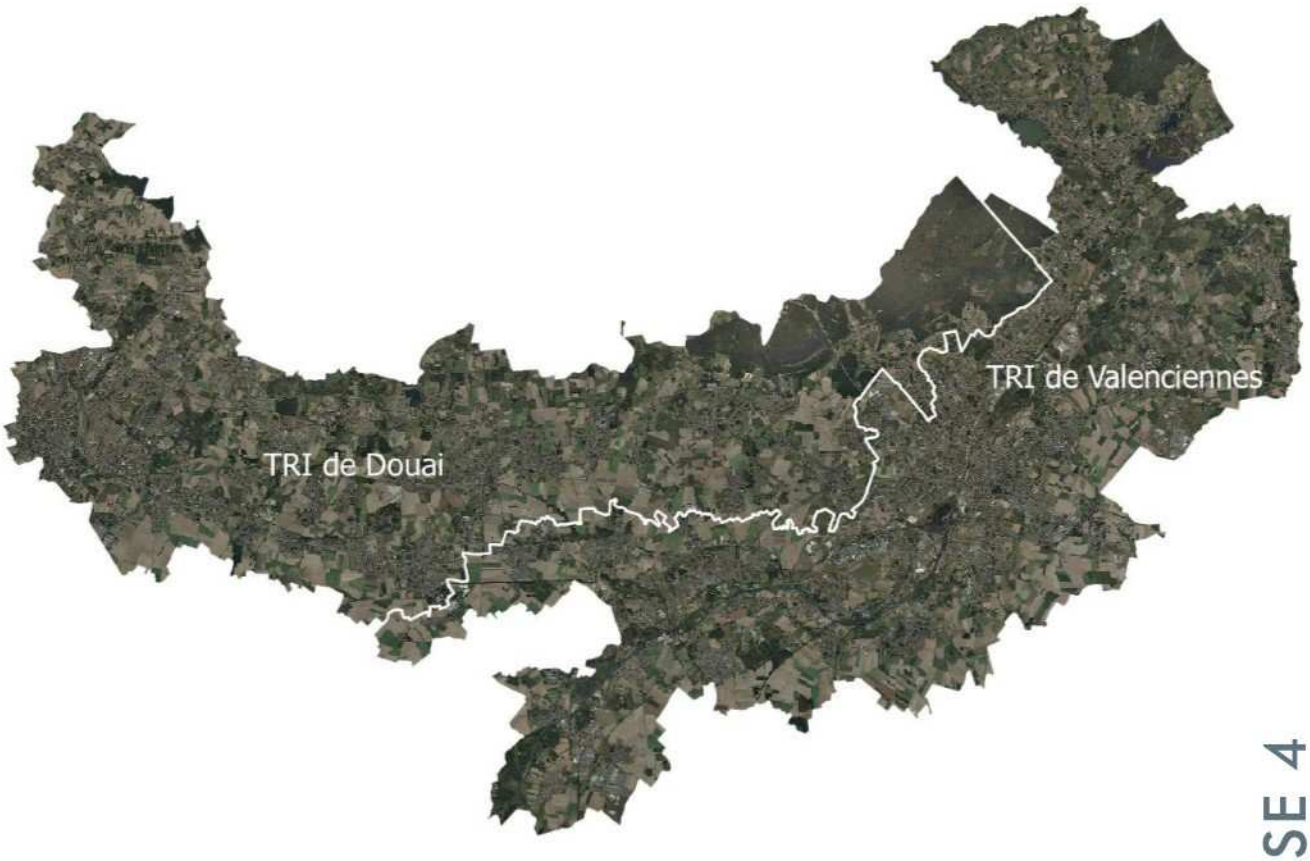
DREAL Nord Pas de Calais

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère de l'Écologie, du
Développement Durable, et de l'Énergie

TRI de Valenciennes et Douai



PHASE 4

Cartographie des zones inondables

Modélisation simplifiée

Affaire n° 13-378-01			
Version	Date	Rédigé par	Validé par
0	18/12/2013	B. CHANUT	A. KOCH
0.1	17/03/2014	B. CHANUT	A. KOCH
Remarques :			

PROLOG INGENIERIE

Table des matières

1 -Contexte et objectifs de l'étude....8

1.1Contexte réglementaire....8
1.2Les objectifs....8
1.3Contenu du rapport....8
1.4Synthèse-conclusions....9

2 -Hypothèses de travail et données de base....11

2.1Secteurs modélisés....11
2.2Données disponibles....13
2.2.1Données topographiques....13
2.2.2Données bathymétriques....14
2.2.3Données d'ouvrages....16
2.2.3.1Les écluses....16
2.2.3.2Autres ouvrages....16
2.2.4Données hydrologiques....20
2.2.4.1La méthode hydrologique employée....20
2.2.4.2Les configurations hydrologiques analysées par DHE....20

3 -Modélisation hydraulique simplifiée....22

3.1Méthode de modélisation....22
3.1.1Lit mineur – modélisation 1D....22
3.1.2Lit majeur – modélisation 2D....22
3.1.3Modèle 1D/2D....26
3.2Conditions aux limites....29

3.2.1Conditions aux limites amont.....29
3.2.2Conditions aux limites aval.....31
3.3Hypothèses de modélisation.....33
3.3.1Profils en travers – manque de données.....33
3.3.2Ouvrages sans données.....33
3.3.3Gestion des écluses.....33
3.4Analyse de sensibilité.....34
3.4.1Les configurations hydrologiques.....34
3.4.2Paramètres du modèle.....37
3.5Vérification des résultats du modèle hydraulique.....41
3.6Les limites de l'approche et les améliorations à envisager.....46

4 - Cartographie des zones inondables.....49

4.1Des résultats aux surfaces inondables.....49
4.1.1Exploitation des résultats du modèle hydraulique.....49
4.1.2Méthodologie d'élaboration des cartes.....49
4.2Le format des cartes de surfaces inondables.....49
4.3Lecture des cartes des surfaces inondables 49
4.4Lecture des cartes de synthèse.....51

5 -Liste des documents fournis en annexes au rapport.....52

5.1Hydrologie.....52
5.2Analyse de sensibilité.....52
5.2.1Coefficients de seuils.....52
5.2.2Configurations hydrologiques.....52
5.3Cartes des zones inondables.....52

5.3.1TRI de Douai.....52
5.3.2TRI de Valenciennes.....53
5.4Éléments géométriques du modèle.....53
5.4.1Profils en travers.....53
5.4.2Profils en long.....53

Index des tables

Tableau 2.1 - Stations de relevage des cuvettes minières....18

Tableau 3.1 - Affinage du maillage avec la topographie....23

Tableau 3.2 - Valeurs de rugosité / type d'occupation des sols....24

Tableau 3.3- Répartition des profils en travers sur les différentes voies navigables....26

Tableau 3.4 - Comparaison des cotes de débordement simulées avec les cotes de débordement théoriques pour les biefs munis d'un dossier d'ouvrage....42

Index des illustrations

Figure 1 - Voies navigables modélisées....12

Figure 2 - Zone couverte par le Lidar Scarpe aval (zone grisée) et TRI de Douai (zone orange) et de Valenciennes (zone rose)....13

Figure 3 - Géoréférencement de la carte annexe de l'étude SOGREAH pour le positionnement des profils en travers....14

Figure 4 - Localisation des données bathymétriques disponibles en fonction des tronçons de cours d'eau....15

Figure 5 - Ouvrages (écluses, ponts, stations de relevages) et disponibilités des données....19

Figure 6 : Débits de pointe centennaux aux points de contrôle (configuration "pivot 50 ans", source DHE)....21

Figure 7 - Type d'occupations des sols au niveau de Bruay-sur-Escaut et de Fresnes-sur-Escaut....25

Figure 8 - Comparaison des données d'occupation des sols: Corine Land Cover (à gauche) et SIGALE (à droite)....25

Figure 9 - Modélisation 1D-2D au niveau de la confluence entre la Scarpe moyenne et le canal de dérivation....27

Figure 10 - Vue globale du modèle 1D-2D sur le secteur d'étude avec une superposition des

enveloppes hydrogéomorphologiques de la Scarpe aval et de l'Escaut.....28

Figure 11 - Hydrogramme d'injection de la Rhônelle pour les trois configurations hydrologiques dans le cas du scénario fréquent.....29

Figure 12 - Hydrogramme d'injection de la Rhônelle pour les trois configurations hydrologiques dans le cas du scénario moyen.....30

Figure 13 - Hydrogramme d'injection de la Rhônelle pour les trois configurations hydrologiques dans le cas du scénario extrême.....30

Figure 14 - Localisation des conditions amont (cercles rouges localisant les injections des hydrogrammes) et aval (triangles verts). 32

Figure 15 - Influence de la configuration hydrologique (C1, C2 et C3) sur les niveaux d'eau au droit de Vred pour les scénarios fréquent, moyen et extrême.....35

Figure 16 - Influence de la configuration hydrologique (C1, C2 et C3) sur les niveaux d'eau à l'aval immédiat de l'écluse de Valenciennes pour les scénarios fréquent, moyen et extrême.....36

Figure 17 - Influence de la configuration hydrologique (C1, C2 et C3) sur les emprises des zones inondées pour le scénario extrême au niveau de la Scarpe moyenne (à gauche) et de la confluence entre l'Escaut et le canal de Condé-Pommeroeul (à droite).....37

Figure 18 - Emprises des zones inondées (scénario extrême) pour les trois jeux de coefficients (Coeffs 1, Coeffs 2 et Coeffs 3) pour le secteur de Douai (à gauche) et Valenciennes (à droite).....39

Figure 19 - Emprise des zones inondées pour trois jeux de coefficients de seuils (Coeffs 1, Coeffs 2 et Coeffs 3) dans le cas du scénario extrême (Q1000).....40

Figure 20 - Débordements simulés dans le cas du scénario extrême aux abords des communes de Lallaing et d'Anhiers.....43

Figure 21 - Vérification des points bas des berges à l'origine des débordements aux abords des communes de Lallaing et d'Anhiers sur le LIDAR Scarpe aval.....44

Figure 22 - Vérification de la cohérence entre les zones inondées et l'enveloppe hydrogéomorphologique - secteur de Courchelettes -.....45

Figure 23 - Vérification de la cohérence entre les zones inondées et l'enveloppe hydrogéomorphologique - secteur de Douchy-les-Mines -.....46

Figure 24 - Détection de zones de végétation non filtrées.....47

Figure 25 - Filtrage des secteurs de végétation du MNT.....47

Figure 26 - Classe des hauteurs de submersion.....49

Figure 27 - Emprise des surfaces inondables pour les trois scénarios de crue: fréquent (forte probabilité), moyen(moyenne probabilité) et extrême (faible probabilité).....51

1 - Contexte et objectifs de l'étude

1.1 Contexte réglementaire

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la mise en œuvre de la Directive 2007/60/CE du Parlement Européen et du Conseil relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation, transposée en 2010 en droit français.

Cette directive fixe un cadre et un calendrier afin d'aboutir en 2015 à l'élaboration de plans de gestion des risques d'inondation (PGRI) à l'échelle des districts hydrographiques.

Après une première étape d'évaluation préliminaire des risques d'inondation (EPRI) achevée en décembre 2011, puis une seconde d'identification des territoires à risque important d'inondation (TRI) terminée en septembre 2012, la procédure est actuellement à la phase d'élaboration des cartes des surfaces inondables et des cartes des risques dans les TRI pour trois probabilités d'occurrence de crue, objet de la présente étude.

Cette étude se déroule en 5 phases :

- **phase 1** : analyse de la documentation et du fonctionnement du bassin versant
- **phase 2** : cartographie hydrogéomorphologique sur les TRI
- **phase 3** : cartographie des zones inondables par un croisement hydrogéomorphologie/LIDAR sur les TRI
- **phase 4 :** modélisation simplifiée et cartographie des zones inondables
- **phase 5** : harmonisation des cartographie sur le TRI de Douai

Le présent document concerne la phase 4 de l'étude.

1.2 Les objectifs

Cette phase a pour objectif de réaliser des modélisations hydrauliques simplifiées des scénarios *fréquent, moyen et extrême* des voies navigables des TRI de Douai et de Valenciennes.

Ces modélisations permettront de cartographier, pour chacun des scénarios sus mentionnés les zones inondables des deux TRI.

Ce rapport présente de manière commune la modélisation hydraulique et la cartographie des surfaces inondables des TRI de Douai et de Valenciennes en raison de leur réseau hydrographique commun.

1.3 Contenu du rapport

Le présent rapport concerne la phase 4 de l'étude : modélisation simplifiée et cartographie des zones inondables des TRI de Douai et de Valenciennes. Cette phase fait suite aux trois premières qui ont conduit à la réalisation de cartes de zones inondables par une approche hydrogéomorphologique.

Ce rapport est organisé en 3 parties :

- la première et présente partie rappelle les objectifs de l'étude et les documents à produire au sein de cette phase ;

- la seconde partie présente les données disponibles et les principales hypothèses de travail ;
- la troisième partie concerne la modélisation simplifiée des voies navigables des TRI de Douai et de Valenciennes ;
- la quatrième et dernière partie présente les documents annexés au présent rapport (cartes des zones inondables).

