'explique en partie par une part plus importante de prairies que sur les autres bassins versants des affluents de la Canche. A contrario, les bassins versants les plus à l'aval, notamment le long de la Grande Tringue ont une capacité de stockage plus faible. Cela provient majoritairement de leur géologie qui les rend plus imperméables.

4.5.2 Conditions initiales des sols

Pour les 3 crues, la RFU est saturée en début d'épisode. Cela est couramment le cas pour les crues d'hiver et de printemps à période préparatoire pluvieuse.

En début de crue, l'épaisseur de sol J_0 est quant à elle remplie à 55% pour chacun des trois épisodes, ce qui confirme la survenue de pluies longues saturant les sols pendant la période préparatoire.

4.5.3 Infiltration vers la nappe

Le calage hydrologique montre que seule une petite proportion de la pluie (15%) s'écoule par ruissellement direct. Le reste (85 %) participe à une réponse hydrologique beaucoup plus lente de type respiration de nappe alluviale. Le calage a montré qu'aucune perte vers la nappe profonde n'est à prendre en compte.

4.5.4 Routages des hydrogrammes calculés

Les paramètres des routages sont :

- La longueur du thalweg
- La célérité moyenne de l'onde de crue : 2 m/s.

4.5.5 Paramètres hydrauliques de vallée – coefficients de Strickler

Les coefficients de Strickler adoptés en vallée sont de :

- Pour le lit mineur :
  - 20 en amont d'Hesdin et sur tous les affluents de la Canche,
  - 22 entre l'aval d'Hesdin et Beaurainville,
  - 25 de Beaurainville jusqu'à la confluence avec la Manche.
- Pour le lit majeur :
  - 10 en zone rurale,
  - 4 dans les zones de marais fortement boisées entre Marles-sur-Canche et la Calotterie.

Il s'agit de valeurs moyennes couramment admises pour ce type de vallée.

4.6 Conclusion

Le calage est satisfaisant dans la mesure où la modélisation reproduit fidèlement la dynamique de crue des débits et cotes aux stations hydrométriques ainsi que la cote d'eau atteinte au droit des laisses de crues.

Faute de données historiques, le calage est essentiellement effectué sur la Canche et la Ternoise (aucune donnée disponible sur les petits affluents hormis quelques ZIC).

Le calage permet de pallier les lacunes de mesures, par exemple pour représenter les pics de crue à la station d'Hesdin sur la Ternoise.

Par ailleurs, la modélisation permet de redresser la courbe de tarage pour les forts débits non jaugés, et ainsi rendre compte de la cassure naturelle de la courbe lors des débordements.

5 Tests de sensibilité

Dans ce chapitre, certains paramètres des scénarios de simulation des crues sont modifiés afin d'évaluer l'impact de ces variations sur les résultats de modélisation.

5.1 Sensibilité au coefficient de Strickler

Pour les trois crues de calage, des tests de sensibilité du modèle à la variation des coefficients de Strickler sont effectués.

Une première série de simulations consiste à augmenter de 20% les coefficients de Strickler en lit majeur et en lit mineur, puis une seconde à les diminuer de 20%. Le tableau suivant permet de comparer les écarts de cotes et de débits atteints au droit des stations hydrométriques d'Hesdin, de Brimeux et d'Attin.

Ecarts de cotes maximales atteintes par rapport à la situation initiale			
Crue	Station	Ks+20%	Ks-20%
Décembre 1999	Hesdin	-4 cm	-2 cm
	Brimeux	-13 cm	16 cm
	Attin	-11 cm	4 cm
Février 2002	Hesdin	0 cm	5 cm
	Brimeux	-11 cm	19 cm
	Attin	-2 cm	4 cm
Décembre 2012	Hesdin	-1 cm	3 cm
	Brimeux	-9 cm	19 cm
	Attin	-2 cm	4 cm
	Moyenne	-6 cm	10 cm

Ecarts de débits maximaux atteints par rapport à la situation initiale			
Crue	Station	Ks+20%	Ks-20%
Décembre 1999	Hesdin	3%	-15%
	Brimeux	3%	5%
	Attin	6%	0%
Février 2002	Hesdin	0%	-1%
	Brimeux	4%	3%
	Attin	-1%	0%
Décembre 2012	Hesdin	0%	0%
	Brimeux	6%	2%
	Attin	0%	0%

Tableau 5-1 : Sensibilité au coefficient de Strickler : Ecarts de cotes et débits maximaux atteints

Pour chacune des simulations effectuées, les hydrogrammes et limnigrammes aux stations d'Hesdin et de Brimeux ainsi que le limnigramme à la station d'Attin sont présentés en annexe 4.

Les figures ci-après présentent les hydrogrammes aux stations d'Hesdin sur la Ternoise, de Brimeux et d'Attin sur la Canche résultant de la variation de plus ou moins 20% les coefficients de Strickler, pour la crue de décembre 1999.

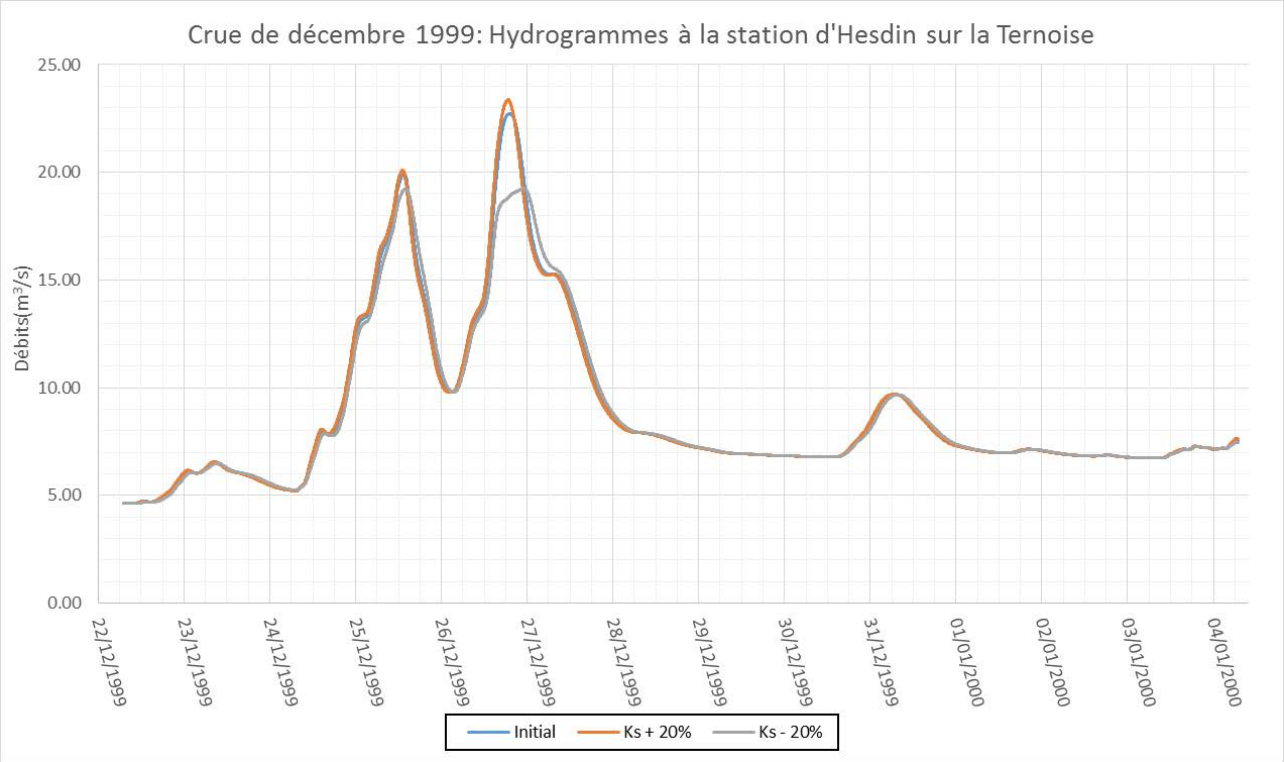


Figure 5-1 : Sensibilité au Strickler : Hydrogrammes à la station d'Hesdin sur la Ternoise
Crue de décembre 1999

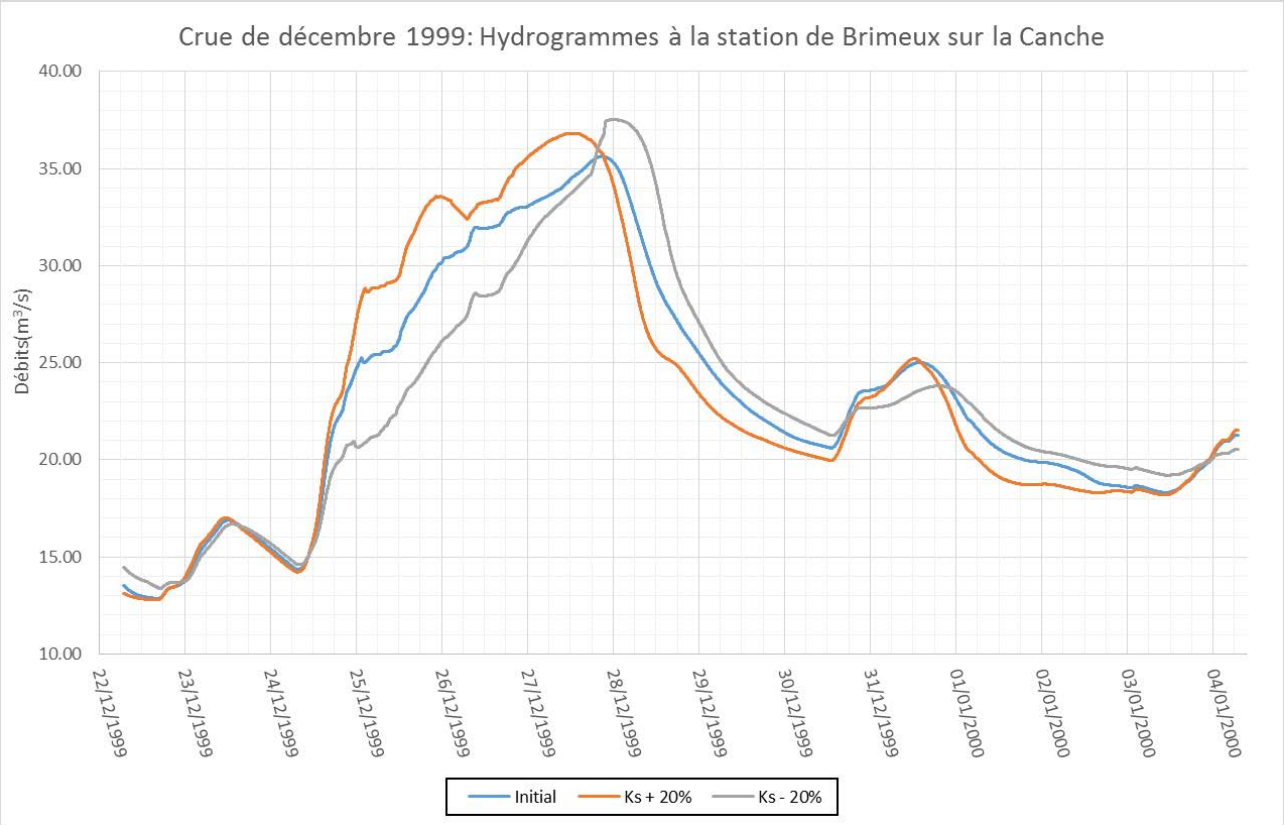


Figure 5-2 : Sensibilité au Strickler : Hydrogrammes à la station de Brimeux sur la Canche
Crue de décembre 1999

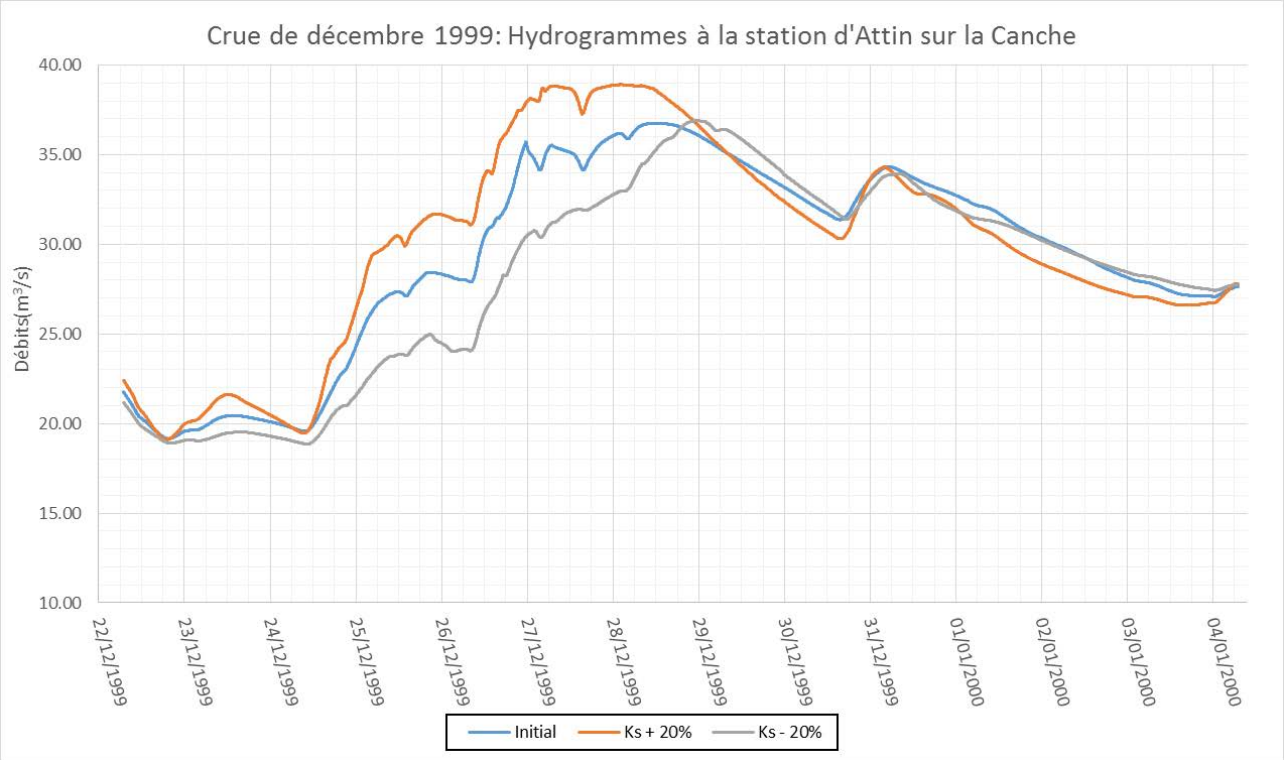


Figure 5-3 : Sensibilité au Strickler : Hydrogrammes à la station d'Attin sur la Canche Crue de décembre 1999

Une augmentation de 20% du coefficient de Strickler tend à abaisser entre 0 à 10 cm les niveaux d'eau. Le débit maximal atteint augmente entre 0 et 6%. Ainsi, augmenter le coefficient de Strickler tend à limiter le frottement de l'écoulement sur le fond et à accroître sa vitesse, donc à diminuer les hauteurs d'eau et à augmenter les débits. Cela traduit un écrêtement moindre des vallées. On note aussi une arrivée plus précoce du pic de crue par rapport à la situation initiale. Par exemple, à la station de Brimeux, le débit maximal est atteint 8h20 plus tôt pour la crue de décembre 1999.