1.4 Synthèse-conclusions

Cette phase a permis de réaliser la cartographie des zones inondables des TRI de Douai et de Valenciennes pour les trois scénarios de crue :

- scénario fréquent (~10 ans)
- scénario moyen (~100 ans)
- scénario extrême (~1000 ans)

Cette cartographie est issue d'une modélisation hydraulique des voies navigables des TRI composées du canal de la Sensée, de l'Escaut, de la Scarpe aval, du canal de dérivation de la Scarpe et de la Scarpe moyenne. Aussi, les cartes des surfaces inondables sont directement liées à la précision du modèle hydraulique.

Les résultats du modèle sont cependant limités par la qualité des données utilisées que ce soit :

- dans la construction du modèle (données topographiques, bathymétriques, d'ouvrages) ;
- dans les conditions aux limites (conditions amont – l'hydrologie- et aval) ;
- dans le calage du modèle (données historiques).

Les données topographiques ont une précision allant de 10 cm environ pour le MNT couvrant la Scarpe aval et de 20 cm environ pour le MNT du CG59 couvrant tout le secteur d'étude. Leur précision est moindre dans des secteurs de végétations mal filtrés, aussi malgré une correction de ces secteurs, une incertitude sur la cote précise de débordement des biefs demeure, notamment dans le cas de berges couvertes par la végétation.

Étant donnée la complexité du réseau hydrographique secondaire et les délais impartis, l'analyse hydrologique (menée par le bureau d'études DHE) n'a pas pu prendre en compte les nombreux échanges de ce dernier. Cette analyse a également été contrainte par la faiblesse des chroniques de mesures fiables issues des stations hydrométriques du secteur d'étude.

Enfin, aucune information historique liée à un débordement directement imputable à une voie navigable n'a pu être relevée. Les résultats du modèle sont donc confrontés aux seules informations disponibles, à savoir les cotes de débordement des biefs pour lesquels des dossiers d'ouvrages ont été constitués par VNF.

Au vu des limitations quant aux données nécessaires au modèle, c**ette cartographie des surfaces inondables, sur des secteurs géographiques étendus, permet donc d'avoir une première identification des secteurs à risques concernant les débordements des voies navigables. Ces secteurs sont les suivants :**

- **pour la Scarpe moyenne : Courchelettes et Corbehem (scénarios moyen et extrême) et Lambres-lez-Douai (scénario extrême) ;**
- **pour la Scarpe aval : Lallaing et Anhiers (pour les trois scénarios) ;**

- **pour le canal de la Sensée : le secteur de confluence avec l'Escaut - Féchain, Hem-Lenglet, Wasnes-au-Bac, Wavrechain-sous-Faux – (pour le scénario extrême) ;**
- **pour l'Escaut : le secteur de confluence avec la Selle - Douchy-les-Mines, Lourches - (pour les trois scénarios), un secteur d'activités de Valenciennes (scénario extrême) et le secteur de confluence avec le canal de Condé-Pommeroeul (scénario extrême).**

2 - Hypothèses de travail et données de base

2.1 Secteurs modélisés

Le cahier des charges de l'étude mentionne la modélisation des voies navigables suivantes :

- la Scarpe inférieure depuis l'écluse de Fort-de-Scarpe jusqu'à sa confluence avec l'Escaut ;
- l'Escaut canalisée entre Fresnes-sur-Escaut et l'écluse dite de Pont-Malin ;
- le canal de la Sensée et l'écluse dite de Pont-Malin.

Pour des raisons de cohérence hydraulique et de secteurs à risques d'inondation non pris en compte dans les canaux énoncés ci-dessus, il a été décidé de compléter la liste des voies navigables à modéliser par l'ajout :

- du canal de dérivation de la Scarpe de l'écluse de Goeulzin à l'aval de sa jonction avec la Scarpe moyenne ;
- la Scarpe moyenne (de l'écluse de Couteau-Courchelettes à Fort-de-Scarpe) et le canal de jonction avec la dérivation de la Scarpe ;
- le bas Escaut de l'écluse de Fresnes-sur-Escaut à la confluence avec la Scarpe aval.

L'ensemble des voies navigables modélisées et les écluses présentes sur ces dernières sont présentés dans la figure 1, page suivante.

A l'aval de la confluence entre la Scarpe aval et le bas Escaut, seule la partie française de la voie navigable sera modélisée étant donnée l'absence de données du côté belge.

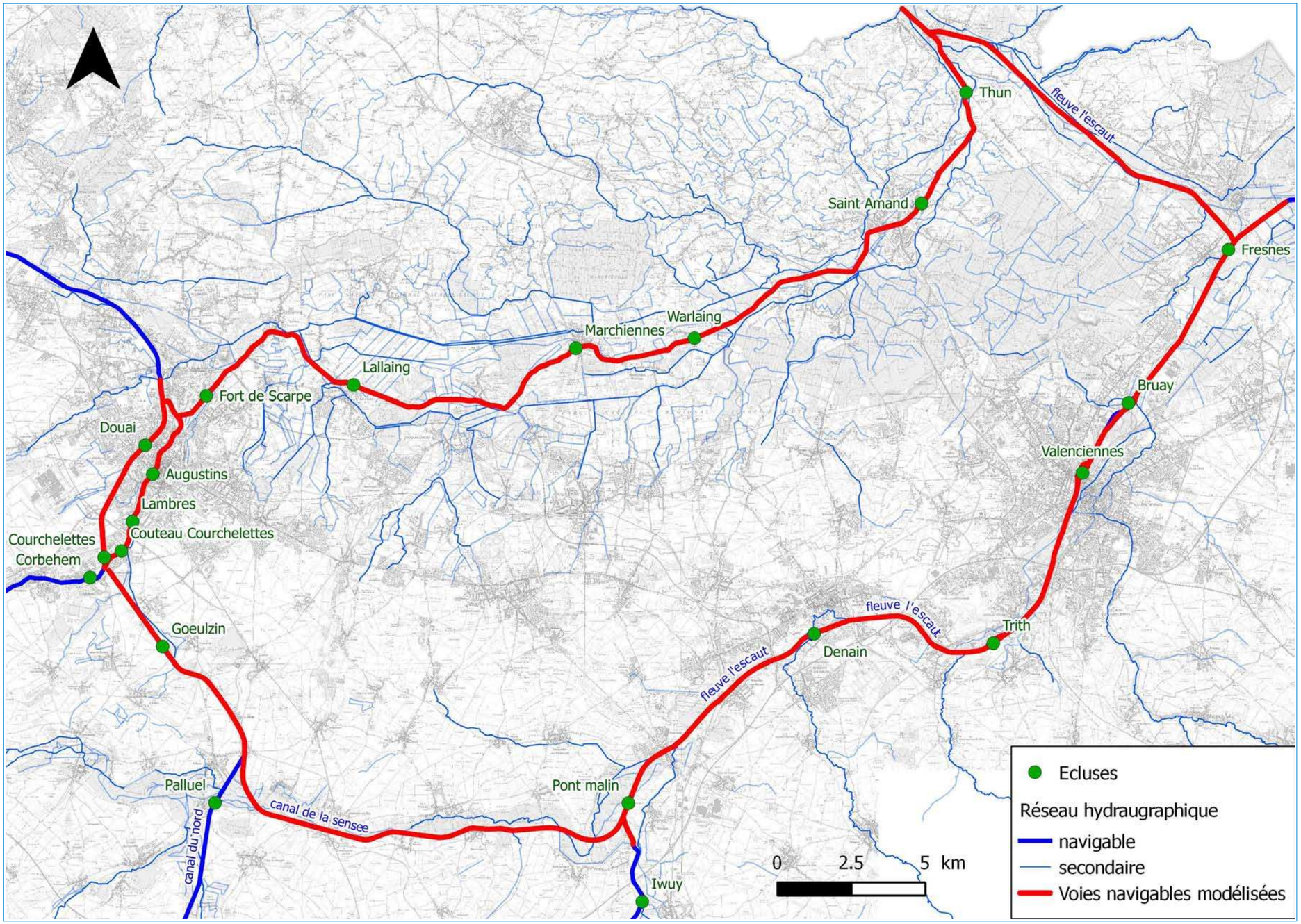


Figure 1 - Voies navigables modélisées.

2.2 Données disponibles

Pour rappel, le marché, compte tenu des délais de réalisation relativement courts, ne comprenait pas de phases d'acquisition de données complémentaires. Une étape de collecte de données a donc été réalisée, de la façon la plus exhaustive possible, afin de disposer d'un maximum d'éléments pour la construction des modèles hydrauliques.

2.2.1 Données topographiques

Les données topographiques disponibles et déjà utilisées dans le cadre des phases 2 et 3 de la présente étude sont :

- MNT du CG59 (mailles de 5 m avec une précision d'environ 20 cm) ;
- LIDAR Scarpe aval (mailles d' 1 m avec une précision inférieure à 10 cm).

A noter que **la précision des MNT est variable notamment dans les zones en présence de végétation** (forêts, cultures...). L'emprise du LIDAR Scarpe aval ne couvre qu'une partie du TRI de Douai comme l'illustre la figure suivante.

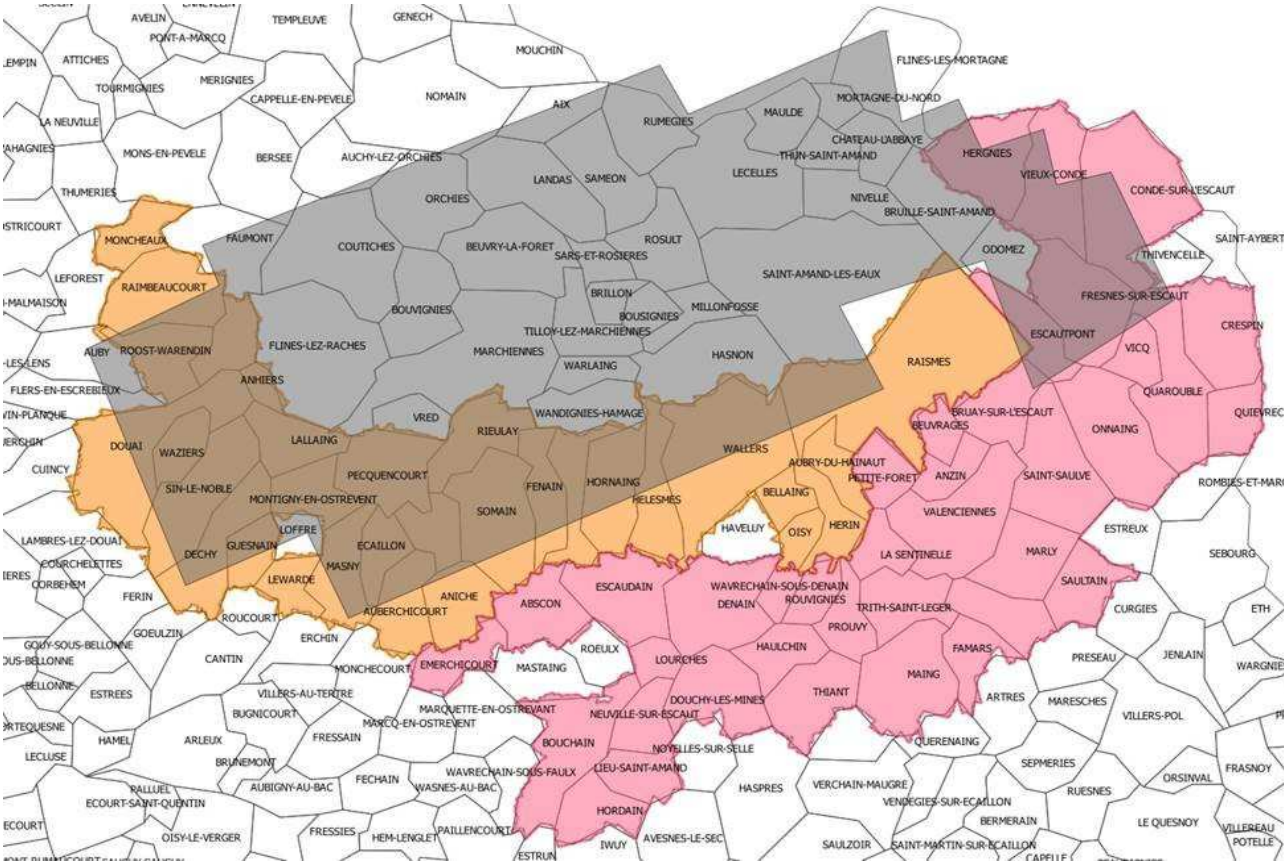


Figure 2 - Zone couverte par le Lidar Scarpe aval (zone grisée) et TRI de Douai (zone orange) et de Valenciennes (zone rose)

2.2.2 Données bathymétriques

VNF a fournit des données bathymétriques du canal de la Sensée et de l'Escaut. Concernant la Scarpe moyenne, le canal de dérivation et le canal de jonction, seule une petite partie de ces derniers ont fait l'objet de levés bathymétriques.

En revanche, **aucune donnée bathymétrique récentes de la Scarpe aval n'est disponible.** Les données disponibles du modèle hydraulique de SOGREAH, réalisé dans le cadre de l'AZI de la Scarpe aval (SOGREAH, 2009), ne comprenaient pas de couches SIG permettant une géolocalisation des profils en travers de la Scarpe aval. Une géolocalisation de ces profils (109 au total) a donc été réalisée à partir de la carte annexe de l'étude SOGREAH (Annexe_2_Fonctionnement_Hydraulique), puis un import de ces derniers à partir des fichiers CARIMA a permis d'obtenir des profils géolocalisés de la Scarpe aval.