A l'inverse, la diminution du coefficient de Strickler engendre un frottement plus important de l'écoulement sur le fond et donc une élévation moyenne de 10 cm des niveaux d'eau. Diminuer le coefficient de Strickler favorise l'écrêtement sur la Ternoise en amont d'Hesdin, puisque le débit maximal à la station est abaissé de 3,5 m^3/s par rapport à la situation initiale. Cet écrêtement provient d'une inondation plus étendue en lit majeur à l'amont de la station comparé à la situation initiale. Celui-ci engendre une baisse de 2 cm du niveau d'eau maximal sur la Ternoise à Hesdin.

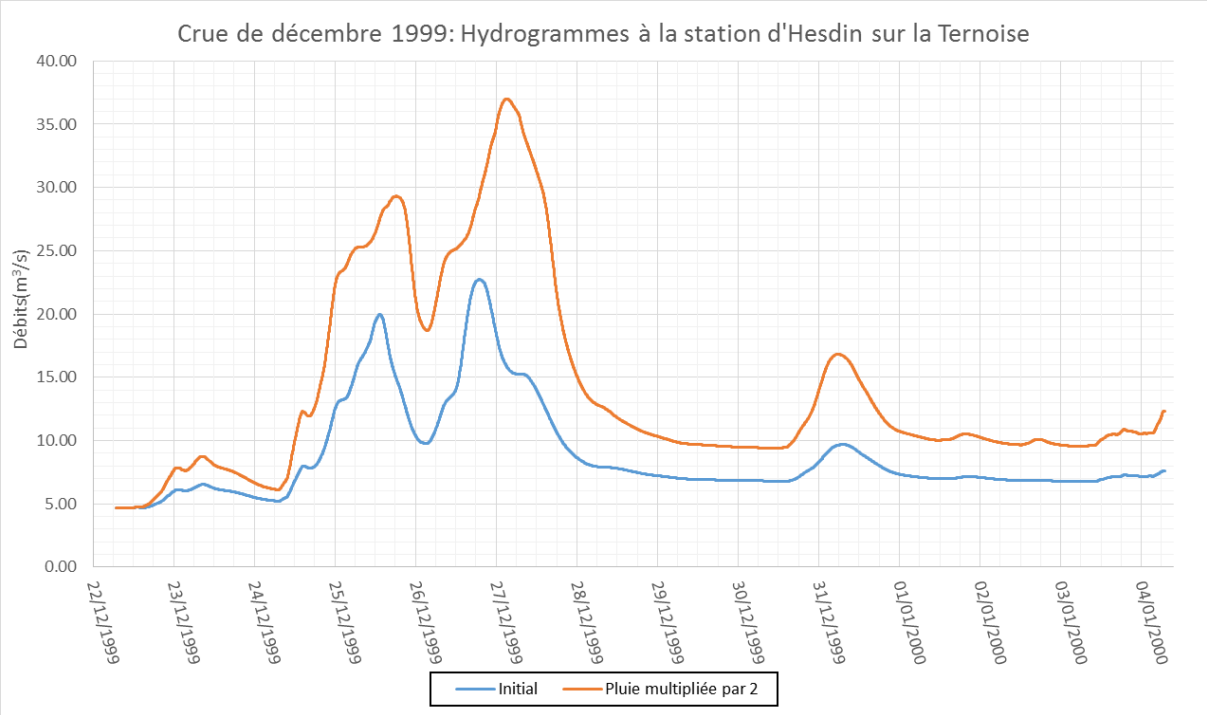
La diminution des coefficients de Strickler retarde l'arrivée du pic de crue, par exemple de 3h10 à Brimeux pour la crue de décembre 1999.

5.2 Réactivité à la pluie tombée

Une simulation est effectuée en considérant la pluie de la période intense de la crue de décembre 1999 multipliée par deux. Elle est comparée aux résultats obtenus avec la pluie de décembre 1999 (appelée « situation initiale » dans la suite).

Ce test doit permettre d'appréhender le fonctionnement hydraulique de la vallée pour les crues extrêmes, et donc à aiguiller sur la loi d'ajustement statistique à considérer pour le calcul des débits caractéristiques aux deux stations hydrométriques de référence (voir l'analyse hydrologique statistique).

Voici les hydrogrammes obtenus aux stations d'Hesdin sur la Ternoise et de Brimeux sur la Canche ainsi que ceux de la situation initiale :



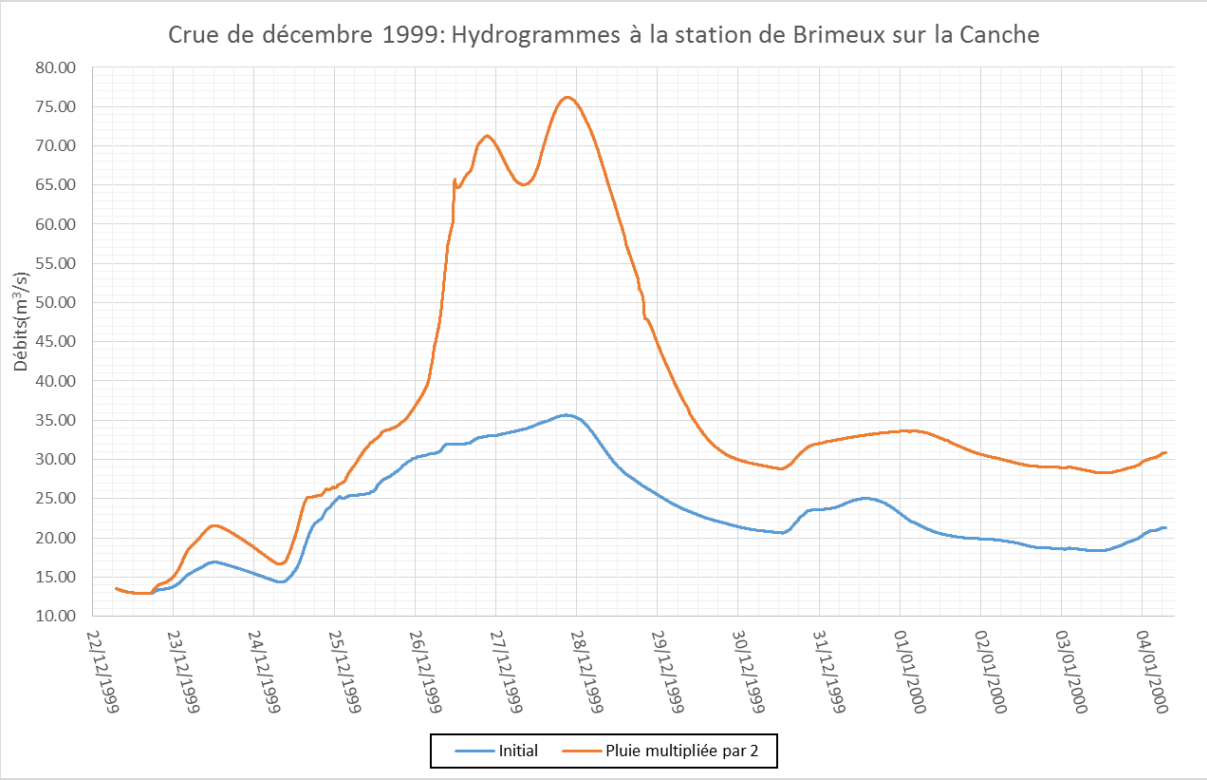


Figure 5-4 : Hydrogrammes aux stations d'Hesdin sur la Ternoise et de Brimeux sur la Canche pour la pluie de décembre 1999 et la même pluie multipliée par deux

Multiplier par deux la pluie entraine une augmentation d'un facteur 1,6 du débit de pointe à Hesdin et de 2,2 de celui à Brimeux.

Donc les pluies extrêmes génèrent des débits extrêmes aux deux stations hydrométriques de référence, ce qui tend à discréditer l'hypothèse d'un plafonnement des débits à partir d'une certaine intensité Par conséquent, un ajustement statistique des débits maximaux annuels selon une loi normale ne peut pas être argumenté au regard de ces résultats.

On remarque par ailleurs qu'en multipliant la pluie par deux, l'hydrogramme à Brimeux présente deux pics de crue générés par deux trains de pluie distincts, qui ne sont pas visibles dans la situation initiale. Cela atteste que les zones de stockage en amont sont remplies par le premier train de pluie et que la vallée ne peut plus écrêter la crue lors du second train de pluie. Un phénomène similaire se produit sur la Ternoise à Hesdin où le premier pic de crue est multiplié par 1,45 par rapport à la situation initiale alors que le second est augmenté d'un facteur 1,6. De la même façon, lors de l'arrivée du second train de pluie, la vallée est remplie et n'est plus en mesure d'écrêter aussi efficacement le second pic de crue.

5.3 Sensibilité à la condition limite aval

Un test de sensibilité à la condition limite aval est effectué sur la crue de décembre 1999.

Le test consiste à comparer un niveau marin abaissé ou rehaussé de 20% (exprimé en cote marine) par rapport au niveau observé lors de la crue de décembre 1999 (cote 6,30 mNGF = 10,75 CM). L'ensemble des simulations est effectué à un niveau marin variable de fréquence bi-quotidienne.

- Résultats à venir -

6 Simulation des scénarios de référence

Il s'agit ici d'étudier les scénarios suivant :

- S3 = Crue faible avec ouvrages hydrauliques,
- S4 = Crue faible sans ouvrages hydrauliques,
- S1 = Crue moyenne avec ouvrages hydrauliques,
- S2 = Crue moyenne sans ouvrages hydrauliques,
- S5 = Crue extrême sans ouvrages hydrauliques.

6.1 Construction des scénarios de référence

Un scénario est défini comme l'association d'une crue, d'une configuration des ouvrages structurants existants et d'un niveau marin (pour la condition limite aval).

6.1.1 Les crues des scénarios de référence

Les trois types de crue exigées par la Directive Inondation sont associés à des événements dont les périodes de retour sont indiquées dans le tableau ci-après :

Type de crue	Période de retour associée
Crue faible	10 à 30 ans
Crue moyenne	≈ 100 ans
Crue extrême	≈ 1 000 ans

Tableau 6-1 : Période de retour des crues faibles, moyenne et extrême

Pour la présente étude, les trois crues théoriques de référence sont des événements de période de retour 10, 100 et 1 000 ans.

Les paragraphes qui suivent exposent la méthode de construction de ces crues : l'évaluation des débits de pointe des hydrogrammes d'alimentation du modèle hydraulique.

a) *Débits de pointe*

Le tableau suivant indique les débits caractéristiques à l'exutoire des affluents de la Canche ainsi qu'aux stations hydrométriques de référence de Brimeux sur la Canche et d'Hesdin sur la Ternoise (voir le livrable LCOM13.1 : Analyse hydrologique) retenus pour la modélisation. Ils sont obtenus par ajustements statistiques.

	Superficie du bv (km²)	Méthode	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	200 ans	500 ans	1000 ans
Huitrepin	42	Corrélation avec l'ajustement statistique de l'Aa à Fauquembergues	9	11	**12**	13	15	**15**	16	17	**18**
Dordonne	52		10	13	**15**	16	17	**18**	19	20	**21**
Course	146		24	31	**34**	37	40	**42**	44	46	**48**
Bras de Brosnne	44		9	12	**13**	14	15	**16**	17	18	**18**
Créquoise	80		15	19	**21**	23	25	**26**	27	28	**29**
Planquette	57		11	14	**16**	17	19	**20**	21	22	**22**
Canche amont	332		11	15	**18**	20	24	**53**	82	121	**150**
Ternoise à Hesdin	343	Ajustement statistique + Gradex	12	16	**18**	21	24	**54**	84	124	**154**
Canche à Brimeux	923		22	29	**34**	38	44	**90**	136	197	**242**

Tableau 6-2 : Débits caractéristiques de la Canche et de ses principaux affluents

Les hydrogrammes des crues de référence doivent reproduire ces débits maximaux pour les trois crues théoriques considérées.

b) *Construction des hydrogrammes d'entrée du modèle hydraulique*

Comme pour les crues de calage, les hydrogrammes d'apport au modèle hydraulique sont générés par un modèle pluie/débit (présenté à la partie 2) pour les trois crues de référence.

Toutes les simulations sont donc réalisées en régime transitoire.

Les crues théoriques simulées, à savoir les crues décennale, centennale et millénale, sont construites par accroissement de la pluie (i.e. hyétogrammes) de la crue historique de décembre 1999. Cette crue est retenue puisqu'elle présente aux stations d'Hesdin sur la Ternoise et de Brimeux sur la Canche des hydrogrammes simple pic ou double pic avec un pic prépondérant.

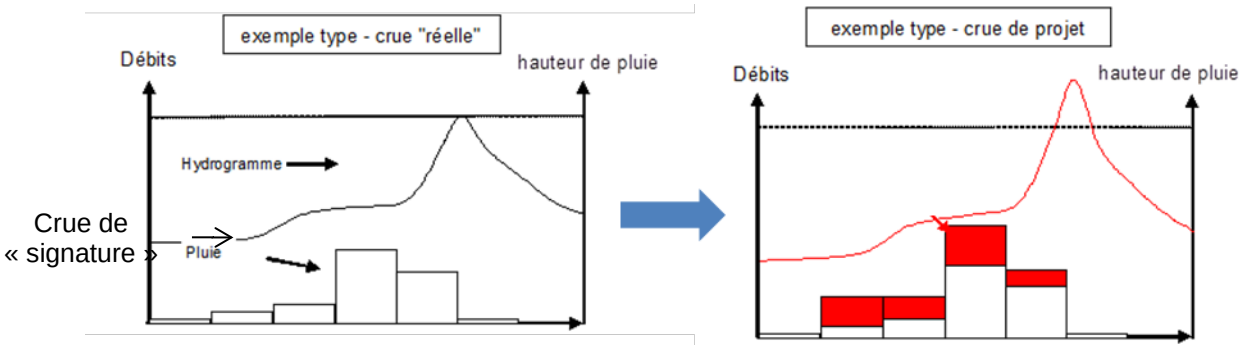


Figure 6-1 : Principe de génération des crues théoriques

Par conséquent, l'agencement temporel des affluents de la Canche avec la Canche pour les crues théoriques est similaire à ce qu'il s'est produit en décembre 1999.

Chaque scénario d'inondation est réalisé à l'aide des deux simulations distinctes :

- Simulation a : Aléa sur la Canche et ses affluents hormis la Ternoise,
- Simulation b : Aléa sur la Ternoise.

Chacune de ces deux simulations fait appel à des hydrogrammes d'apport distincts, car un jeu unique d'hydrogrammes ne peut pas générer une crue de même période de retour sur l'ensemble du linéaire d'étude.

Une attention particulière est portée à l'interface entre les deux simulations, afin d'homogénéiser la cartographie.

6.1.2 Configurations d'ouvrages possibles

La Canche est enserrée entre des digues depuis Montreuil-sur-Mer jusqu'à son estuaire dans la Manche. Pour les scénarios de référence il convient de définir si ces ouvrages doivent être pris en compte ou non.

Le guide méthodologique du PPRI préconise de ne pas considérer les ouvrages hydrauliques tandis que pour le PAPI, selon la Directive Inondation, il est possible de les prendre en compte si leur tenue est démontrée. Cette démonstration peut, par exemple, être menée au travers d'une Etude de Dangers. A ce jour, seules les digues de l'aéroport, de Billet, de Nempont et la Porte de la Grande Tringue font l'objet d'une Etude de Dangers, soit 5,1 km de digues sur les 70 km que compte la Basse-vallée. Cette étude montre que la probabilité de rupture de ces ouvrages est non négligeable puisque pour une crue décennale elle est comprise entre 0,1 et 1 selon les sites. Ainsi, à la vue de la Directive Inondation, dans la démarche PAPI, il ne faut pas prendre en compte les digues de la Basse-vallée pour aucune des trois crues de référence.

Ne pas considérer les digues de la Basse-vallée peut s'entendre de deux façons :

- Soit l'ensemble des ouvrages sont effacés (scénarios S2, S4 et S5),
  Dans ce cas, toutes les digues de premier rang ainsi que les ouvrages de second rang les plus importants sont effacés. Les remblais de la voie ferrée Berck-Etaples et de l'autoroute A16 ne sont pas, de par leur conception, considérés comme des digues. Ces ouvrages ne sont donc pas retirés du modèle pour les simulations.
- Soit les ouvrages sont présents mais subissent une défaillance pendant la crue (rupture).

Dans ce cas, une brèche apparait au cours de la crue. Les caractéristiques de la brèche sont reprises de l'Etude de Dangers des digues de la Basse-vallée du CCMTO et de l'étude de submersion marine de DHI. Il s'agit de rupture de digues sur cent mètres de long, de la cote de crête jusqu'au terrain naturel. L'ouverture de la brèche dure 15 minutes. Celle-ci apparait une heure avant le pic de crue. Cela permet d'avoir un volume transitant par la

brèche plus conséquent qu'une rupture au pic de crue où la décrue peut limiter l'étendue de l'inondation dans la zone arrière, tout en ayant des vitesses d'écoulement élevées du fait de l'importante hauteur d'eau devant la digue au moment de la rupture.

La position et la pertinence de la brèche sera analysée sur la base des résultats des scénarios avec et sans les digues.

6.1.3 Niveau marin

Pour les trois scénarios de référence, la condition limite aval considérée est la marée associée à un coefficient de 70. Au Touquet, cela correspond à une cote marine de 8,75 CM soit 4,3 mNGF.

Pour chaque crue de référence, le marégramme aval correspond à celui de la crue de décembre 1999 modulé en amplitude et décalé dans le temps pour que le niveau de mer le plus haut ait lieu au moment du pic de crue à Attin.

6.2 Simulation des scénarios de référence

6.2.1 Crues de référence avec ouvrages (scénarios S1 et S3)

Les scénarios S1 et S3 consistent à simuler les crues décennale et centennale avec la configuration actuelle du bassin versant de la Canche. Les digues de la Basse-vallée sont présentes et supposées tenir en crue.

Les résultats de ces scénarios sont présentés dans les atlas cartographiques du LCOM 14 et dans le paragraphe suivant.

6.2.2 Crues de référence sans les ouvrages (scénarios S2, S4 et S5)

Pour les crues décennale (scénario S2), centennale (scénario S4) et millénale (scénario S5) des simulations sont menées en effaçant les digues de la Basse-vallée.

L'analyse qui suit présente, pour les crues décennale et centennale, les différences de hauteurs d'eau maximales atteintes en moyenne et basse-vallée selon que les digues sont présentes ou effacées :

L'emprise inondée diffère entre les scénarios avec et sans digues.

- Pour la crue décennale :

En amont de Montreuil, les digues en aval créent un goulet qui canalise les eaux de la Canche en lit mineur. Cela induit un rehaussement de la ligne d'eau d'une vingtaine de centimètres à l'amont, donc à une zone inondée plus étendue avec les digues entre Marles-sur-Canche et Montreuil. En aval de Montreuil, l'effacement des digues entraine des débordements plus importants en rive gauche de la Canche. A l'inverse, en rive droite, les digues génèrent une zone inondée plus importante car l'eau surversant sur celles-ci se stocke dans les casiers hydrauliques et ne peut s'évacuer. Le cas du méandre du hameau de La Mollière à Brexent-Enocq est plus complexe. Dans ce méandre, les digues évitent le débordement de la crue décennale depuis l'amont, mais du fait d'un niveau d'eau 15 cm plus important dans la Canche dû à la présence des digues, l'inondation du méandre se fait depuis l'aval qui n'est pas protégé par des ouvrages.

- Pour la crue centennale :

L'effet goulet induit par les digues est du même ordre de grandeur que pour la crue décennale puisqu'en amont de Montreuil, l'écart entre les niveaux d'eau avec et sans les digues est aussi de 20 cm. Ce rehaussement ne se fait cependant pas ressentir en terme de surface inondée car la totalité du lit majeur est déjà mobilisé par la crue centennale quelle que soit la configuration des digues. En aval de Montreuil, les zones situées derrière les ouvrages les plus hauts, par exemple à l'intérieur du méandre du pont Noir à Brexent-Enocq, sont inondées si on ne considère pas les digues. Ces sur-inondations sont généralement situées en rive droite de la Canche. En revanche, en rive gauche, les digues empêchent l'eau qui a pénétré dans le lit majeur en amont de rejoindre le lit mineur de la Canche. Ainsi, la Basse-vallée fonctionne comme une zone de stockage dont la fermeture aval est assurée par la voie ferrée, dont les ouvrages de décharge n'assurent pas la transparence hydraulique pour la crue centennale. La hauteur d'eau est supérieure lorsqu'on considère la présence des digues sur les terrains en rive gauche à l'aval de l'autoroute A16. Entre Montreuil et l'autoroute A16, en rive gauche, les niveaux d'eau atteints (et donc les surfaces inondées) sont identiques pour les scénarios avec et sans digues.

6.2.3 Ruptures de digues

Un scénario de brèche sur une digue est pertinent si les niveaux d'eau atteints avec ce scénario sont supérieurs à ceux atteints avec les deux scénarios étudiés précédemment (c'est-à-dire avec les digues et sans aucune digue). Pour préfigurer de cette situation, il faut que les deux conditions suivantes soient réunies :

- La cote maximale atteinte dans le lit mineur de la Canche est supérieure en présence de digues par rapport à la configuration sans digues,
- La cote maximale atteinte à l'arrière de la digue est supérieure à la cote maximale en lit mineur au droit de l'ouvrage dans la configuration avec les digues.

Il s'avère que ces conditions sont remplies :

- en 1 site pour la crue centennale : en aval immédiat de Montreuil
- en 2 sites pour la crue décennale : en aval immédiat de Montreuil et entre l'autoroute et la voie ferrée. Que ce soit avec digue ou toutes digues effacées, les deux sites sont hydrauliquement déconnectés (car le 1er site est inondé et le second non), si bien que ces deux sites deux brèches sont pertinents à étudier pour cette crue.

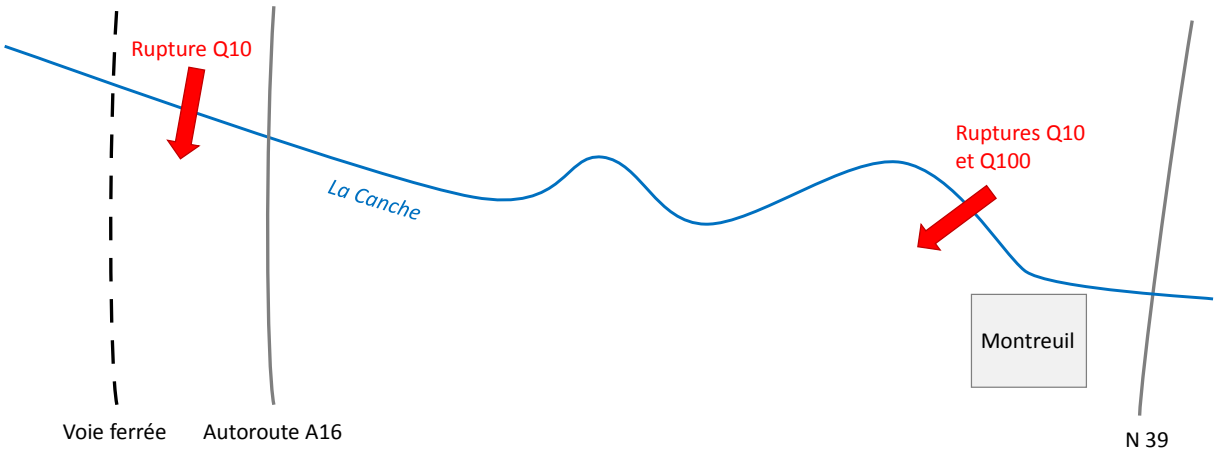


Figure 6-2 : Position des trois scénarios de brèche proposés

Ces trois scénarios de brèche seront donc étudiés successivement dans ce paragraphe.

- *Résultats à venir -*

6.3 Génération des cartes de hauteurs de submersion et vitesses d'écoulement et des cartes d'aléas

6.3.1 Hauteurs de submersion

La cartographie des classes de hauteurs de submersion est réalisée avec le programme CrgenG, développé par setec hydratec.

Ce programme produit des cartes d'inondation en exploitant directement les résultats d'une simulation hydraulique sous HYDRARIV, qui sont croisés avec le Modèle Numérique de Terrain. Dans la présente étude, le Modèle Numérique de Terrain est un LIDAR maillé au pas de 43 cm.

6.3.2 Vitesses

La cartographie des vitesses est réalisée à l'aide d'HydraRiv.

Dans les zones filaires, la vitesse représentée graphiquement est une vitesse moyenne pour le lit majeur rive gauche et une autre pour le lit majeur rive droite.

Dans les zones schématisées en 2D ou en ZUI, la vitesse d'écoulement est calculée et cartographiée dans chaque maille (pavé en 2D, rue en ZUI).

Dans tous les cas, les vitesses affichées sont les vitesses maximales observées lors des simulations (et non les vitesses d'écoulement observées au moment du maximum de hauteur d'eau).

6.3.3 Aléas

Comme pour les hauteurs de submersion, la cartographie des aléas est effectuée avec le programme CrgenG.

Le calcul de l'aléa est obtenu par croisement des résultats sur les hauteurs de submersion maximales et les vitesses horizontales d'écoulements maximales. Il ne s'agit donc pas d'une « image instantanée » correspondant aux conditions hydrauliques du pic de crue.

La grille d'analyse de l'aléa débordement de cours d'eau utilisée comporte 3 classes d'aléa (faible, moyen, fort et très fort) telles que définies dans le schéma ci-dessous :

	Vitesse d'écoulement			
Hauteur de submersion	v < 0,2 m/s	0,2 m/s < v < 0,5 m/s	0,5 m/s < v < 1 m/s	1 m/s <v
1.5 m < h	Très fort	Très fort	Très fort	Très fort
1 m < h < 1.50 m	Fort	Fort	Très fort	Très fort
50 cm < h < 1 m	Moyen	Moyen	Fort	Très fort
20 cm < h < 50 cm	Faible	Moyen	Fort	Très fort
h < 20 cm	Faible	Moyen	Fort	Très fort

Tableau 6-3 : Grille de classification de l'aléa en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement des eaux de crues

La carte d'aléa sera produite après validation des cartes de hauteurs et vitesses.

6.3.4 Représentation cartographique

L'atlas cartographique des hauteurs et vitesses maximales atteintes t sont produites à l'échelle 1 : 25 000 sur les 55 communes couvertes par la modélisation (liste donnée en annexe 7) avec pour fond de plan le SCAN25. Sur ces cartes figurent :

- Les cinq classes de champ de hauteurs (précédemment énoncées),
- Les quatre classes de champ des vitesses d'écoulement (précédemment énoncées),
- Les limites communales ainsi que le nom des communes,
- Les cours d'eau.