La figure ci-dessous illustre la géolocalisation des profils de l'étude SOGREAH. Les cercles rouges correspondent à la position des profils. Ces derniers ont un diamètre d'environ 50 m, ce qui implique une erreur de ± 25 m sur le positionnement du profil, erreur à laquelle s'ajoute celle due au géo-référencement de la carte annexe que l'on peut également estimer à ± 25 m.

Les profils de la Scarpe aval sont donc positionnés avec une erreur de ± 50 m.

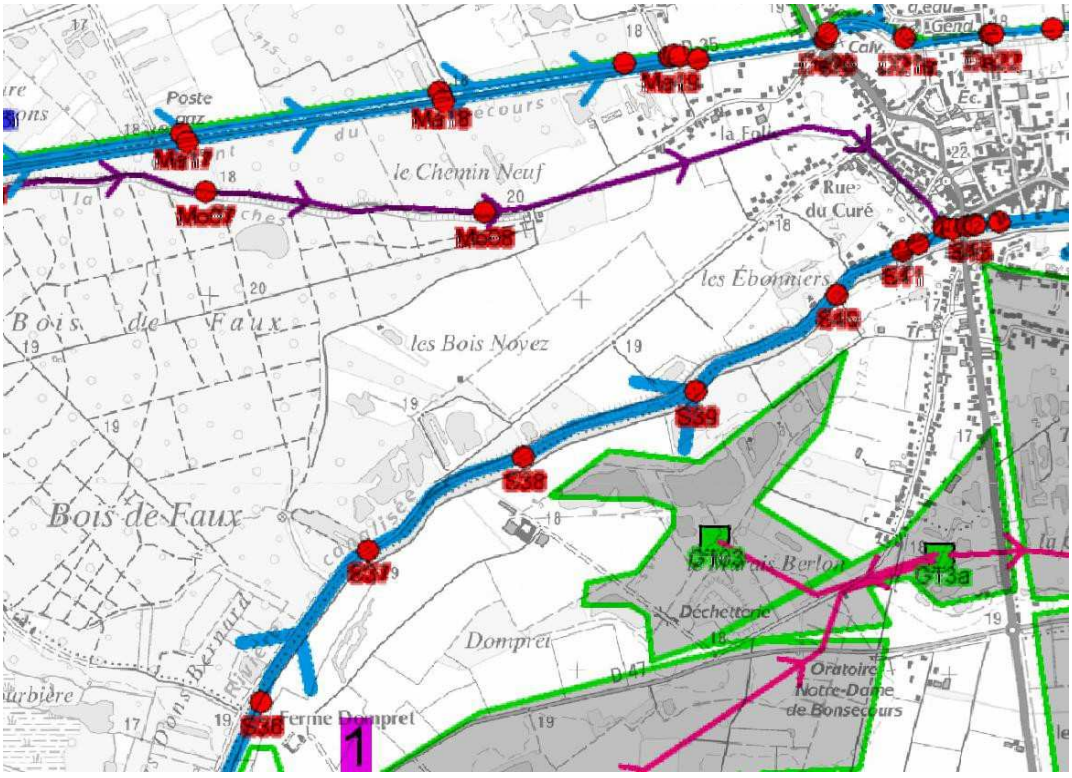


Figure 3 - Géoréférencement de la carte annexe de l'étude SOGREAH pour le positionnement des profils en travers.

La localisation des différentes données disponibles en fonction des tronçons de cours d'eau est donnée dans la figure 4.

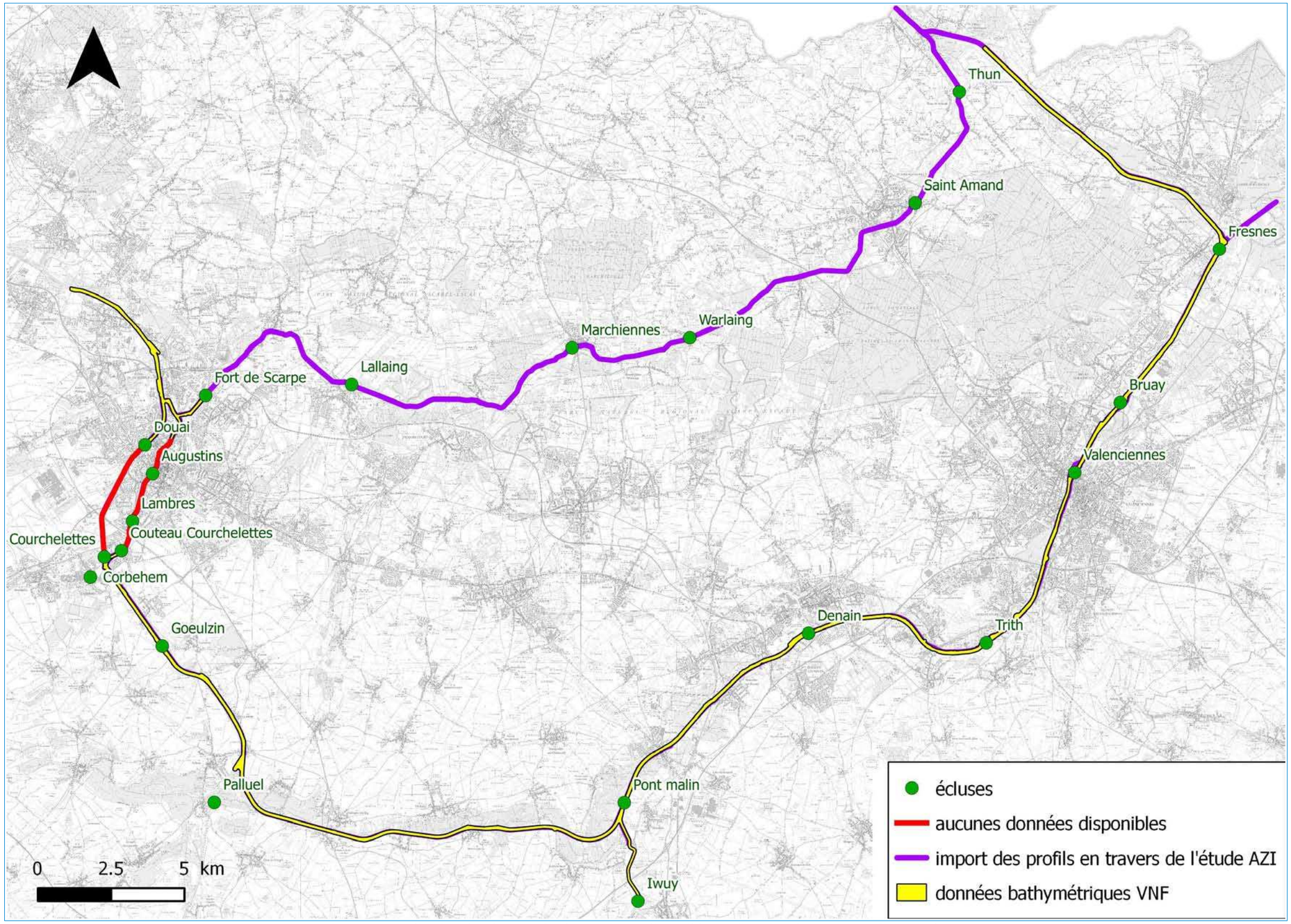


Figure 4 - Localisation des données bathymétriques disponibles en fonction des tronçons de cours d'eau.

2.2.3 Données d'ouvrages

2.2.3.1 Les écluses

Au total, les vois navigables modélisées comprennent 18 écluses ou barrages-éclusés dont la répartition au sein des différents canaux est donnée, d'amont en aval, ci-dessous.

L'Escaut canalisée :

- Pont-Malin ;
- Denain ;
- Trith ;
- Valenciennes ;
- Bruay ;
- Fresnes.

La Scarpe moyenne :

- Couteau-Courchelettes ;
- Lambres ;
- Les Augustins.

La Scarpe aval :

- Fort-de-Scarpe ;
- Lallaing ;
- Marchiennes ;
- Warlaing ;
- Saint-Amand ;
- Thun.

Le canal de dérivation de la Scarpe :

- Courchelettes ;
- Douai.

Le canal de la Sensée :

- Goeulzin.

VNF a fournit à PROLOG INGENIERIE :

- des dossiers d'ouvrages pour les écluses de la Scarpe moyenne et de l'Escaut ;
- des levés topographiques des écluses de la Scarpe aval, à l'exception de Thun.

Il n'existe, à ce jour, aucun documents d'ouvrages ni pour les écluses du canal de la Sensée et de la dérivation de la Scarpe. Les écluses suivantes restent donc sans données :

- **Goeulzin, Courchelettes et Douai** pour les canaux de la Sensée et de dérivation de la Scarpe.
- **Fort de Scarpe et Thun** pour la Scarpe aval.

Concernant l'écluse de Thun, les cotes radier et supérieure de son barrage (2 clapets déversants de type Warlaing) ont été fournies par VNF.

Le lecteur est renvoyé au paragraphe 3.3 pour la présentation des hypothèse d'intégration de l'ensemble de ces ouvrages dans la modélisation.

2.2.3.2 Autres ouvrages

Hormis les écluses, des levés topographiques de 17 ponts ont été fournis (13 pour la Scarpe aval et 4 pour

l'Escaut).

La phase 1 de l'étude a mis en exergue la topographie particulière de la zone d'étude (très faible déclivité) et les marques historiques dues au passé minier de la région. Aussi, nous considérerons les stations de relevage des cuvettes minières dont l'évacuation des eaux pourrait, selon VNF, représenter 40% des apports de la Scarpe aval lors de crues décennales.

Les différentes stations de relevage dont les informations (capacité nominale, point de rejet) nous ont été transmis sont détaillées dans le tableau suivant. **A noter que les stations de Vred et Belle Inutile relèvent les eaux de la Traitoire et du Bouchard.** Ces deux ouvrages ne seront donc pas pris en compte par la suite, les apports des affluents étant considérés par l'hydrologie.

Nom de la station	n°	Capacité nominale	unité	Point de rejet
CG 35	ED14	8200	m³/j	Scarpe
Frais Marais	ED11	600	m³/h	Scarpe
Solitude	ED12	7300	m³/h	Scarpe
Belle inutile	ED17	7870	m³/h	Scarpe
Vred	ED21	6333	m³/h	Scarpe
Vallée de la Scarpe	ED34	8000	m³/h	Scarpe
Marais de Flers	ED38	4200	m³/h	Deule
Genevieve	ED39	23300	m³/h	Deule
Champs de Course	ED6	1644	m³/h	Deule
Putemont Rive Droite	EV53	250	m³/h	Escaut
Putemont Rive Gauche	EV55	2250	m³/h	Escaut
Soult	EV54	880	m³/h	Ancien bras de l'Escaut
Odomez	EV57	2650	m³/h	Escaut
Amaury Rive Gauche	EV59	2000	m³/h	Canal du Jard
Fort Masys	EV62	750	m³/h	Escaut
Saint Pierre Petit Diable	EV66	5200	m³/h	Escaut

Tableau 2.1 - Stations de relevage des cuvettes minières

La figure suivante illustre la localisation des différents ouvrages décrits ci-dessus. Seuls les ponts dont les levés de géomètres sont disponibles sont représentés dans cette figure.