ANNEXE n°1

Atlas du modèle hydraulique de la Canche

ANNEXE n°2

Analyse cartographique sur les sous bassins versants élémentaires

Bassins versants du modèle pluie-débits

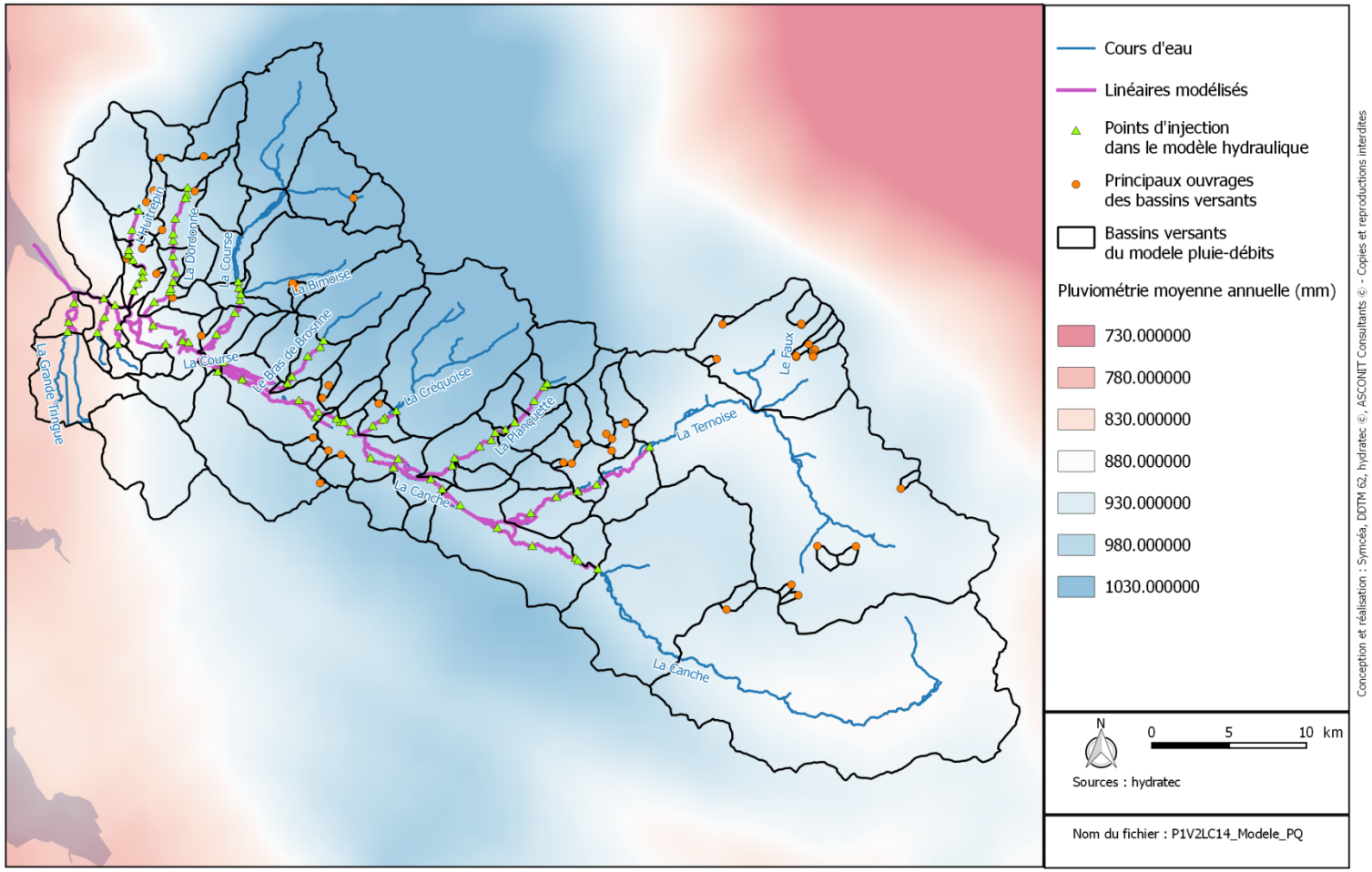
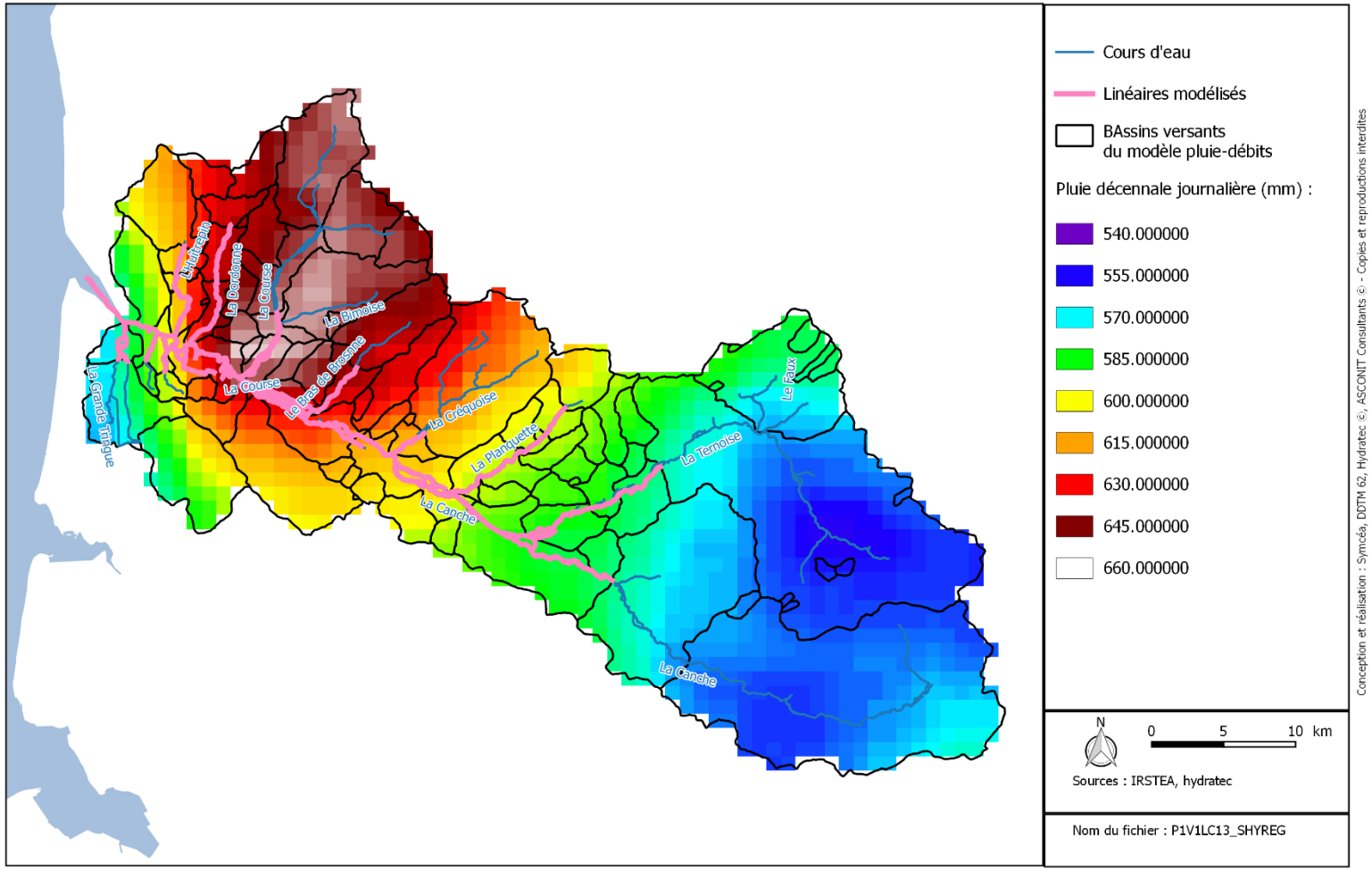


Figure 1 : Pluviométrie annuelle moyenne des bassins versants élémentaires

Pluviométrie journalière décennale selon la méthode SHYREG



Conception et réalisation : Symcéa, DDTM 62, Hydratec ©, ASCONIT Consultants © - Copies et reproductions interdites

Figure 2 : Pluviométrie journalière décennale selon SHYREG des bassins versants élémentaires

Pluviométrie journalière centennale selon la méthode SHYREG

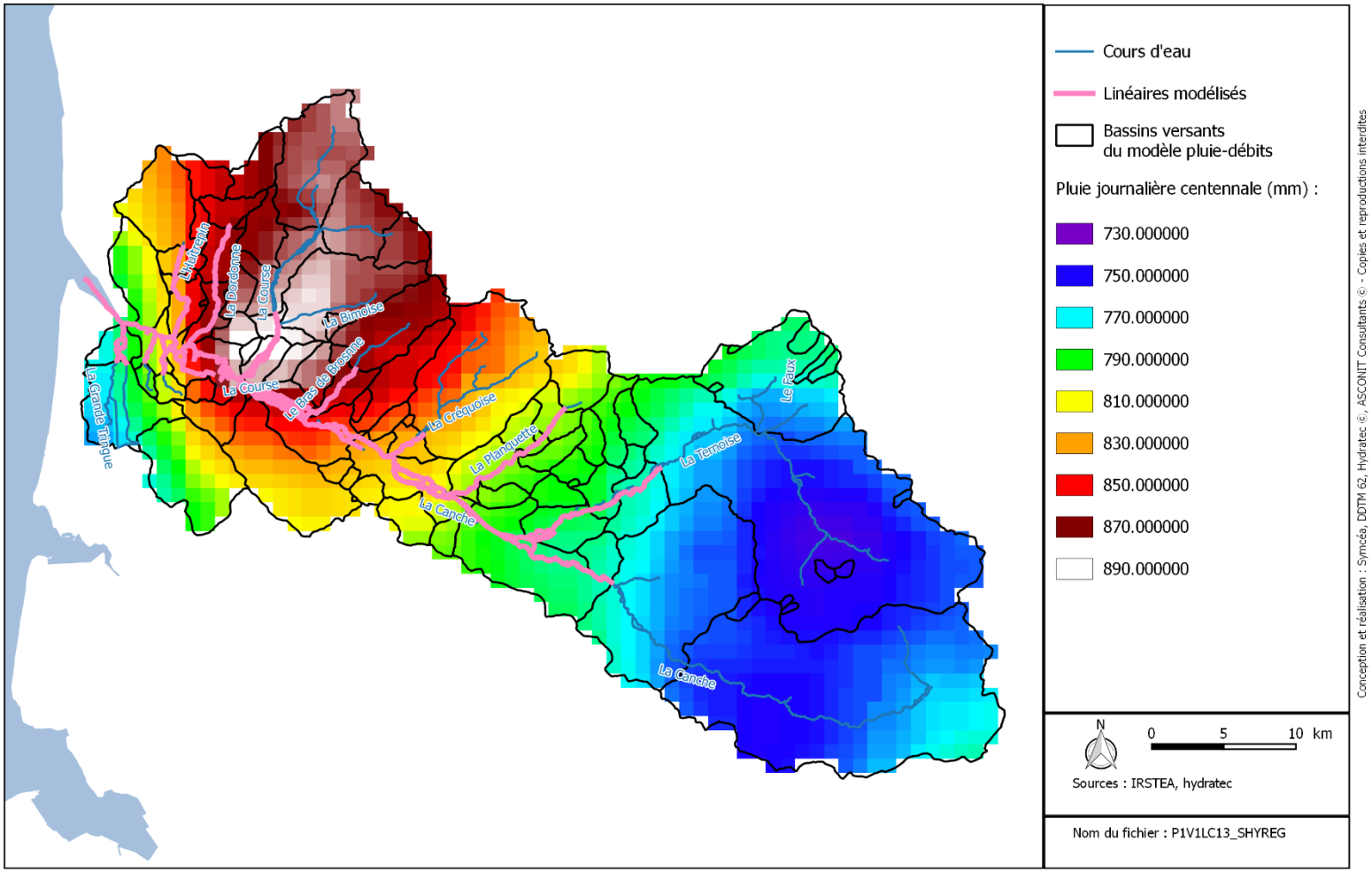


Figure 3 : Pluviométrie journalière centennale selon SHYREG des bassins versants élémentaires

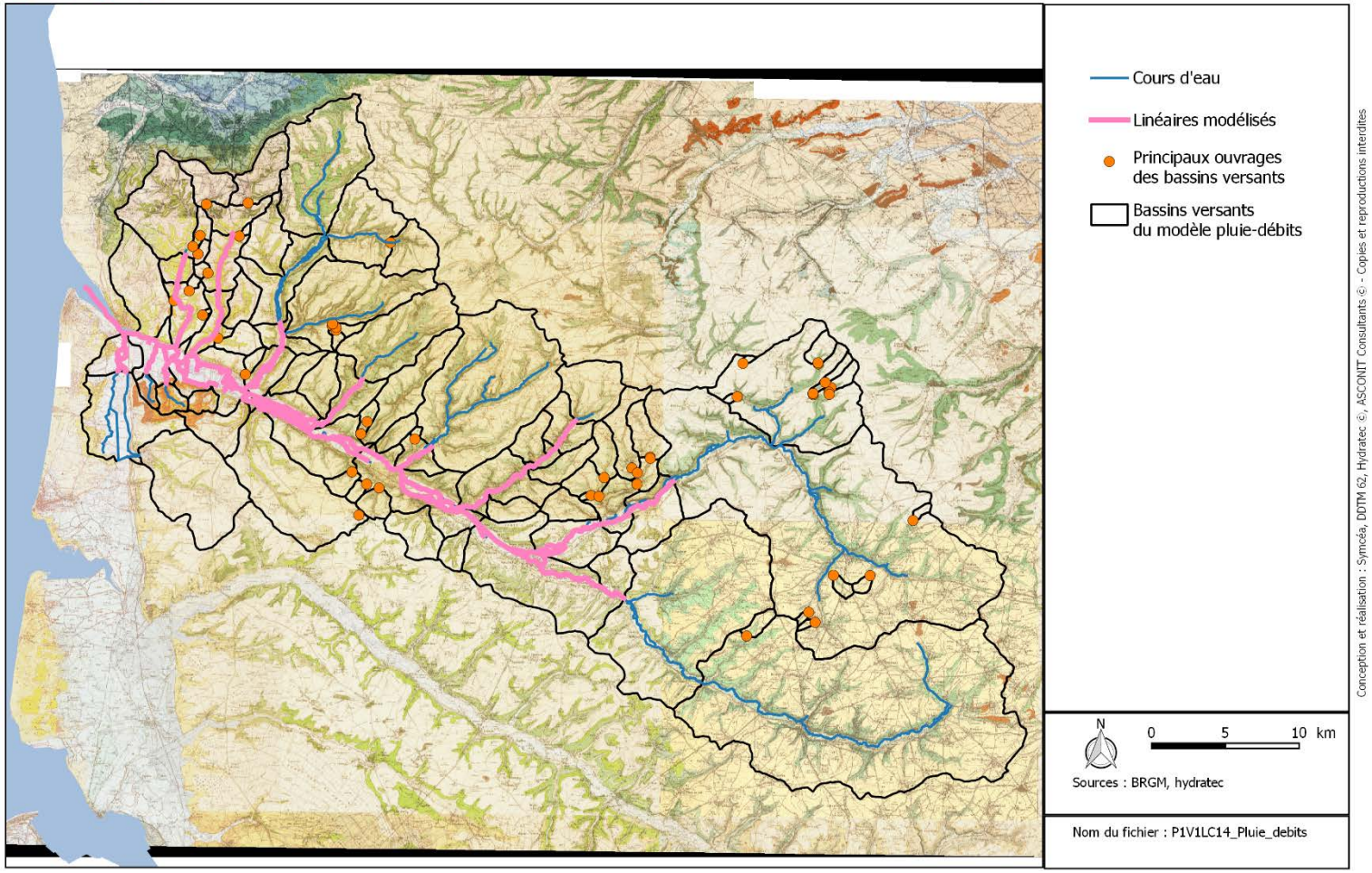


Figure 4 : Géologie des bassins versants élémentaires

Pentes sur le bassin versant de la Canche

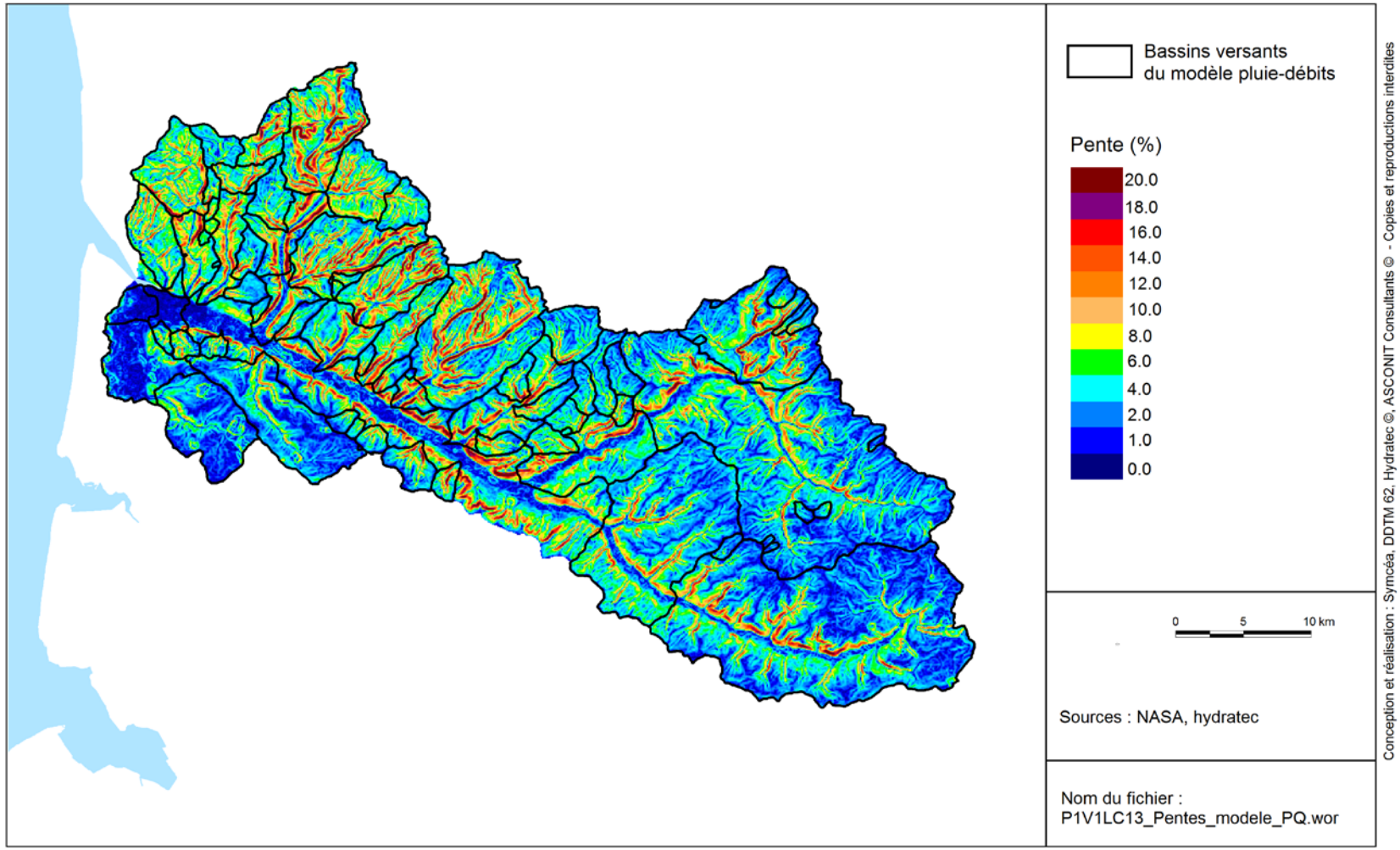


Figure 5 : Pentes des bassins versants élémentaires

ANNEXE n°3

Cartes des zones inondées modélisées au droit des ZIC – crue de décembre 1999

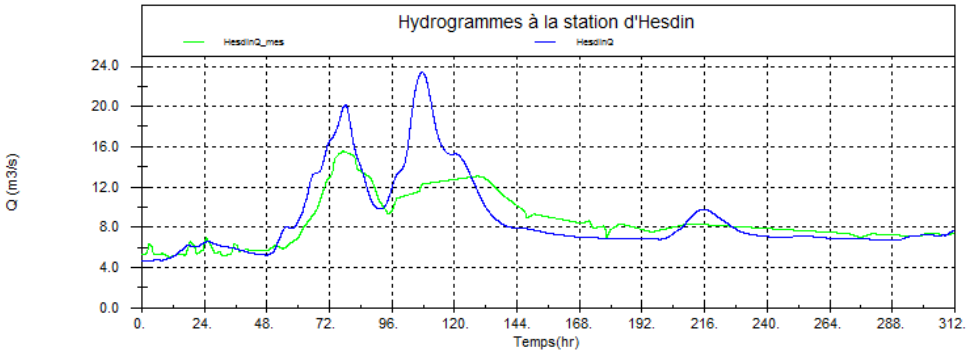
ANNEXE n°4

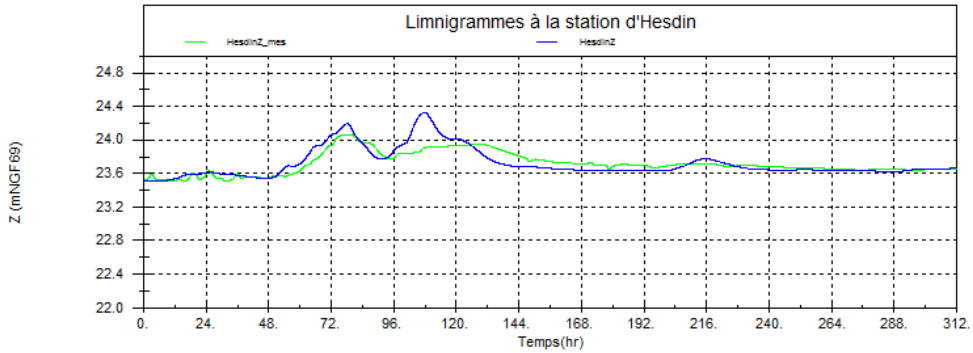
Test de sensibilité au coefficient de Strickler :

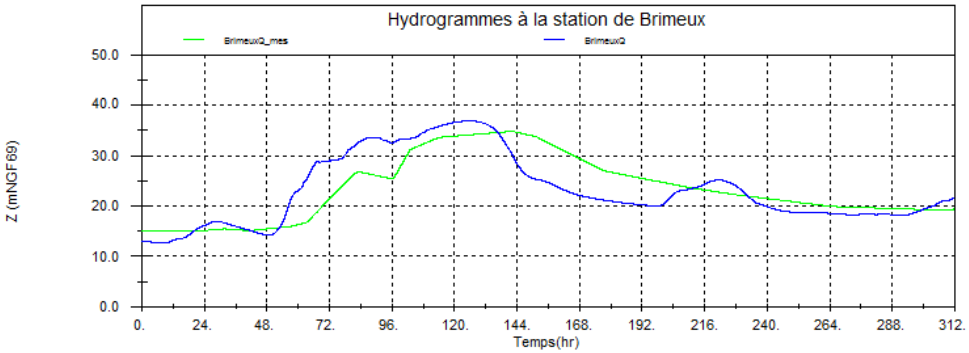
Limnigrammes et hydrogrammes aux stations d'Hesdin et de Brimeux et limnigramme à la station d'Attin

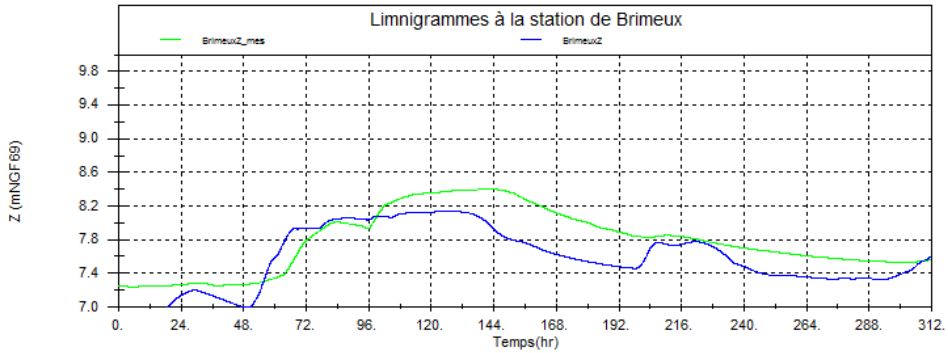
- **Augmentation de 20% du coefficient de Strickler**