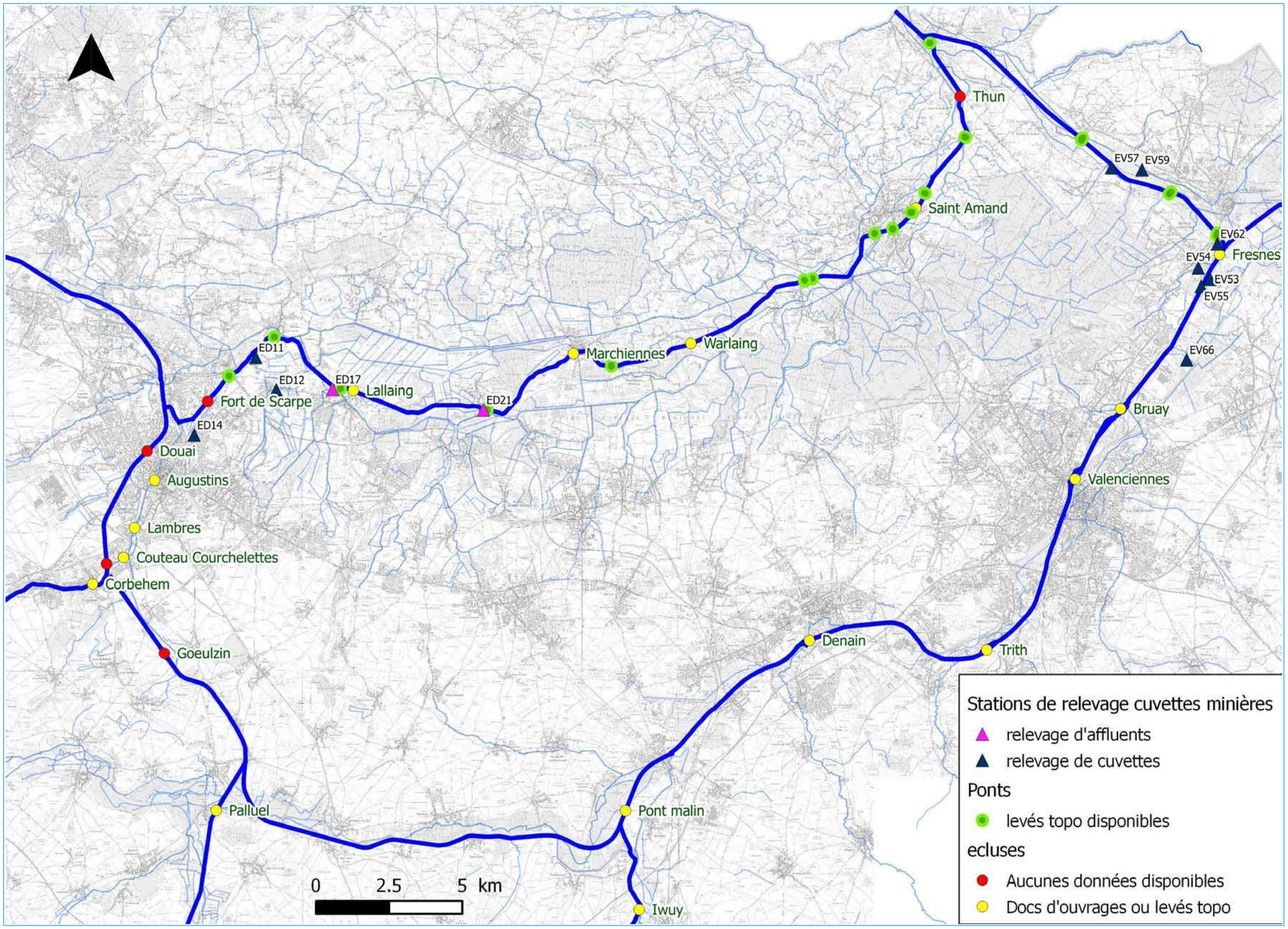


Figure 5 - Ouvrages (écluses, ponts, stations de relevages) et disponibilités des données.

2.2.4 Données hydrologiques

2.2.4.1 La méthode hydrologique employée

La phase hydrologie a été réalisée par le bureau d'étude DHE[1]. L'analyse hydrologique a fait ressortir la faiblesse de données hydrologiques sur le territoire d'étude.

En effet , sur 14 stations hydrométriques répartis sur les bassins versants de la Scarpe aval et de l'Escaut, seules deux stations sont considérées comme fiables :

- Maulde pour l'Escaut ;
- Mortagne du Nord pour la Scarpe.

De plus, la durée des chroniques de mesure n'excède pas 10 ans (2005-2012).

L'analyse hydrologique s'est basée sur une méthode régionale, dite Shyreg, qui est particulièrement adaptée aux secteurs non jaugés. Cette méthode permet d'obtenir en tout point des bassins versants du secteur d'étude les hydrogrammes de crue pour les trois occurrences :

- T=10 ans (scénario fréquent) ;
- T=100 ans (scénario moyen) ;
- T=1000 ans (scénario extrême).

Nous renvoyons le lecteur aux rapports de l'étude hydrologique (Rapports de Phases 1, 2 ,3 et 4 DHE, 2013) pour de plus amples informations concernant la méthode employée et les hypothèses associées.

2.2.4.2 Les configurations hydrologiques analysées par DHE

Les débits Shyreg fournis par la méthode sont corrigés par comparaison avec les débits obtenus par la méthode du Gradex Esthétique.

Trois hypothèses de correction des débits Shyreg ont été proposées par DHE, en accord avec les services de l'État :

- Coefficients correctifs basés sur une application du Gradex Esthétique avec un point pivot 50 ans ;
- Coefficients correctifs basés sur une application du Gradex Esthétique avec un point pivot 20 ans ;
- Pas de coefficients correctifs aux débits Shyreg.

Ces trois hypothèses fournissent ce que nous appellerons dans la suite trois « configurations hydrologiques » afin de ne pas employer le terme de « scénario » correspondant ici à l'occurrence de la crue (scénario fréquent, moyen ou extrême).

Ces trois configurations hydrologiques seront simulées pour chacune des occurrences de crue afin d'analyser leur influence en termes d'inondations.

La figure suivante, issue du rapport de Phase 3 de l'analyse hydrologique (DHE), illustre les débits centennaux maximums aux différents points de contrôle dans le cas de coefficients correctifs basé sur un point pivot 50 ans. **Il s'agit bien de débits cumulés, considérant en chaque point l'intégralité du bassin versant d'apport.**

1 Contact : Olivier SONNET

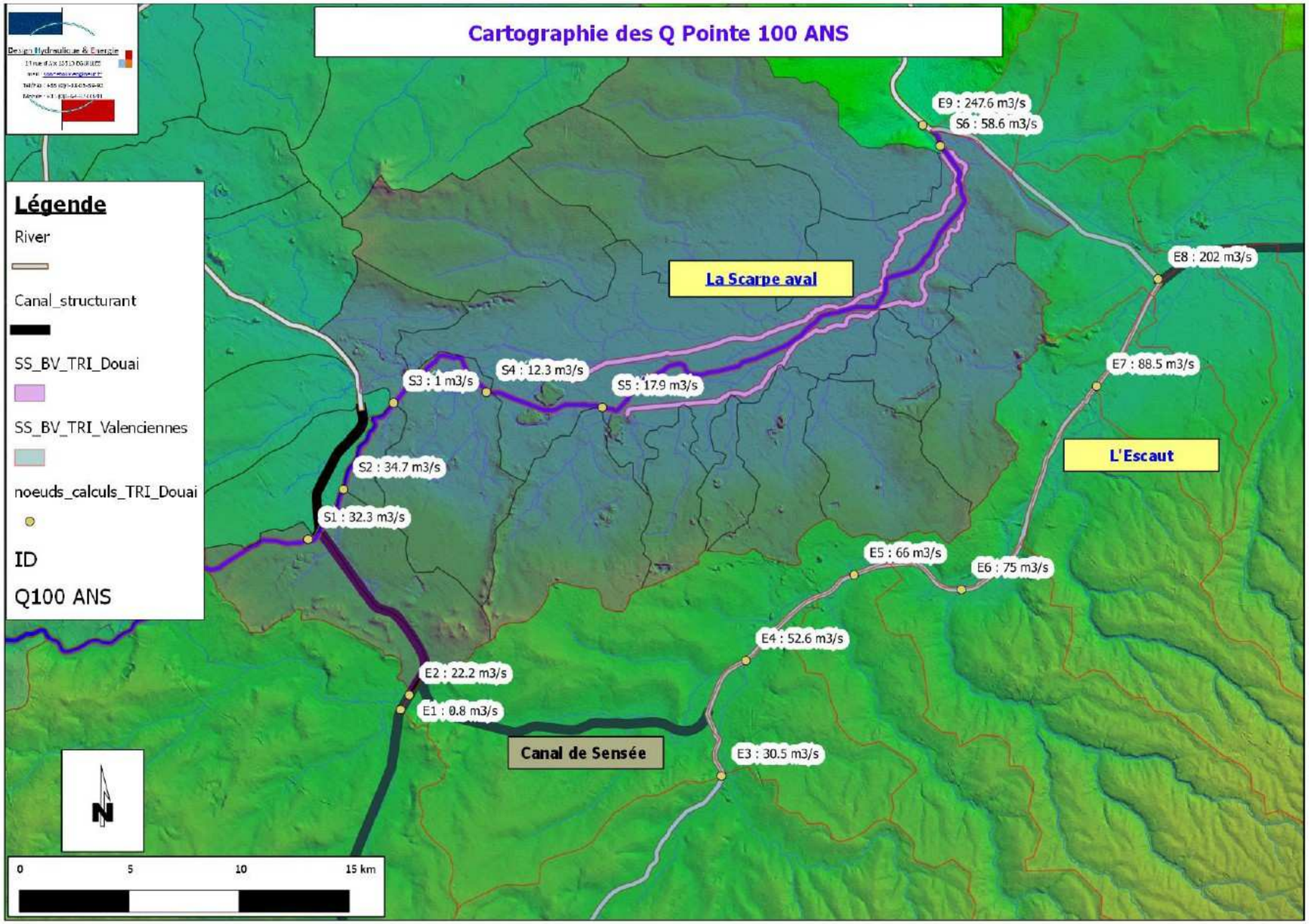


Figure 6 : Débits de pointe centennaux aux points de contrôle (configuration "pivot 50 ans", source DHE)

3 - Modélisation hydraulique simplifiée

3.1 Méthode de modélisation

La modélisation hydraulique est réalisée à l'aide du logiciel ICM version 4.0 développé par Innovyze. Ce choix se justifie par la possibilité d'une « approche globale » couplant au sein d'un même modèle des éléments unidimensionnels représentant les réseaux hydrographiques et et une représentation bidimensionnelle du lit majeur.

3.1.1 Lit mineur – modélisation 1D

Le lit mineur des voies navigables considérées plus haut sont représentés par **des approches unidimensionnelles ou modèles filaires**.

Le modèle unidimensionnel des voies navigables est composé de profils en travers reliés par des liens sur lesquels s'effectue le calcul hydrodynamique, et des ouvrages spécifiques (ponts, écluses). Les profils en travers, associés à des lignes de berges (droite et gauche), constituent des biefs entre chaque ouvrage.

Ces biefs (partie 1D du modèle) sont connectés à la zone bi-dimensionnelle 2D (lit majeur) par les lignes de berges agissant comme des déversoirs. Lorsque la ligne d'eau atteint le niveau de la ligne de berge la plus basse, l'eau se déverse alors vers la zone 2D suivant une loi de seuil. A noter que ce processus d'échange fonctionne dans les deux sens, i.e que l'eau peut également s'écouler de la zone 2D vers la zone 1D (lit mineur). Les lignes de berges sont irrégulières et suivent parfaitement le niveau de débordement des biefs, décrits dans la donnée topopgraphique.

3.1.2 Lit majeur – modélisation 2D

Les écoulements au sein des espaces inondés (lit majeur) sont représentés par un maillage bidimensionnel.

Le domaine de calcul du modèle bidimensionnel du lit majeur est donc le maillage, composé de mailles triangulaires irrégulières. Ce maillage est la retranscription numérique de la topographie, il est donc basé sur le modèle numérique de terrain importé dans le logiciel d'où il tirera les informations altimétriques. Il n'est fait aucune hypothèse sur les directions d'écoulements, ces dernières étant dirigées par les formes du terrain.

Le modèle produit pour chaque pas de temps de calcul et pour chacune des mailles des résultats en niveaux de submersion, vitesses d'écoulement, niveau (altitude) atteint par l'inondation.

Adaptation topographique de la finesse du maillage

La construction du maillage de calcul se base également directement sur la topographie du bassin versant, c'est à dire sur le Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la zone d'étude.

Chaque maille récupère en effet l'altimétrie du terrain naturel à partir du MNT et se sert de cette information pour calculer la hauteur d'eau sur la maille au cours de la simulation, par simple différence entre le niveau d'eau modélisé et la cote du terrain naturel.

Il est donc extrêmement important que les mailles se voient affecter la bonne cote du terrain naturel et donc qu'elles aient une taille adaptée aux variations topographiques du lit majeur.

Le tableau ci dessous présente un exemple d'erreur qui peut être commise si cet aspect n'est pas pris en compte :

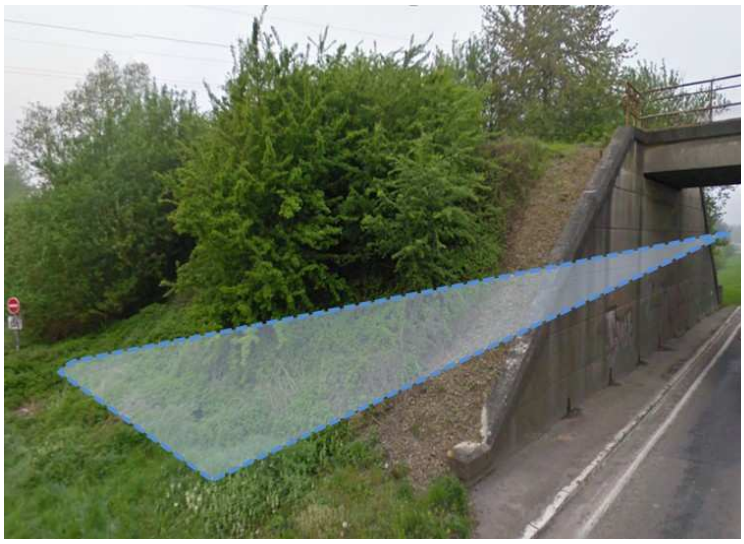
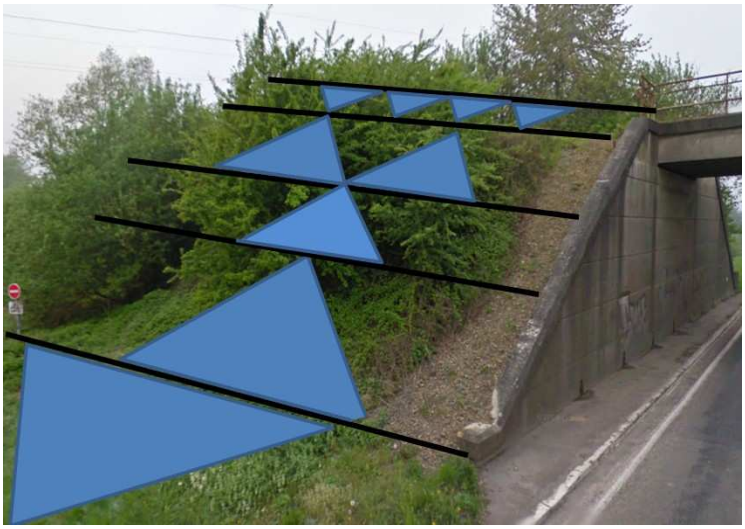
Sur l'exemple ci-contre, le maillage n'est pas adapté au remblai présent dans le lit majeur, les mailles vont donc le traverser comme s'il n'existait pas. Le problème dans ce cas là est que la maille se verra attribuer une altimétrie plus faible que la cote du haut du remblai (l'altimétrie de la maille est calculée en faisant la moyenne de l'altimétrie des trois extrémité du triangle). Ainsi, de l'eau vient s'écouler jusqu'au remblai, elle le surversera puisque la cote d'arase du remblai n'est prise en compte	
En revanche, si le remblai est pris en compte dans le maillage, la taille des mailles va s'affiner représentant ainsi bien la topographie de l'obstacle et notamment son niveau de crête	

Tableau 3.1 - Affinage du maillage avec la topographie

Le maillage est défini par une superficie maximale de mailles (10 000 m² étant donné l'étendue de la zone d'étude). Le logiciel intègre directement la possibilité d'affiner ensuite le maillage (diminution de la taille des mailles) lorsque la topographie présente des variations d'altimétrie supérieure à un seuil. Ce seuil a été fixé à 1 m.