D99



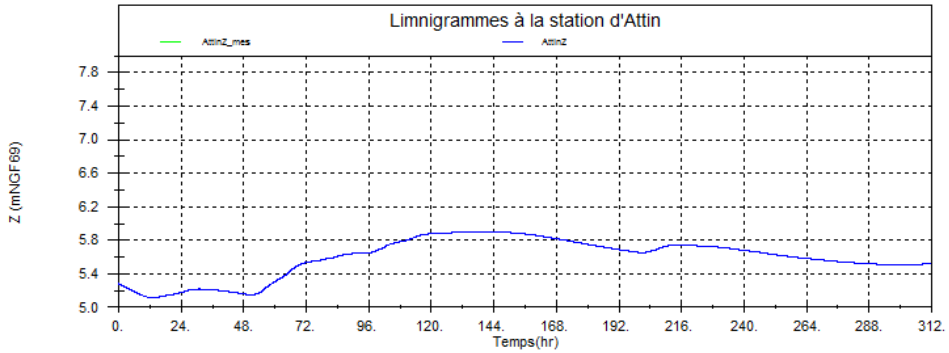




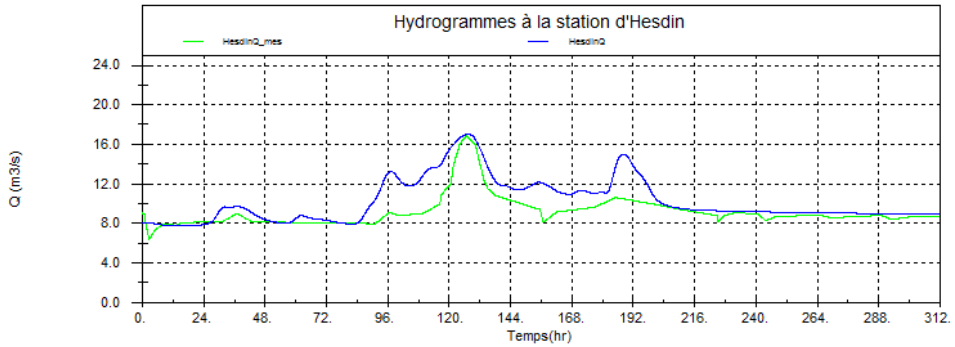


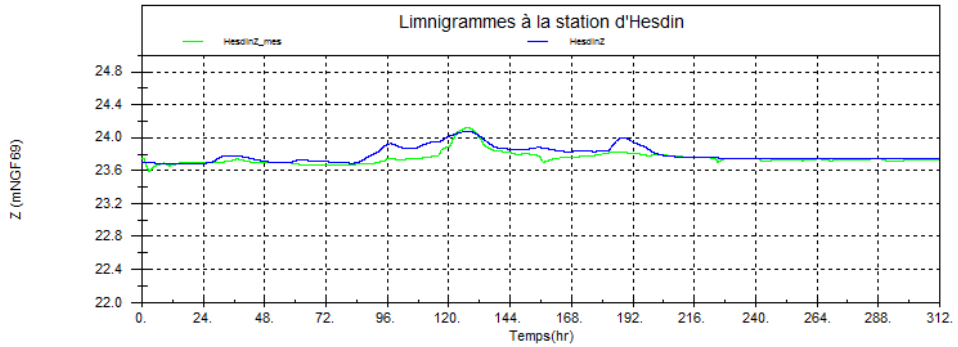
Valeurs affichées dans la Banque Hydro

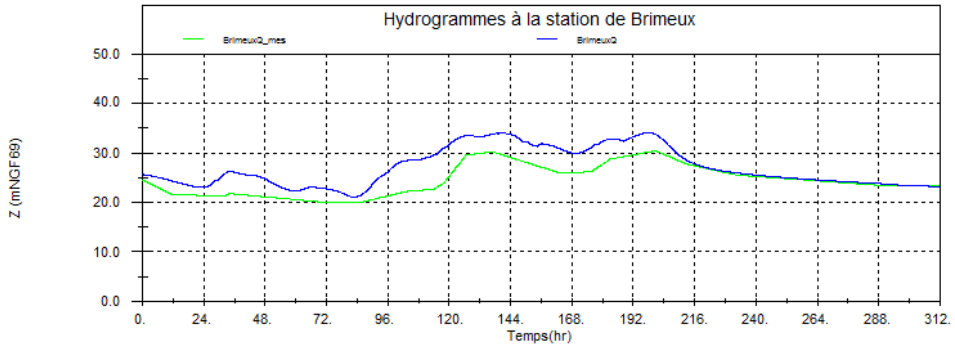
Valeurs calculées par la modélisation

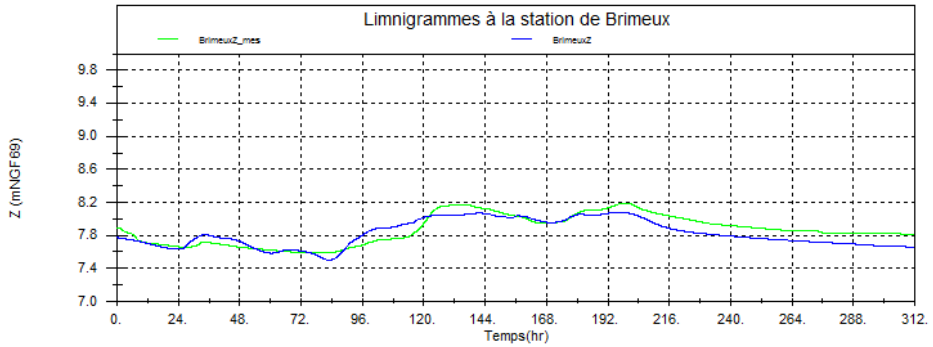


F02



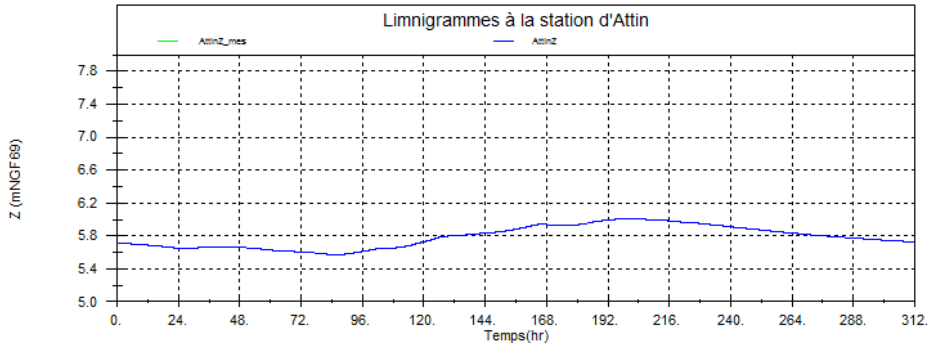




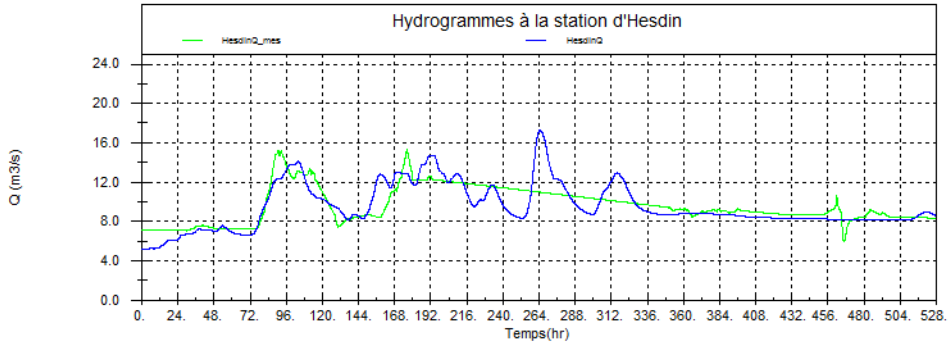


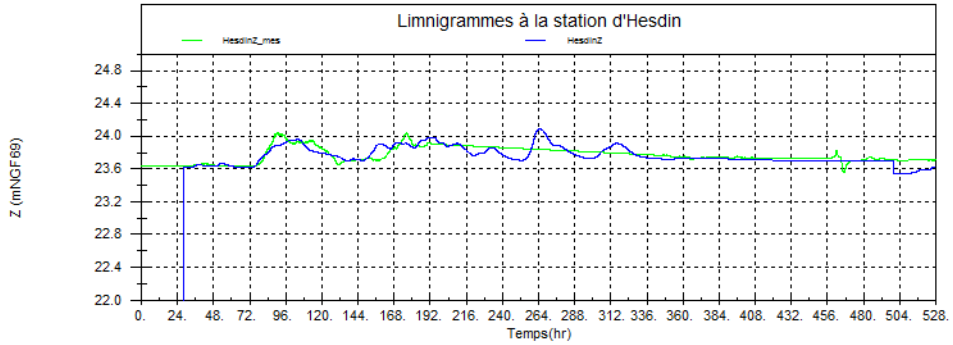
Valeurs affichées dans la Banque Hydro

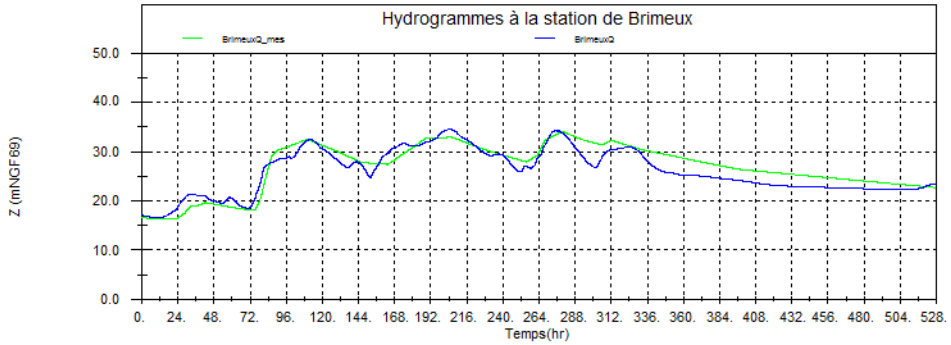
Valeurs calculées par la modélisation

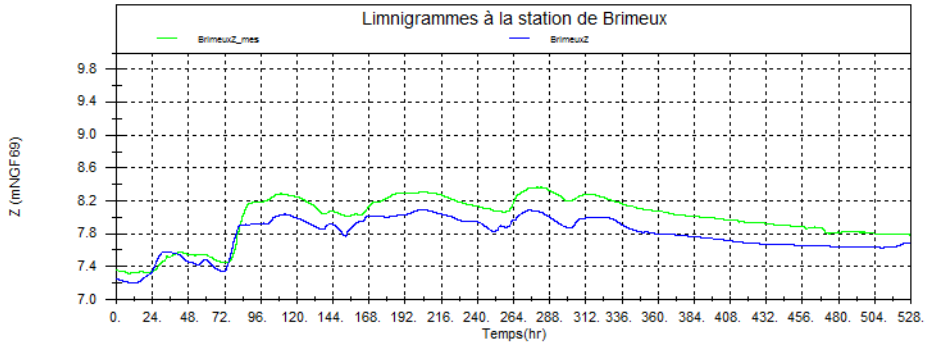


D12



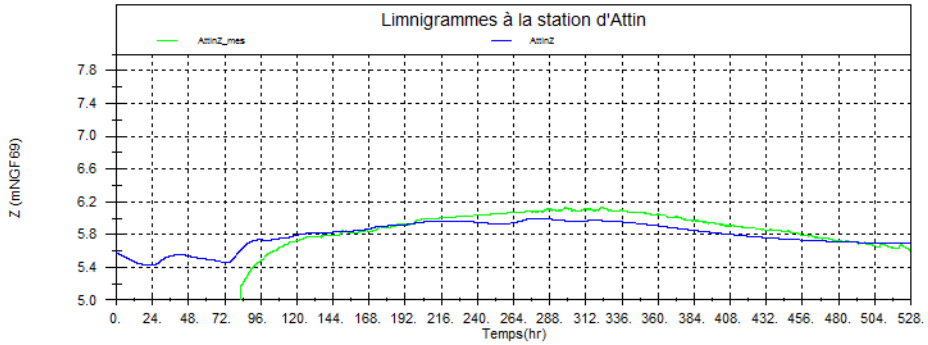






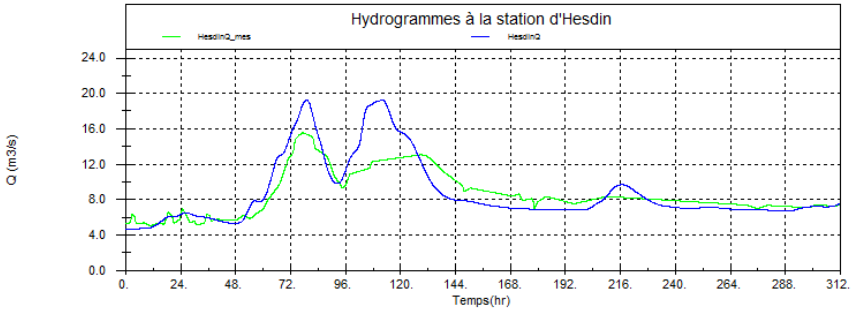
Valeurs affichées dans la Banque Hydro

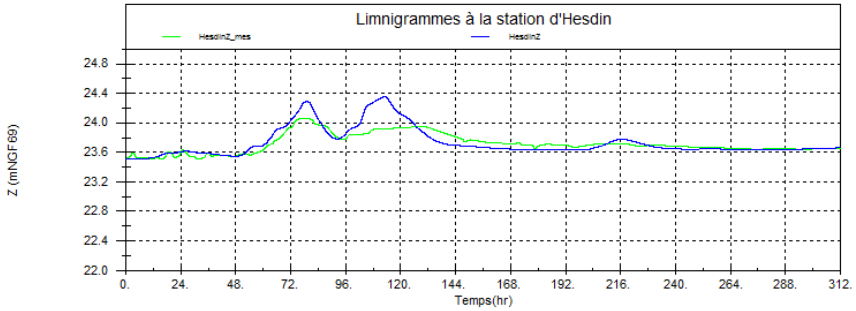
Valeurs calculées par la modélisation

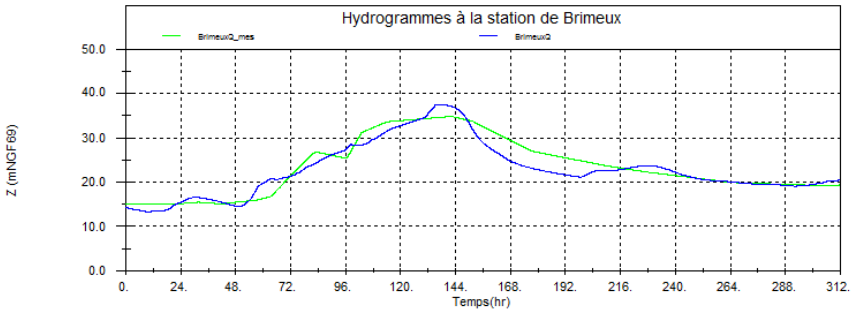


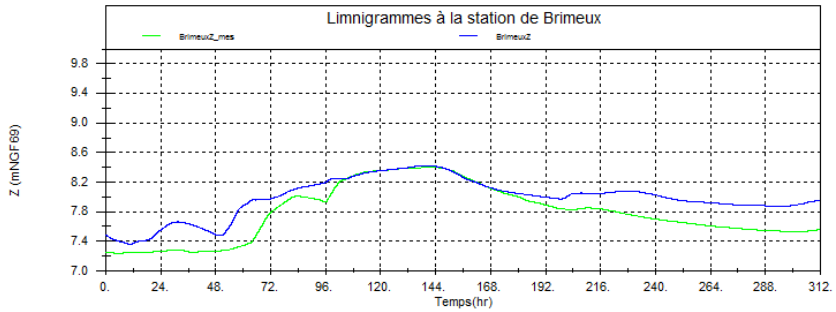
- **Diminution de 20% du coefficient de Strickler**

D99



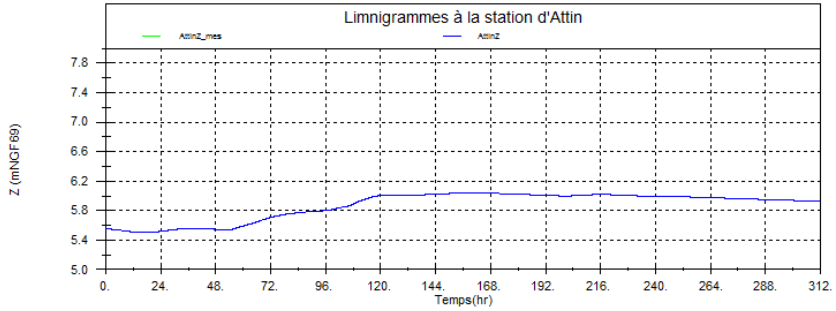




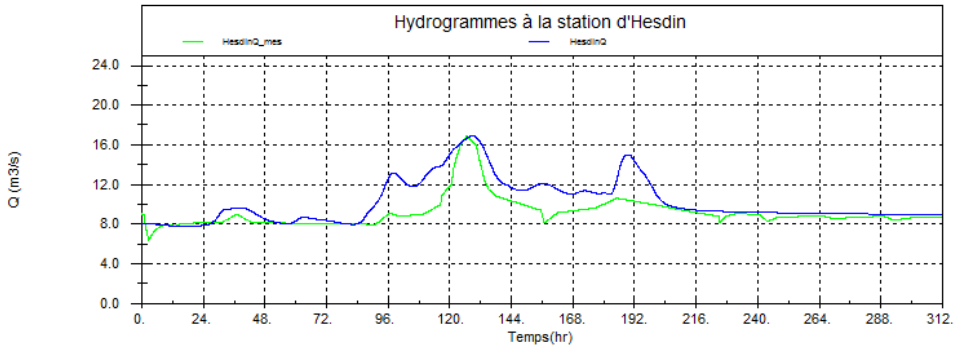


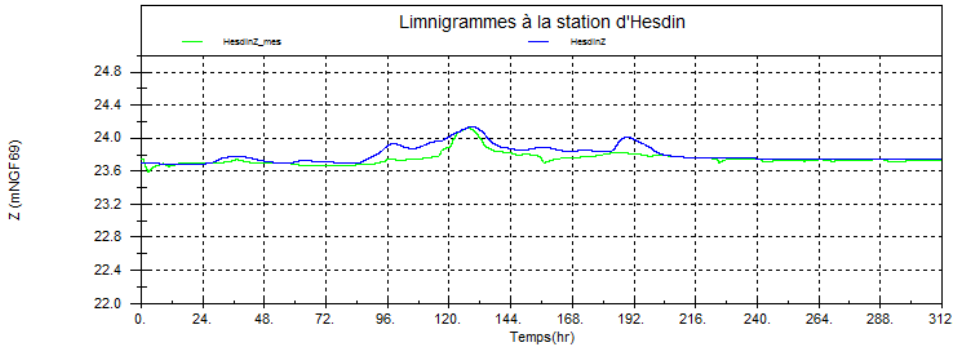
Valeurs affichées dans la Banque Hydro

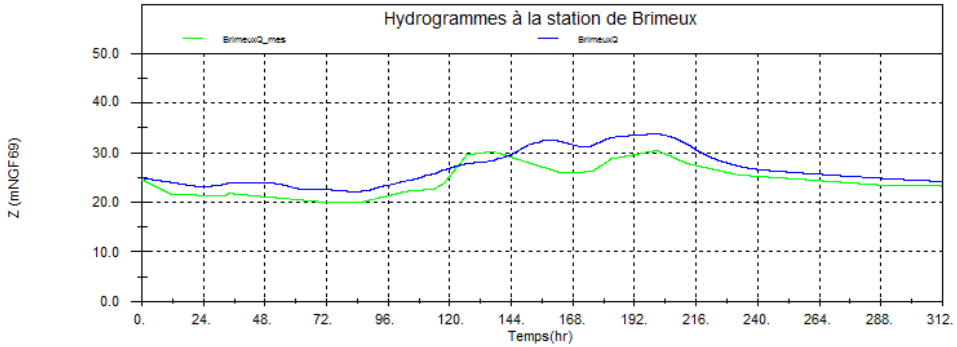
Valeurs calculées par la modélisation

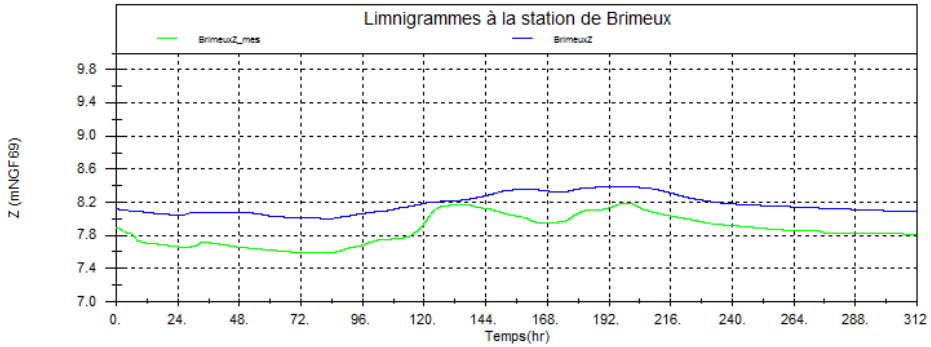


F02



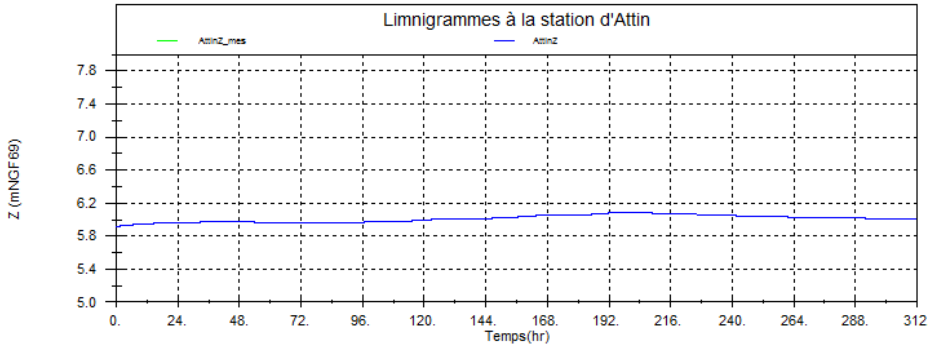




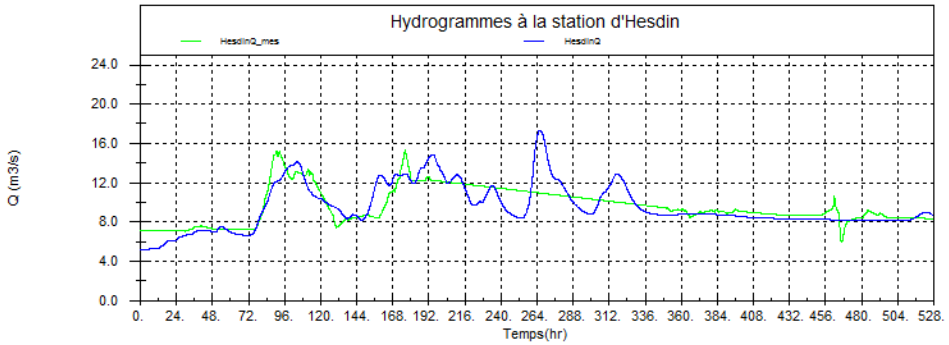


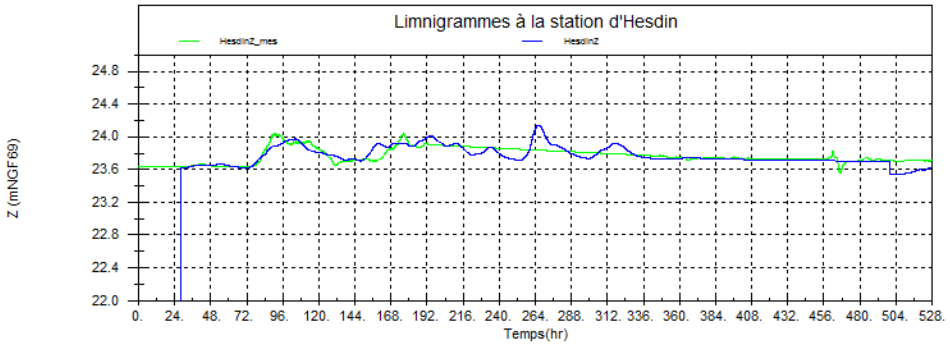
Valeurs affichées dans la Banque Hydro

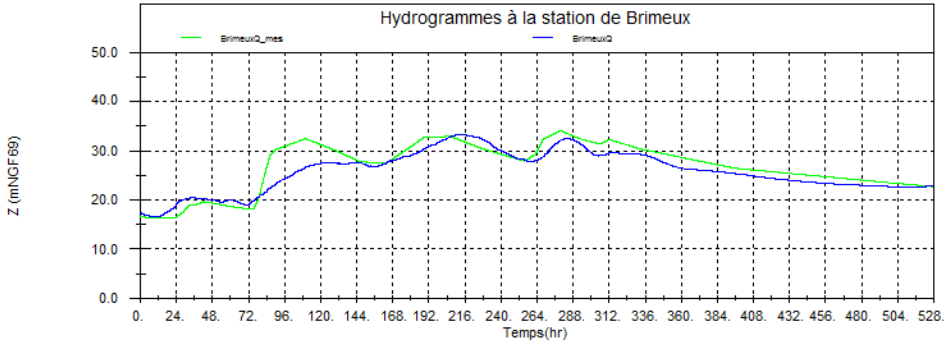
Valeurs calculées par la modélisation

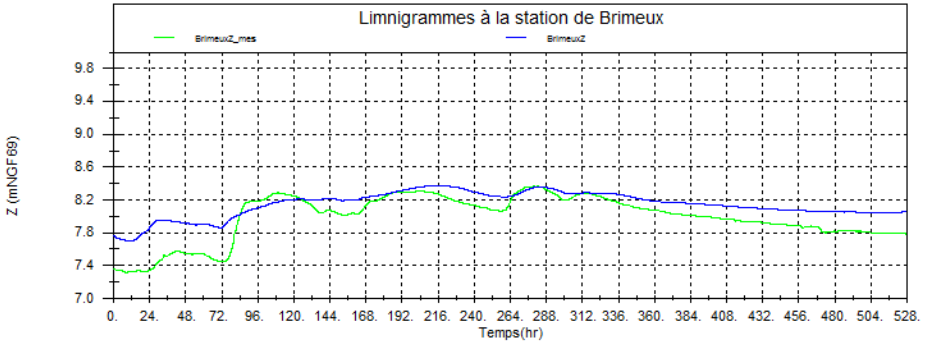


D12



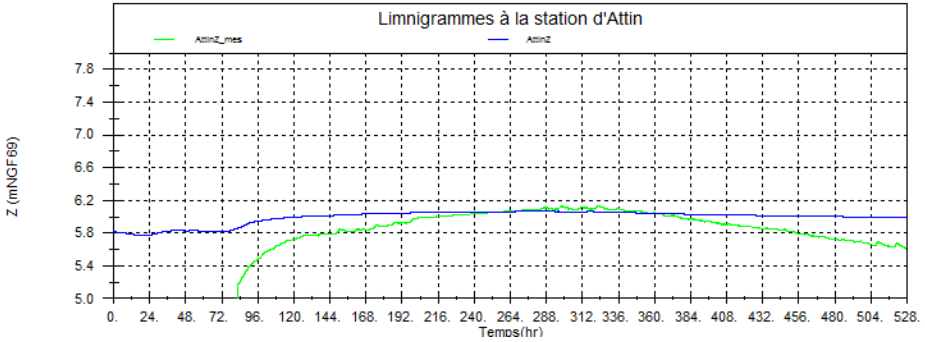






Valeurs affichées dans la Banque Hydro

Valeurs calculées par la modélisation



ANNEXE n°5

Courbes de tarages aux stations d'Hesdin sur la Ternoise et à Brimeux sur la Canche obtenues pour une pluie deux fois plus forte que celle de la crue de décembre 1999