Les mailles ainsi générées présentent des superficies médianes de l'ordre de 1 000 m^2, on note donc l'intérêt d'affiner automatiquement le maillage selon la topographie.

Prise en compte de l'occupation des sols

La dynamique d'un écoulement étant différente selon la nature du sol (frottement différent sur une voirie ou une parcelle agricole), il est donc important de sectoriser le périmètre d'étude en zones dont le coefficient de rugosité sera adapté au type d'occupation des sols.

Les valeurs de rugosité (coefficient de Strickler) sont conformes aux données de la littérature et permettent de bien distinguer des grands types de couvertures du sol :

Occupation des sols	Coefficient de rugosité K
CULTURES	15
PRAIRIES	30
PLANS D'EAU	30
FORETS	10
URBAIN	15
VOIRIE-AEROPORT	40
LIT MINEUR	30

Tableau 3.2 - Valeurs de rugosité / type d'occupation des sols

L'occupation des sols du secteur d'étude a été déterminée à partir la base de données SIGALE, plus précise que la base de données Corine Land Cover.

La figure suivante illustre ces zones de rugosité différenciées aux abords de l'Escaut. L'intégration de ces zones de rugosité différenciées permet ainsi de prendre en compte l'effet de freinage/accélération des différentes couverture de sol.

La figure 8 compare les données d'occupation des sols des bases de données Corine Land Cover et SIGALE. On constate clairement une meilleure précision des données SIGALE qui sont fournies à la parcelle.

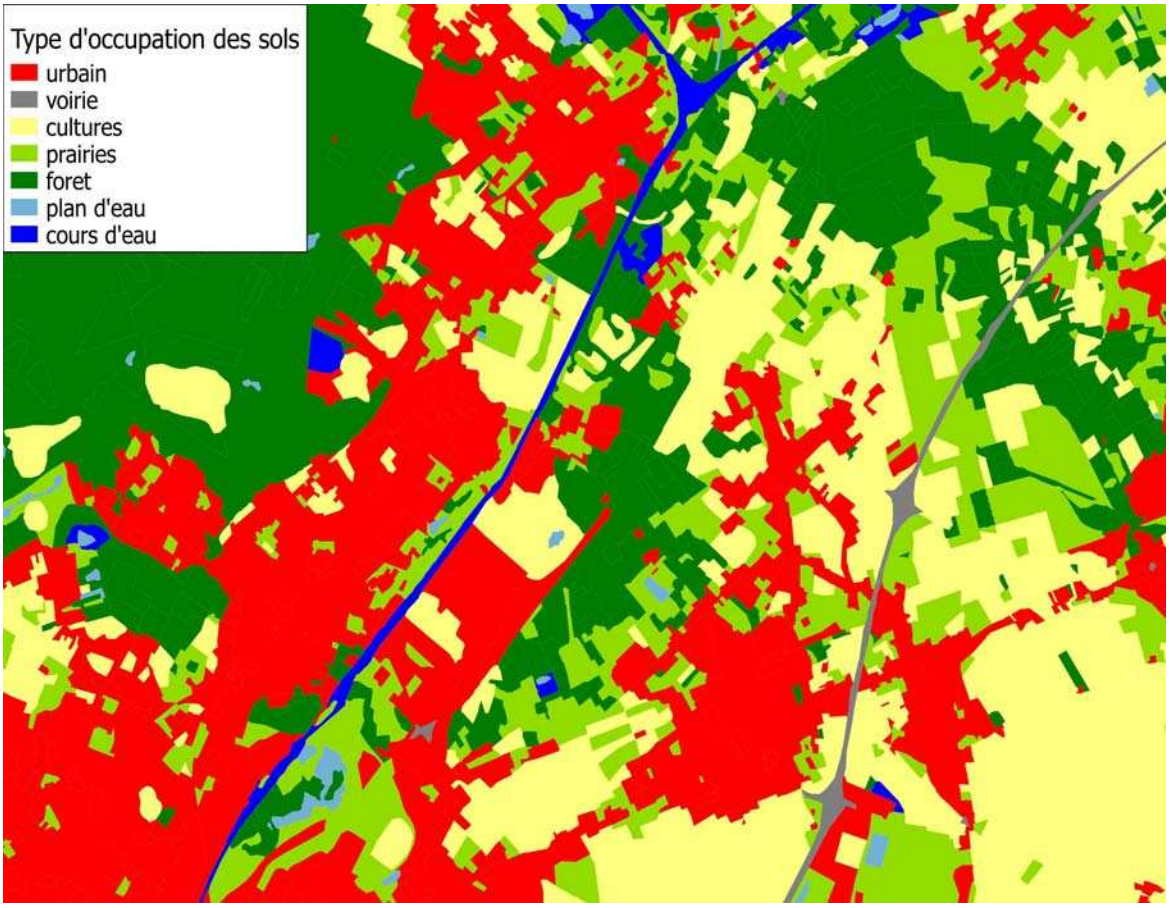


Figure 7 - Type d'occupations des sols au niveau de Bruay-sur-Escaut et de Fresnes-sur-Escaut

Figure 8 - Comparaison des données d'occupation des sols: Corine Land Cover (à gauche) et SIGALE (à droite)

3.1.3 Modèle 1D/2D

La figure suivante illustre le couplage 1D/2D du modèle au niveau de la confluence entre la Scarpe moyenne et le canal de dérivation de la Scarpe. Les profils en travers sont resserrés au niveau des ponts afin de prendre en compte la contraction de la section du lit mineur au niveau de ces ouvrages.

Au total, le modèle 1D comprend environ 500 profils en travers pour 120 km de cours d'eau représentés, et le modèle 2D environ 450 000 éléments de calcul.

La répartition des profils en travers selon les voies navigables modélisées est :

- **Scarpe aval** (entre l'écluse de Fort de Scarpe et la confluence avec l'Escaut) : 109 profils ;
- **Scarpe moyenne et canal de jonction** (entre les écluses de Courchelettes et de Fort de Scarpe) : 80 profils ;
- **Canal de dérivation de la Scarpe** (à l'aval de l'écluse de Goeulzin) : 53 profils;
- **Canal de la Sensée** (entre les écluses de Goeulzin et de Pont-Malin comprenant également le bief Iwuy-Pont Malin) : 87 profils ;
- **l'Escaut** (entre l'écluse de Pont-Malin et la frontière belge) : 196 profils.

Le tableau ci-dessous donne la distance moyenne séparant 2 profils en travers pour les différentes voies navigables :

	Nombre de profils en travers	**Longueur de la voie navigable (en km)**	**Distance moyenne séparant 2 profils en travers (en m)**
Scarpe aval	109	36	330
Scarpe moyenne	80	8	100
Dérivation de la Scarpe	53	10	188
Sensée	87	21,4	246
Escaut	196	50	255

Tableau 3.3- Répartition des profils en travers sur les différentes voies navigables

La figure 10, qui présente une vue globale de l'ensemble des voies navigables modélisées et de leur lit majeur maillé, permet, tout comme la figure 9, de visualiser l'adaptation du maillage aux variations de la topographie.

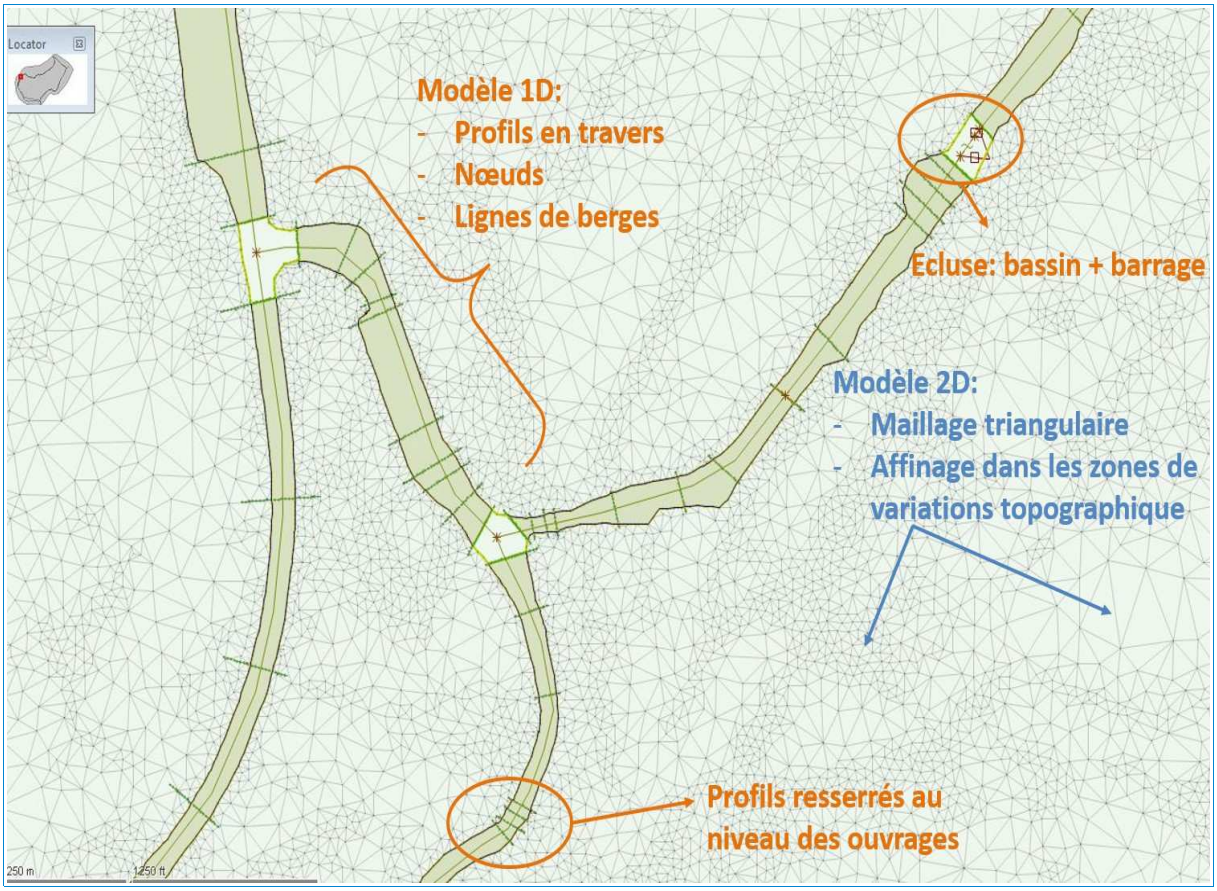


Figure 9 - Modélisation 1D-2D au niveau de la confluence entre la Scarpe moyenne et le canal de dérivation.

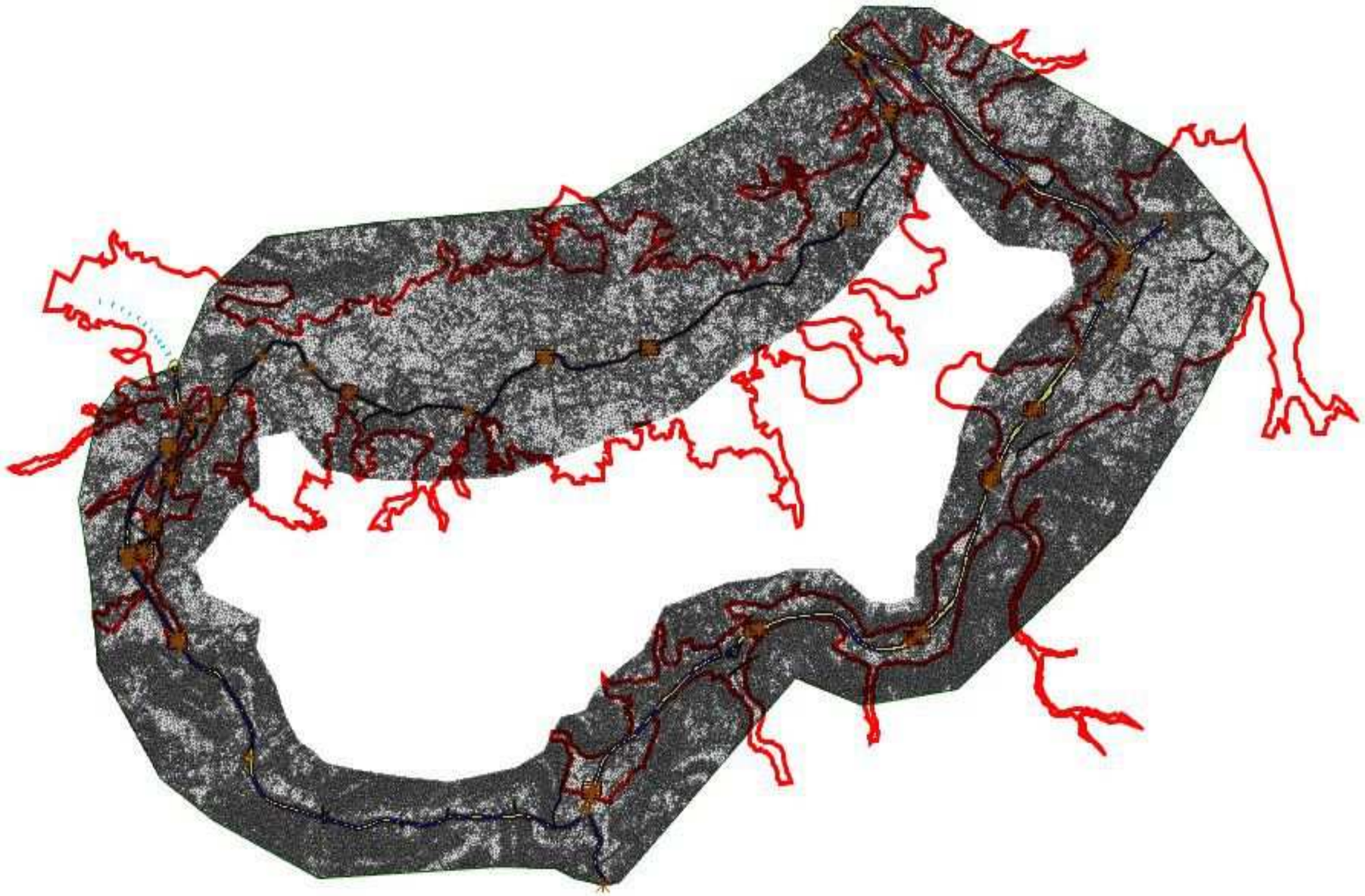


Figure 10 - Vue globale du modèle 1D-2D sur le secteur d'étude avec une superposition des enveloppes hydrogéomorphologiques de la Scarpe aval et de l'Escaut.

3.2 Conditions aux limites

3.2.1 Conditions aux limites amont

Les conditions aux limites amont sont les hydrogrammes définis dans la partie 2.2.4.

Les figures ci-dessous donnent les hydrogrammes d'injection de la Rhônelle pour les trois scénarios de crue et les trois configurations hydrologiques.

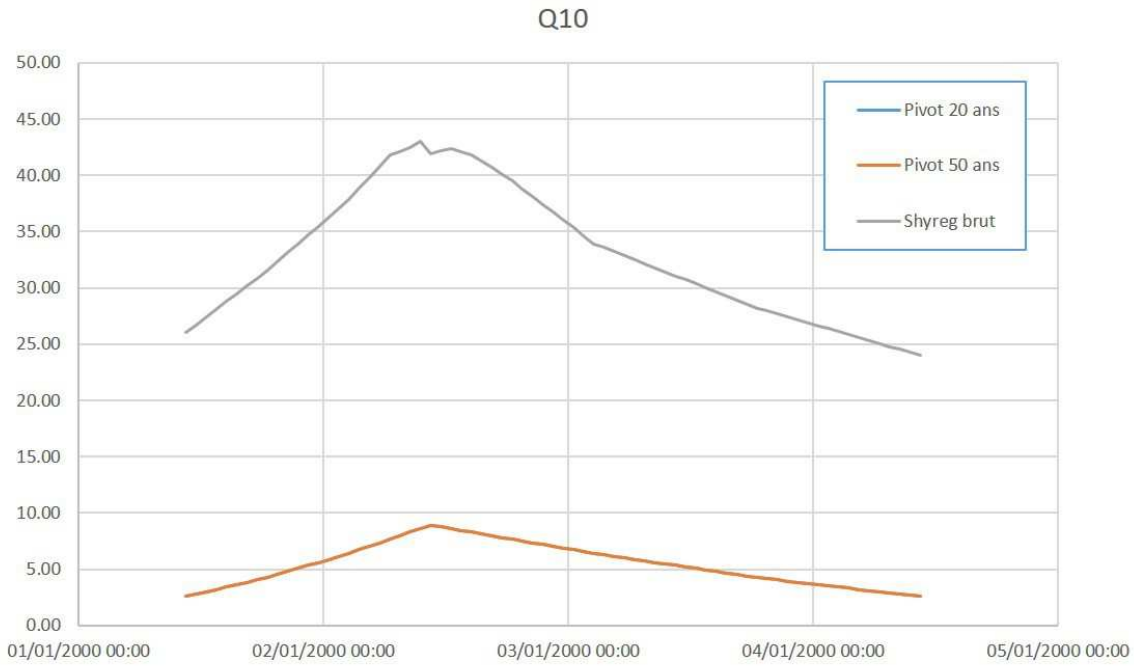


Figure 11 - Hydrogramme d'injection de la Rhônelle pour les trois configurations hydrologiques dans le cas du scénario fréquent.

Dans le cas du scénario fréquent (Q10), les hydrogrammes pour les configurations hydrologiques « Pivot 20 ans » et « Pivot 50 ans » se superposent (Cf. figure 11).

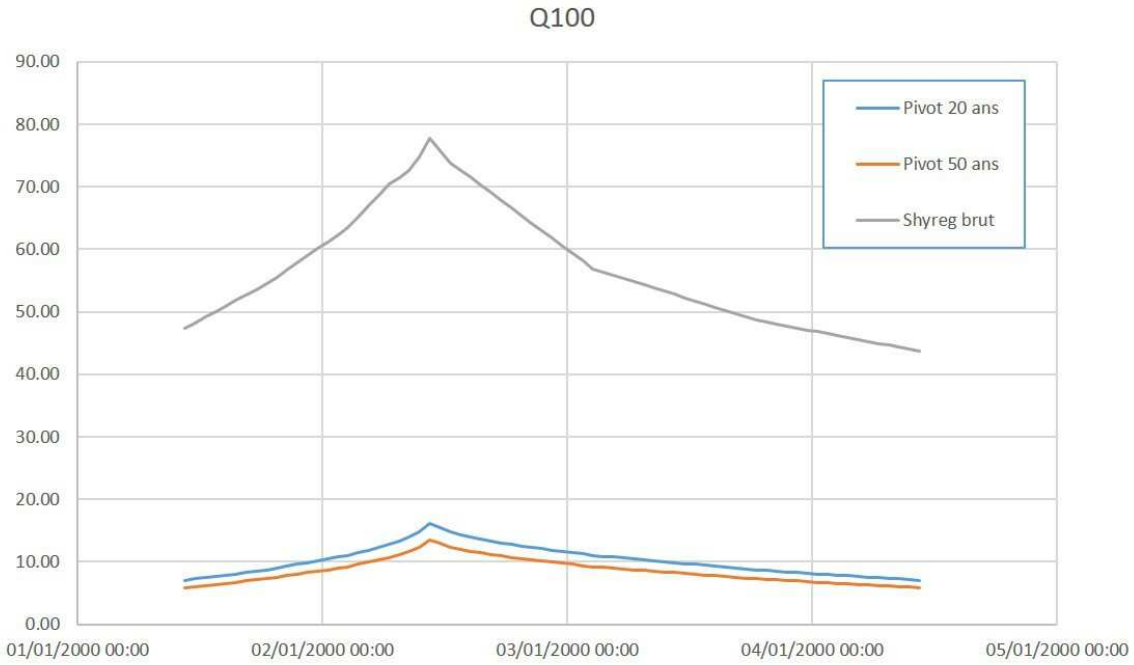


Figure 12 - Hydrogramme d'injection de la Rhônelle pour les trois configurations hydrologiques dans le cas du scénario moyen.

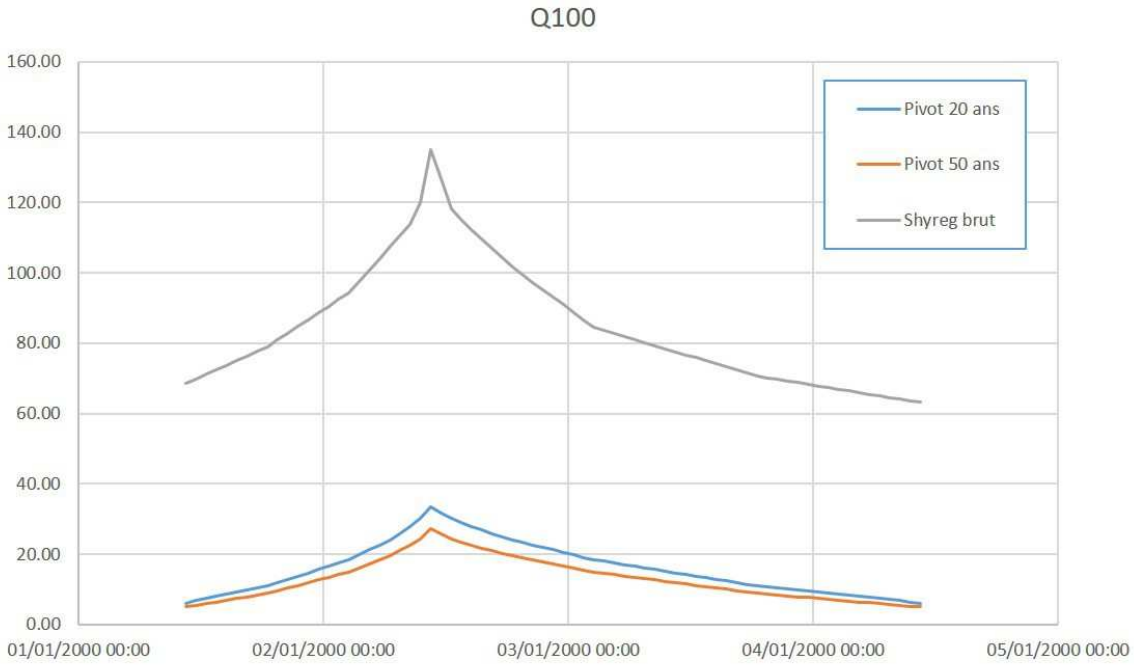


Figure 13 - Hydrogramme d'injection de la Rhônelle pour les trois configurations hydrologiques dans le cas du scénario extrême.

3.2.2 Conditions aux limites aval

Le modèle possède deux conditions aval :

- n°1 : le niveau d'eau à l'aval de la confluence entre l'Escaut et la Scarpe aval (frontière belge) ;
- n°2 : le niveau d'eau à l'aval de la confluence entre la Scarpe moyenne et le canal de dérivation de la Scarpe (à l'aval du pont de la rocade minière).

Pour la condition aval n°2, le niveau d'eau est fixé, **en accord avec VNF**, à la côte de débordement du bief amont de l'écluse de Don soit **21,98 m NGF**.

Pour la condition aval n°1, n'ayant pas à notre disposition la côte de débordement de ce bief à l'aval de la frontière belge, nous avons procédé à un calcul de capacité du bief en fonction de la hauteur d'eau sur une section proche de la frontière. La loi Q(h) donne un débit de l'ordre de 600 m³/s pour une hauteur h correspondant à une cote de **16 m NGF**. Cette hauteur est proche des points bas des berges issus du modèle numérique de terrain et, en accord avec VNF, sera le niveau d'eau retenu pour la condition aval n°1.

Dans le cadre de l'AZI (étude Sogreah), la condition aval était une loi hauteur-débit au niveau de l'écluse de Kain élaborée à partir de données de débits et hauteurs moyens journaliers de l'Escaut à Tournai entre 1999 et 2008 et des données de débits et niveaux extrêmes fournies au droit de la station de Tournai par le ministère Wallon. Les données hauteur-débit récoltées dans l'étude Sogreah sont en accord avec la condition aval utilisée.

Il est difficile d'établir la période de retour associée à la condition aval n°2. L'étude hydraulique du TRI de Lens pourrait donner des informations qui permettraient une estimation de la période de retour correspondant à la cote retenue.

Concernant la cote de la condition aval n°1, la période de retour associée est de l'ordre de la crue exceptionnelle.