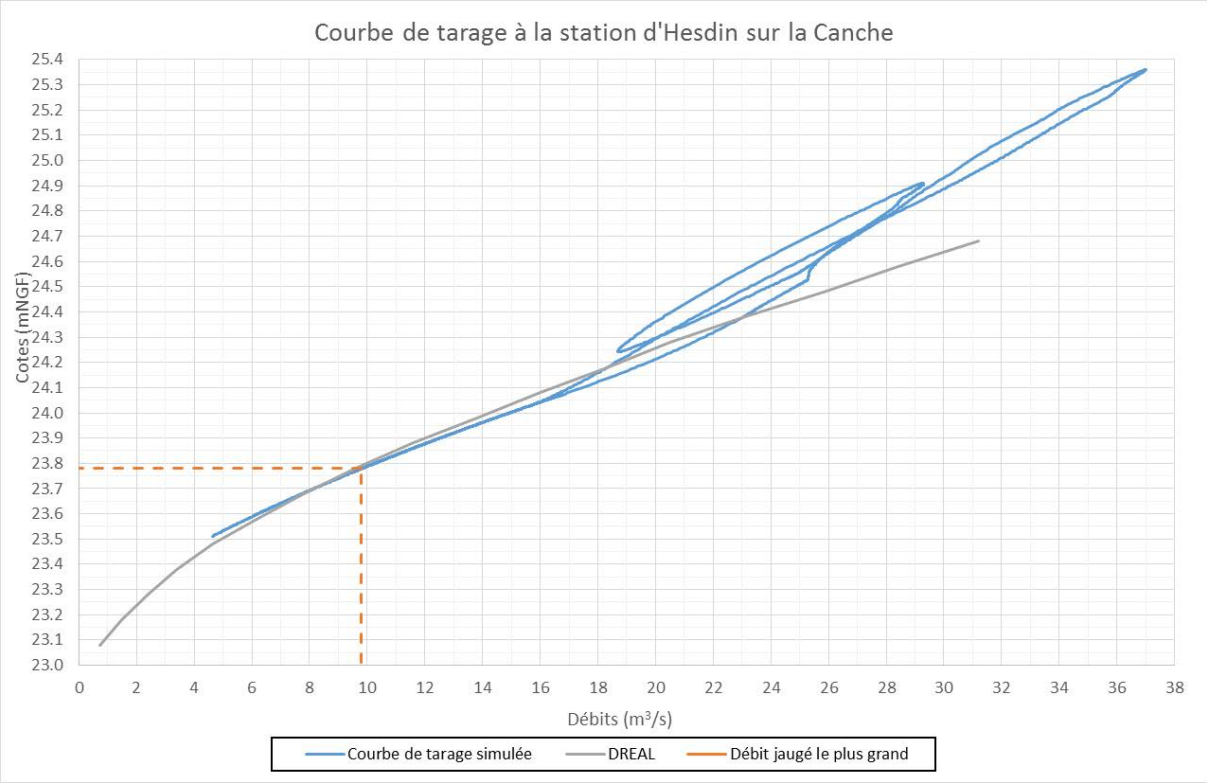


Figure 6 : Courbe de tarage de la Ternoise à Hesdin

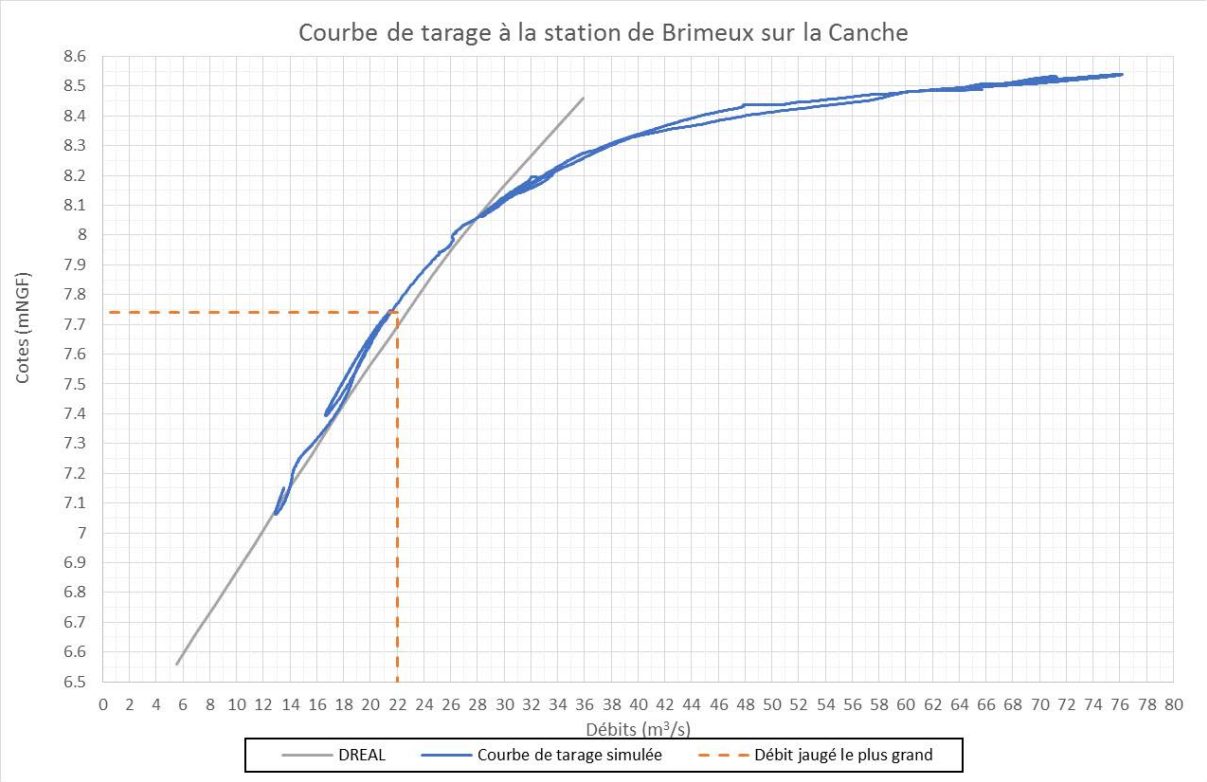


Figure 7 : Courbe de tarage de la Canche à Brimeux

ANNEXE n°6

Paramétrage retenu pour le calage du modèle hydrologique

Bassins versants du modèle pluie-débits

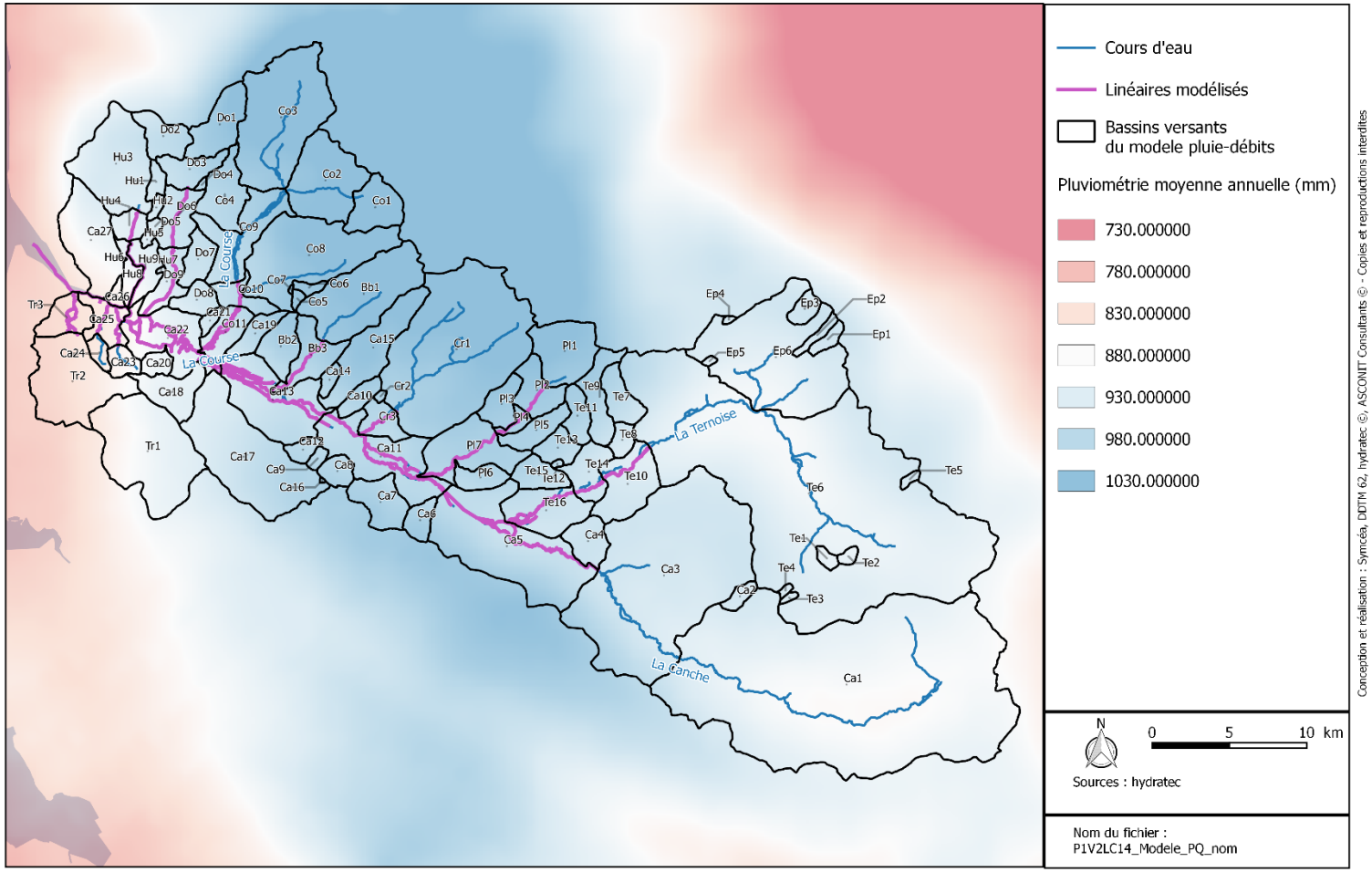


Figure 8 : Bassins versants élémentaires du modèle hydrologique

		Module SCS							Module RSVL			
Nom du bassin	**Surface BV**	**Surface**	**Jo**	**t ruissellement**	**t ressuyage**	**Perte nappe**	**Débit de base**	**RFU**	**Surface**	**RFU**	**t ressuyage**	**Débit de base**
	km²	*km²*	*mm*	*jours*	*jours*	*(mm)*	*m3/s*	*mm*	*km²*	*mm*	*jours*	*m3/s*
Co9	16.82	2.52	170	0.15	30	0	0.021	42	14.30	300	150	0.122
Co3	40.14	6.02	170	0.15	30	0	0.051	42	34.12	300	150	0.290
Co8	34.72	5.21	167	0.15	30	0	0.044	42	29.51	300	150	0.251
Hu8	3.39	0.51	164	0.02	30	0	0.004	41	2.88	300	150	0.024
Bb1	27.73	4.16	164	0.12	30	0	0.035	41	23.57	300	150	0.200
Do1	10.89	1.63	162	0.09	30	0	0.014	41	9.26	300	150	0.079
Pl6	4.66	0.70	162	0.05	30	0	0.006	39	3.96	300	150	0.034
Co2	21.13	3.17	159	0.12	30	0	0.027	39	17.96	300	150	0.153
Do3	6.59	0.99	159	0.06	30	0	0.008	39	5.60	300	150	0.048
Bb3	9.45	1.42	157	0.03	30	0	0.012	39	8.03	300	150	0.068
Pl3	5.81	0.87	154	0.07	30	0	0.007	38	4.94	300	150	0.042
Co4	10.54	1.58	154	0.1	30	0	0.013	38	8.96	300	150	0.076
Co1	9.63	1.44	154	0.07	30	0	0.012	38	8.19	300	150	0.070
Do2	7.3	1.10	154	0.08	30	0	0.009	38	6.21	300	150	0.053
Do6	8.6	1.29	154	0.02	30	0	0.011	38	7.31	300	150	0.062
Pl4	1.86	0.28	151	0.01	30	0	0.002	38	1.58	300	150	0.013
Hu4	3.83	0.57	151	0.05	30	0	0.005	38	3.26	300	150	0.028
Do9	6.91	1.04	149	0.02	30	0	0.009	36	5.87	300	150	0.050
Do7	5.65	0.85	149	0.07	30	0	0.007	36	4.80	300	150	0.041
Ca23	3.42	0.51	149	0.05	30	0	0.004	36	2.91	300	150	0.025
Hu6	0.03	0.00	146	0.01	30	0	0.000	36	0.03	300	150	0.000
Ca16	0.1	0.02	146	0.02	30	0	0.000	36	0.09	300	150	0.001
Co11	6.88	1.03	146	0.01	30	0	0.009	36	5.85	300	150	0.050
Co10	5.11	0.77	143	0.03	30	0	0.007	36	4.34	300	150	0.037
Ca26	1.39	0.21	143	0.03	30	0	0.002	36	1.18	300	150	0.010
Co6	1.33	0.20	143	0.03	30	0	0.002	36	1.13	300	150	0.010
Hu1	2.26	0.34	143	0.05	30	0	0.003	35	1.92	300	150	0.016
Hu3	25	3.75	138	0.13	30	0	0.032	35	21.25	300	150	0.181
Hu9	5.68	0.85	138	0.02	30	0	0.007	35	4.83	300	150	0.041
Bb2	7.58	1.14	136	0.08	30	0	0.010	33	6.44	300	150	0.055
Cr1	74.45	11.17	133	0.19	30	0	0.095	33	63.28	300	150	0.538
Cr3	5.47	0.82	133	0.02	30	0	0.007	33	4.65	300	150	0.040
Ca19	4.69	0.70	133	0.07	30	0	0.006	33	3.99	300	150	0.034
Co5	0.79	0.12	133	0.02	30	0	0.001	33	0.67	300	150	0.006
Do5	0.89	0.13	133	0.02	30	0	0.001	33	0.76	300	150	0.006
Te16	13.63	2.04	130	0.03	30	0	0.017	32	11.59	300	150	0.098
Ca5	44.84	6.73	128	0.04	30	0	0.057	32	38.11	300	150	0.324
Ca21	1.45	0.22	128	0.04	30	0	0.002	32	1.23	300	150	0.010
Do8	4.63	0.69	128	0.06	30	0	0.006	32	3.94	300	150	0.033
Hu5	0.66	0.10	128	0.02	30	0	0.001	32	0.56	300	150	0.005
Hu2	1.08	0.16	128	0.02	30	0	0.001	32	0.92	300	150	0.008
Pl7	16.51	2.48	128	0.03	30	0	0.021	32	14.03	300	150	0.119
Ca20	2.76	0.41	128	0.05	30	0	0.004	32	2.35	300	150	0.020
Ca6	3.95	0.59	128	0.05	30	0	0.005	32	3.36	300	150	0.029
Do4	0.42	0.06	125	0.02	30	0	0.001	32	0.36	300	150	0.003
Ca4	6.73	1.01	125	0.06	30	0	0.009	32	5.72	300	150	0.049

		Module SCS							Module RSVL			
Nom du bassin	**Surface BV**	**Surface**	**Jo**	**t ruissellement**	**t ressuyage**	**Perte nappe**	**Débit de base**	**RFU**	**Surface**	**RFU**	**t ressuyage**	**Débit de base**
	km²	*km²*	*mm*	*jours*	*jours*	*(mm)*	*m3/s*	*mm*	*km²*	*mm*	*jours*	*m3/s*
Ep2	1.89	0.28	125	0.05	30	0	0.002	30	1.61	300	150	0.014
Te15	5.78	0.87	125	0.07	30	0	0.007	30	4.91	300	150	0.042
Pl1	14.5	2.18	125	0.12	30	0	0.018	30	12.33	300	150	0.105
Ca27	19.23	2.88	125	0.15	30	0	0.025	30	16.35	300	150	0.139
Ca11	23.96	3.59	123	0.02	30	0	0.031	30	20.37	300	150	0.173
Co7	0.13	0.02	123	0.01	30	0	0.000	30	0.11	300	150	0.001
Hu7	0.18	0.03	123	0.01	30	0	0.000	30	0.15	300	150	0.001
Te8	2.86	0.43	123	0.05	30	0	0.004	30	2.43	300	150	0.021
Te14	7.98	1.20	123	0.09	30	0	0.010	30	6.78	300	150	0.058
Ep6	52.08	7.81	123	0.15	30	0	0.066	30	44.27	300	150	0.376
Te10	14.41	2.16	123	0.04	30	0	0.018	30	12.25	300	150	0.104
Te7	6.51	0.98	123	0.1	30	0	0.008	30	5.53	300	150	0.047
Pl2	8	1.20	123	0.04	30	0	0.010	30	6.80	300	150	0.058
Ep1	2.14	0.32	123	0.05	30	0	0.003	30	1.82	300	150	0.015
Te9	8.59	1.29	120	0.13	30	0	0.011	30	7.30	300	150	0.062
Te6	210.48	31.57	120	0.39	30	0	0.268	30	178.91	300	150	1.521
Ca15	17.13	2.57	120	0.13	30	0	0.022	30	14.56	300	150	0.124
Ca24	2.22	0.33	120	0.06	30	0	0.003	30	1.89	300	150	0.016
Ca1	204.88	30.73	117	0.33	30	0	0.261	29	174.15	300	150	1.480
Ca13	24.37	3.66	117	0.04	30	0	0.031	29	20.71	300	150	0.176
Ca10	3.6	0.54	117	0.06	30	0	0.005	29	3.06	300	150	0.026
Ca3	100.24	15.04	117	0.24	30	0	0.128	29	85.20	300	150	0.724
Te11	5.02	0.75	117	0.08	30	0	0.006	29	4.27	300	150	0.036
Ca8	3.69	0.55	117	0.04	30	0	0.005	29	3.14	300	150	0.027
Ca18	9.18	1.38	117	0.13	30	0	0.012	29	7.80	300	150	0.066
Pl5	6.11	0.92	117	0.09	30	0	0.008	29	5.19	300	150	0.044
Tr1	36.35	5.45	117	0.2	30	0	0.046	29	30.90	300	150	0.263
Ca7	9.08	1.36	115	0.08	30	0	0.012	29	7.72	300	150	0.066
Ep3	2.97	0.45	115	0.05	30	0	0.004	29	2.52	300	150	0.021
Ca2	2.23	0.33	115	0.06	30	0	0.003	29	1.90	300	150	0.016
Te1	1.38	0.21	112	0.04	30	0	0.002	29	1.17	300	150	0.010
Ca12	2.54	0.38	112	0.05	30	0	0.003	29	2.16	300	150	0.018
Ca14	1.86	0.28	112	0.04	30	0	0.002	29	1.58	300	150	0.013
Te13	4.7	0.71	112	0.05	30	0	0.006	27	4.00	300	150	0.034
Ca17	40.03	6.00	110	0.22	30	0	0.051	27	34.03	300	150	0.289
Ca22	17.24	2.59	107	0.02	30	0	0.022	27	14.65	300	150	0.125
Te5	0.81	0.12	107	0.04	30	0	0.001	27	0.69	300	150	0.006
Ca9	1.29	0.19	104	0.03	30	0	0.002	26	1.10	300	150	0.009
Te2	1.1	0.17	104	0.03	30	0	0.001	26	0.94	300	150	0.008
Te12	0.33	0.05	104	0.01	30	0	0.000	26	0.28	300	150	0.002
Ep5	0.42	0.06	104	0.02	30	0	0.001	26	0.36	300	150	0.003
Cr2	0.44	0.07	104	0.02	30	0	0.001	26	0.37	300	150	0.003
Te4	0.5	0.08	102	0.03	30	0	0.001	26	0.43	300	150	0.004
Te3	0.51	0.08	102	0.03	30	0	0.001	26	0.43	300	150	0.004
Ep4	0.34	0.05	102	0.02	30	0	0.000	26	0.29	300	150	0.002
Ca25	6.5	0.98	99	0.13	30	0	0.008	24	5.53	300	150	0.047
Tr3	7	1.05	89	0.23	30	0	0.009	23	5.95	300	150	0.051
Tr2	25.93	3.89	83	0.3	30	0	0.033	21	22.04	300	150	0.187

Tableau 1 : Paramétrage retenu pour le calage du modèle hydrologique

ANNEXE n°7

Liste des communes couvertes par la modélisation

Nom	Code INSEE	Population	Cours d'eau
AIX-EN-ISSART	62018	200	Le Bras de Brosnne
ATTIN	62044	700	La Course
AUBIN-SAINT-VAAST	62046	800	La Canche
AUCHY-LES-HESDIN	62050	1 800	La Ternoise
BEAUMERIE-SAINT-MARTIN	62094	300	Le Bras de Brosnne
BEAURAINVILLE	62100	2 000	La Canche
BEUTIN	62124	400	La Canche
BLANGY-SUR-TERNOISE	62138	800	La Ternoise
BLINGEL	62142	100	Le Pinchon
BREXENT-ENOCQ	62176	600	La Canche
BRIMEUX	62177	700	La Canche
LA CALOTTERIE	62196	600	La Canche
CAVRON-SAINT-MARTIN	62220	400	La Planquette
CONTES	62236	300	La Canche
CORMONT	62241	300	La Dordonne
ESTREE	62312	300	La Course
ESTREELLES	62315	300	La Course
ETAPLES	62318	11 200	La Canche
FRENCQ	62354	700	L'Huitrepin
FRESSIN	62359	600	La Planquette
GRIGNY	62388	300	La Ternoise
GUISY	62398	300	La Canche
HESDIN	62447	2 700	La Canche
HUBY-SAINT-LEU	62461	1 000	La Ternoise
LESPINOY	62501	200	La Canche
LOISON-SUR-CREQUOISE	62522	200	La Créquoise
LONGVILLIERS	62527	300	La Dordonne
LA MADELAINE-SOUS-MONTREUIL	62535	200	La Canche
MARANT	62547	100	Le Bras de Brosnne
MARCONNE	62549	1 200	La Canche
MARCONNELLE	62550	1 300	La Ternoise
MARENLA	62551	200	La Canche
MARESQUEL-ECQUEMICOURT	62552	800	La Canche
MARESVILLE	62554	100	La Dordonne
MARLES-SUR-CANCHE	62556	300	Le Bras de Brosnne
MONTCAVREL	62585	300	La Course
MONTREUIL	62588	2 400	La Canche
NEUVILLE-SOUS-MONTREUIL	62610	700	La Canche
OFFIN	62635	200	La Créquoise
LE PARCQ	62647	700	La Ternoise
PLANQUES	62659	100	La Planquette
BOUIN-PLUMOISON	62661	500	La Canche
RECQUES-SUR-COURSE	62698	300	La Course
ROLLANCOURT	62719	300	La Ternoise
SAINTE-AUSTREBERTHE	62743	400	La Canche
SAINT-JOSSE	62752	1 100	L'Huitrepin
SEMPY	62787	200	Le Bras de Brosnne
TUBERSENT	62832	500	L'Huitrepin
VIEIL-HESDIN	62850	400	La Canche
WAIL	62868	300	La Canche
WAMBERCOURT	62871	200	La Planquette
SAINT-GEORGES	62749	300	La Canche
WAIL	62868	300	La Canche
WAMBERCOURT	62871	200	La Planquette
SAINT-GEORGES	62749	300	La Canche

Tableau 2 : Liste des communes traversées par un cours d'eau modélisé