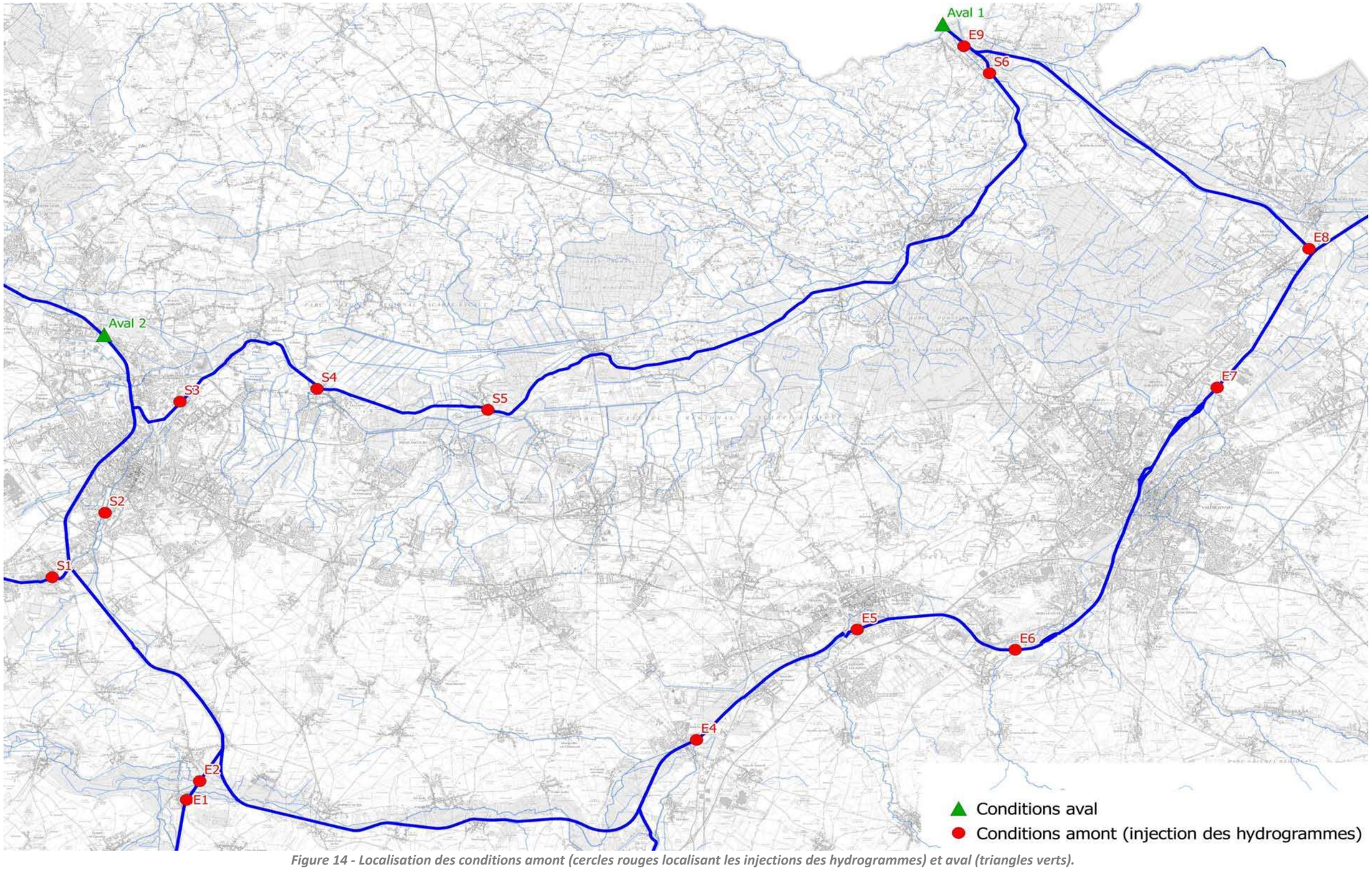


Figure 14 - Localisation des conditions amont (cercles rouges localisant les injections des hydrogrammes) et aval (triangles verts).

3.3 Hypothèses de modélisation

3.3.1 Profils en travers – manque de données

Comme indiqué dans la partie 2.2.1, des tronçons de la Scarpe moyenne, du canal de la Sensée et du canal de dérivation n'ont pas de données bathymétriques disponibles.

Les profils en travers de ces secteurs ont donc été réalisés sous les hypothèses suivantes :

- **profils trapézoïdaux** ;
- cote du fond CF : **CF = NNN – (mouillage théorique)**

où :

- NNN : niveau normal de navigation (m NGF) fournis par VNF;
- mouillage théorique = 4,20 m pour les voies à grand gabarit (Sensée, canal de dérivation de la Scarpe) ;
- mouillage théorique = 2,20 m pour les voies à petit gabarit (Scarpe moyenne) .

A noter que cette hypothèse sur la cote de fond peut conduire à des incohérences avec les cotes radier de certains ouvrages (vannes d'écluses). La cote de fond est alors corrigée afin de respecter une cote inférieure à la cote radier de l'ouvrage considéré.

3.3.2 Ouvrages sans données

La partie 2.2.3 fait état de 5 écluses pour lesquelles il n'existe pas de dossiers d'ouvrages et aucuns levés de géomètre n'ont été fournis.

Les dimensions géométriques des bassins de ces écluses ont alors été relevées à l'aide de vues satellites.

Pour l'écluse de **Thun**, les dimensions du barrage, sa cote radier ainsi que sa cote supérieure de déversement ont été fournies par VNF.

Pour l'écluse de **Fort de Scarpe**, étant donnée l'hypothèse d'un débit constant transitant par cette écluse, cette dernière est modélisée par une simple vanne à débit fixé à 1 m³/s dont la cote radier est égale à la cote du fond du bief amont.

Les écluses de **Goeulzin, Courchelettes et Douai** ne possèdent pas de barrages. Ces écluses sont donc modélisées à l'aide de vannes aux dimensions géométriques relevées par vues satellites représentant les portes des bassins.

3.3.3 Gestion des écluses

Conformément aux informations transmises par VNF concernant la gestion de leur ouvrages en cas de crue, nous considérerons :

- **qu'aucune bassinée n'est réalisée** (portes des écluses totalement fermées) ;
- **les barrages sont totalement ouverts** (vannes ouvertes et clapets abaissés).

Les écluses de Goeulzin, Douai et Courchelettes sont totalement fermées, conformément aux consignes transmises par VNF.

3.4 Analyse de sensibilité

Cette partie présente l'analyse de sensibilité du modèle aux configurations hydrologiques proposées par DHE (3 configurations) et aux coefficients de seuils des ouvrages (seuils des barrages-éclusés) et des berges.

3.4.1 Les configurations hydrologiques

Comme décrit dans la partie 2.2.4.2, **trois configurations hydrologiques ont été fournies par le bureau d'étude DHE** :

- C1 : données Shyreg avec des coefficients correctifs basés sur un point pivot à 50 ans ;
- C2 : données Shyreg avec des coefficients correctifs basés sur un point pivot à 20 ans ;
- C3 : données Shyreg brutes .

Les valeurs des coefficients correctifs des trois configurations hydrologiques C1 à C3 sont données dans le tableau ci-dessous.

	Escaut			Scarpe amont			Scarpe aval		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
Q10	0.61	0.61	-	0.75	0.75	-	0.69	0.69	-
Q100	0.53	0.64	-	0.87	0.87	-	0.52	0.61	-
Q1000	0.66	0.82	-	0.62	0.62	-	0.53	0.62	-

Les hydrogrammes sont fournis en annexes.

Ces trois configurations ont été simulées pour les trois occurrences de crue considérés dans l'étude (T=10, 100 et 1000 ans).

L'influence de la configuration hydrologique a été analysée en terme de niveaux d'eau au sein des biefs et d'emprise des zones inondées. L'analyse de sensibilité du modèle à la configuration hydrologique a été réalisée avec les coefficients de seuil (intervenant dans les lois hauteur-débit pour calculer les déversements) suivants :

- ouvrages (seuils des écluses) : C_s = 0,85 ;
- berges : C_b=0,7.

Une description de ces coefficients et une analyse de sensibilité du modèle à ces derniers est donnée dans la partie suivante.

Les graphiques suivants illustrent l'influence de la configuration hydrologique simulée sur les niveaux d'eau pour deux points de contrôle :

- au niveau de Vred pour la Scarpe aval ;
- à l'aval immédiat de l'écluse de Valenciennes pour l'Escaut .

L'influence de la configuration hydrologique sur les niveaux d'eau sur l'ensemble du réseau modélisé est disponible sur les cartes fournies en Annexe pour chacun des scénarios de crue.

Nota : le niveau d'eau peut être inférieur au NNN (niveau normal de navigation) du bief concerné, étant donné l'hypothèse d'ouverture totale des barrages-éclusés. Dans ce cas, cela signifie que le bief est capable d'évacuer la crue et que son niveau d'eau réel est alors le NNN.

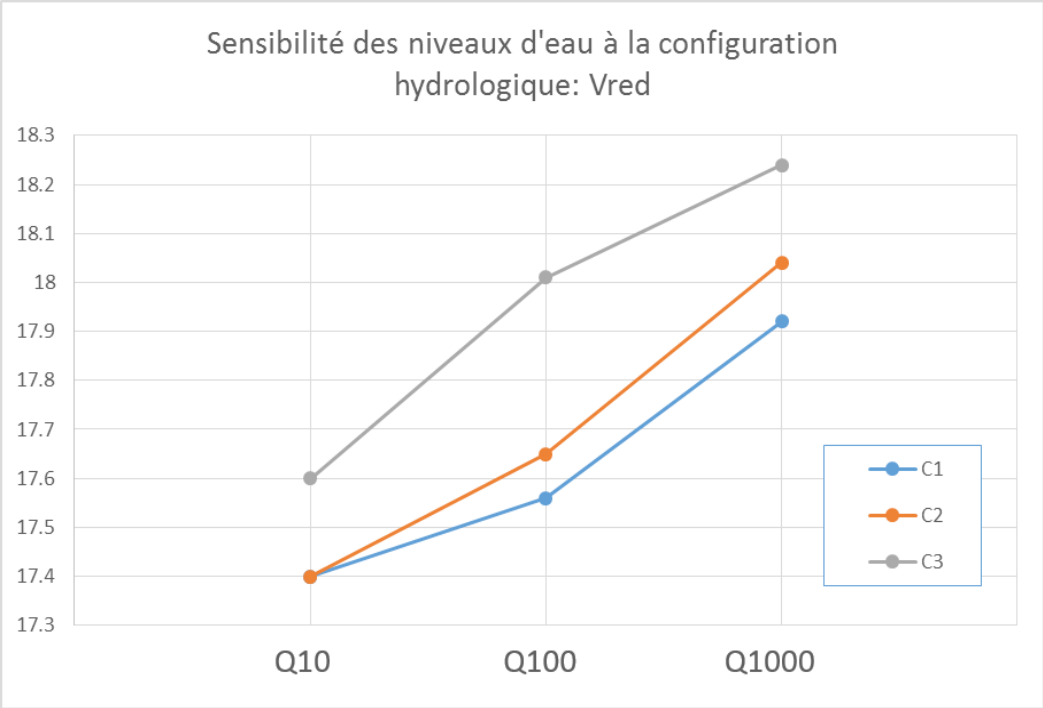


Figure 15 - Influence de la configuration hydrologique (C1, C2 et C3) sur les niveaux d'eau au droit de Vred pour les scénarios fréquent, moyen et extrême

Les graphiques des figures 15 et 16 montrent que si pour le scénario fréquent (Q10), les configurations hydrologiques C1 et C2 (coefficients correctif avec un point pivot 50 ans et 20 ans) donnent des niveaux d'eau semblables, la configuration C2 implique une augmentation du niveau d'eau entre 10 cm et 30 cm pour les scénarios moyen et extrême (Q100 et Q1000) pour les deux points de contrôles illustrés.

La configuration hydrologique C3 (débits Shyreg sans coefficients correctifs) implique quant à elle une forte augmentation des niveaux d'eau par rapport aux deux premières configurations (jusqu'à 1 m) quelque soit le scénario de crue considéré.

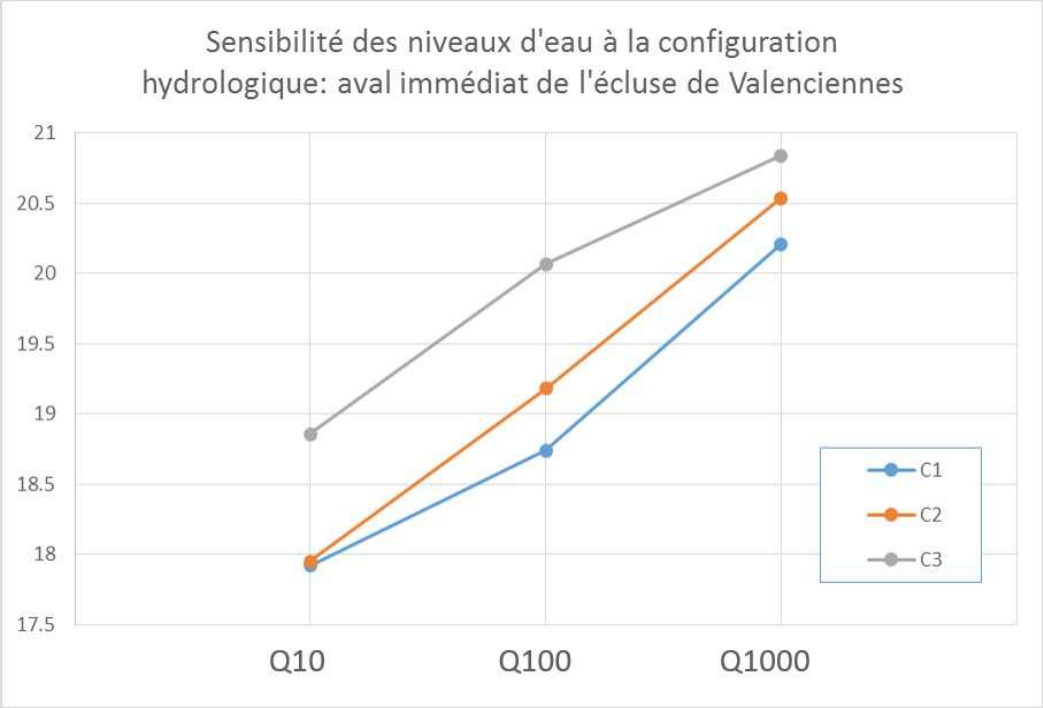


Figure 16 - Influence de la configuration hydrologique (C1, C2 et C3) sur les niveaux d'eau à l'aval immédiat de l'écluse de Valenciennes pour les scénarios fréquent, moyen et extrême

La figure suivante illustre l'influence de la configuration hydrologique sur les emprises des zones inondées sur deux secteurs :

- la Scarpe moyenne au niveau de Douai ;
- la confluence entre l'Escaut et le canal de Condé-Pommeroeul.

L'influence de la configuration hydrologique en termes d'emprises des zones inondées cartographiée sur l'ensemble du territoire est disponible en Annexe pour le scénario extrême (Q1000).

Nous avons vu que la configuration hydrologique la moins, respectivement la plus pénalisante en termes de niveau d'eau est C1, respectivement C3. Ces configurations impliquent logiquement des emprises de zones inondées respectivement la plus limitée (C1) et la plus étendue (C3) (Cf. figure 17).

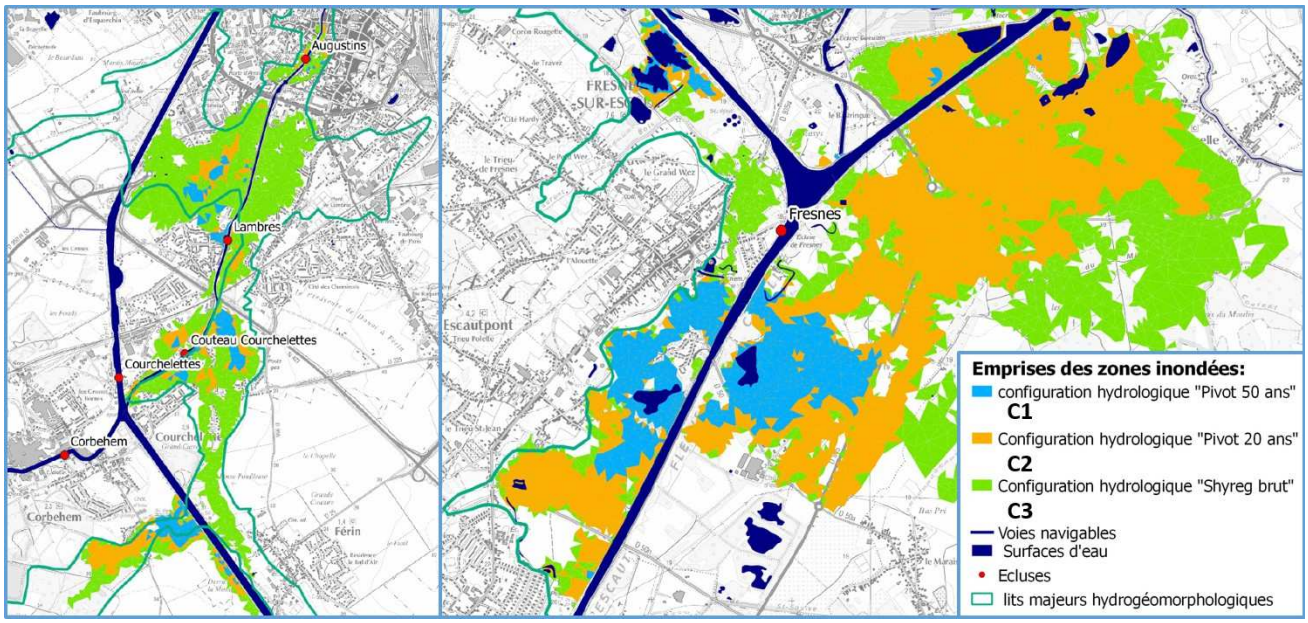


Figure 17 - Influence de la configuration hydrologique (C1, C2 et C3) sur les emprises des zones inondées pour le scénario extrême au niveau de la Scarpe moyenne (à gauche) et de la confluence entre l'Escaut et le canal de Condé-Pommeroeul (à droite)

La configuration C3 n'a pas réellement de sens d'un point de vue hydrologique et est donc écartée. Concernant les configurations C1 et C2, ces dernières diffèrent sur le temps de saturation du bassin. La configuration C1 considère un bassin versant qui sature à partir d'une période de retour de 50 ans qui peut paraître excessif. Les services de l'État ont considéré préférable de choisir la configuration C2 correspondant à une saturation du bassin pour des période de retour de l'ordre de 20 ans.

Cette configuration permet de maximiser l'emprise des territoires inondés, ce qui va dans le sens de la sécurité en termes de gestion des risques.

Dans la suite, les simulations sont réalisées dans la configuration hydrologique C2 – point pivot hydrologique choisi à 20 ans.

3.4.2 Paramètres du modèle

Une analyse de sensibilité du modèle aux paramètres de coefficients de seuils a été réalisée. Cette analyse a concerné les coefficients de seuils C_s pour les ouvrages (barrages-éclusés) ainsi que les coefficients de déversement C_b pour les berges (déversement par dessus les berges lorsque le niveau d'eau atteint la cote de la berge).

Ces coefficients interviennent dans les lois reliant le débit à la hauteur de l'écoulement à l'amont et à l'aval du seuil ou de la berge. La gamme de valeurs usuelles pour le coefficient d'ouvrages déversants tels les seuils des barrages éclusés est comprise entre 0,4 et 0,6 (correspondant à des valeurs comprises entre 0,56 et 0,85 pour les coefficients de la littérature anglo-saxonne utilisés dans le logiciel ICM) pour les seuils frontaux profilés et des valeurs supérieures pour des ouvrages mal profilés. Concernant le coefficient de déversement des berges, la littérature préconise des valeurs comprises entre 0,16 (pour des berges naturelles) et 0,4 (pour des berges en béton), soit des valeurs de la littérature anglo-saxonne comprises entre 0,7 et 1,8 (valeurs

considérées dans le logiciel ICM).

Trois jeux de coefficients ont été simulés afin d'analyser la sensibilité du modèle à ces derniers :

- Coeffs 1 : C_s = 0,85 et C_b = 0,7 ;
- Coeffs 2 : C_s = 0,6 et C_b = 0,7 ;
- Coeffs 3 : C_s = 0,56 et C_b = 1 .

Il est difficile d'interpréter l'influence de ces coefficients sur les niveaux d'eau des différents biefs du secteur d'étude, étant donné que leur impact sera différent pour chacun des barrages-éclusés munis d'un clapet. En effet, la loi de seuil au niveau de ces ouvrages relie le débit à la hauteur d'eau à l'amont de l'ouvrage. Or, tous les seuils ne sont pas forcément mis en charge notamment pour le scénario fréquent où la hauteur d'eau, à l'amont du seuil, peut fortement changer d'un bief à l'autre.

Aussi, il est préférable d'analyser l'impact du changement de coefficient de seuil sur l'emprise des zones inondées. La figure présente les emprises des zones inondées dans le cas du scénario extrême, pour chacun des jeux de coefficients, pour les secteurs de Douai et de Valenciennes. Si les coefficients de seuils (ouvrages et berges) n'ont pas d'influence sur l'emprise des zones inondées par débordement de la Sensée ou de l'Escaut amont (jusqu'à Douchy-les-Mines), on constate en revanche qu'ils peuvent avoir un impact parfois important sur les surfaces des zones inondées, comme notamment dans les secteurs de Valenciennes et de Douai (Cf. figure 18). Dans ces secteurs, la modification du coefficient de seuil des ouvrages impliquent une augmentation des niveaux d'eau ayant pour conséquence des débordements plus importants aux niveaux des points bas des berges (comparaison des emprises bleu et orange). Sur le secteur de Valenciennes, la modification du coefficient de seuil des berges (comparaison des emprises orange et verte) implique une extension de la zone inondée.

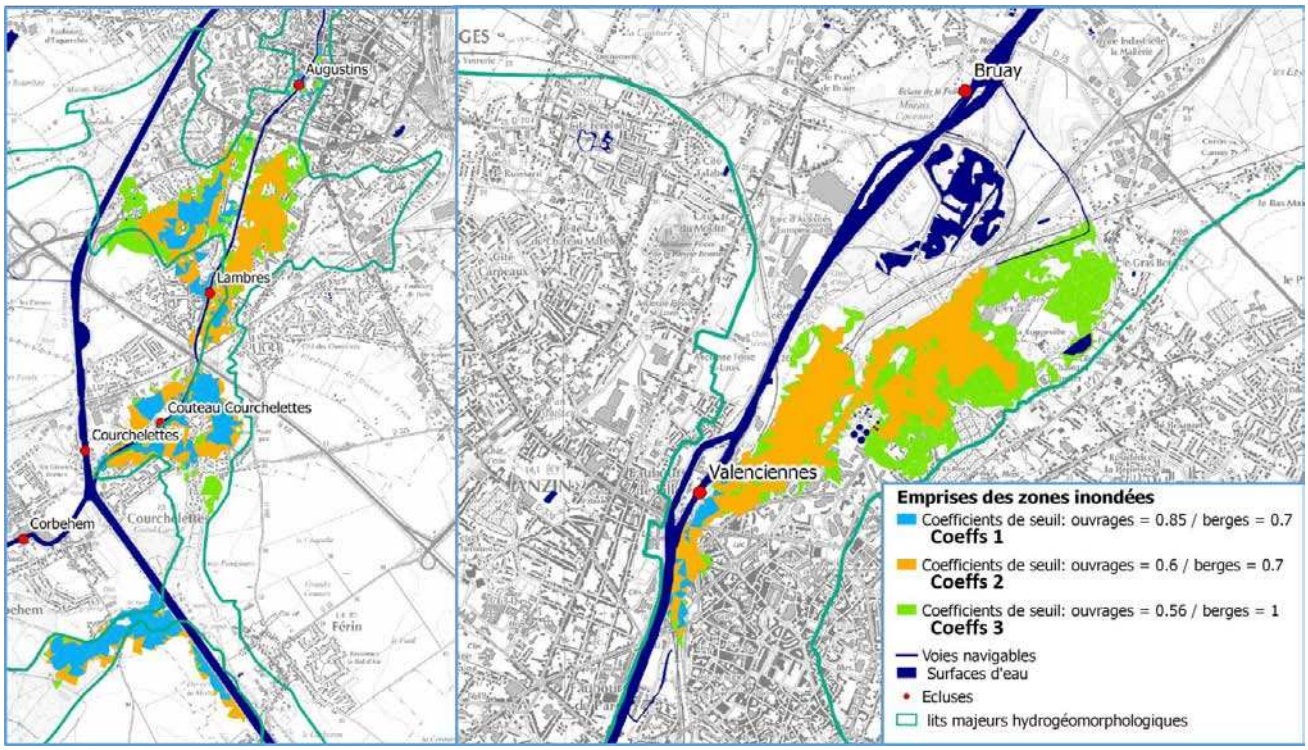


Figure 18 - Emprises des zones inondées (scénario extrême) pour les trois jeux de coefficients (Coeffs 1, Coeffs 2 et Coeffs 3) pour le secteur de Douai (à gauche) et Valenciennes (à droite)

La valeur de 0,85 pour le coefficient de seuil des ouvrages correspond aux valeurs supérieures de la gamme usuelle, qui sont favorables à l'écoulement (seuils en bon état, matériaux relativement lisses). L'objectif étant d'établir les zones potentiellement inondables, il est préférable d'un point de vue sécuritaire de retenir la valeur de 0,56, qui implique des lignes d'eau plus élevées et par conséquent des débordements plus importants. Étant donné l'impossibilité de caler les coefficients d'ouvrages à partir de données historiques, nous retiendrons donc 0,56 qui reste dans la gamme des valeurs usuelles décrites dans la littérature.

En revanche, le choix du coefficient de déversement des berges ne pouvant être basé sur des emprises de zones inondées historiques non disponibles (valeurs dans la littérature anglo-saxonne comprises entre 0,7 et 1,2), les services de l'État ont pris le parti d'opter pour la valeur 1, plus pénalisante en termes d'inondations, dans une optique de sécurité d'un point de vue gestion du risque.

Nota : les emprises des zones inondées à l'aval de l'écluse de Lambres (Cf. figure 18, image de gauche) sont les conséquences de points bas des lignes de berges dont la cote est inférieure à la cote de débordement du dossier d'ouvrage de l'écluse de Lambres. Ces points bas issus du MNT ont été relevés à la cote de premier débordement du bief issue du dossier d'ouvrage dans la suite.

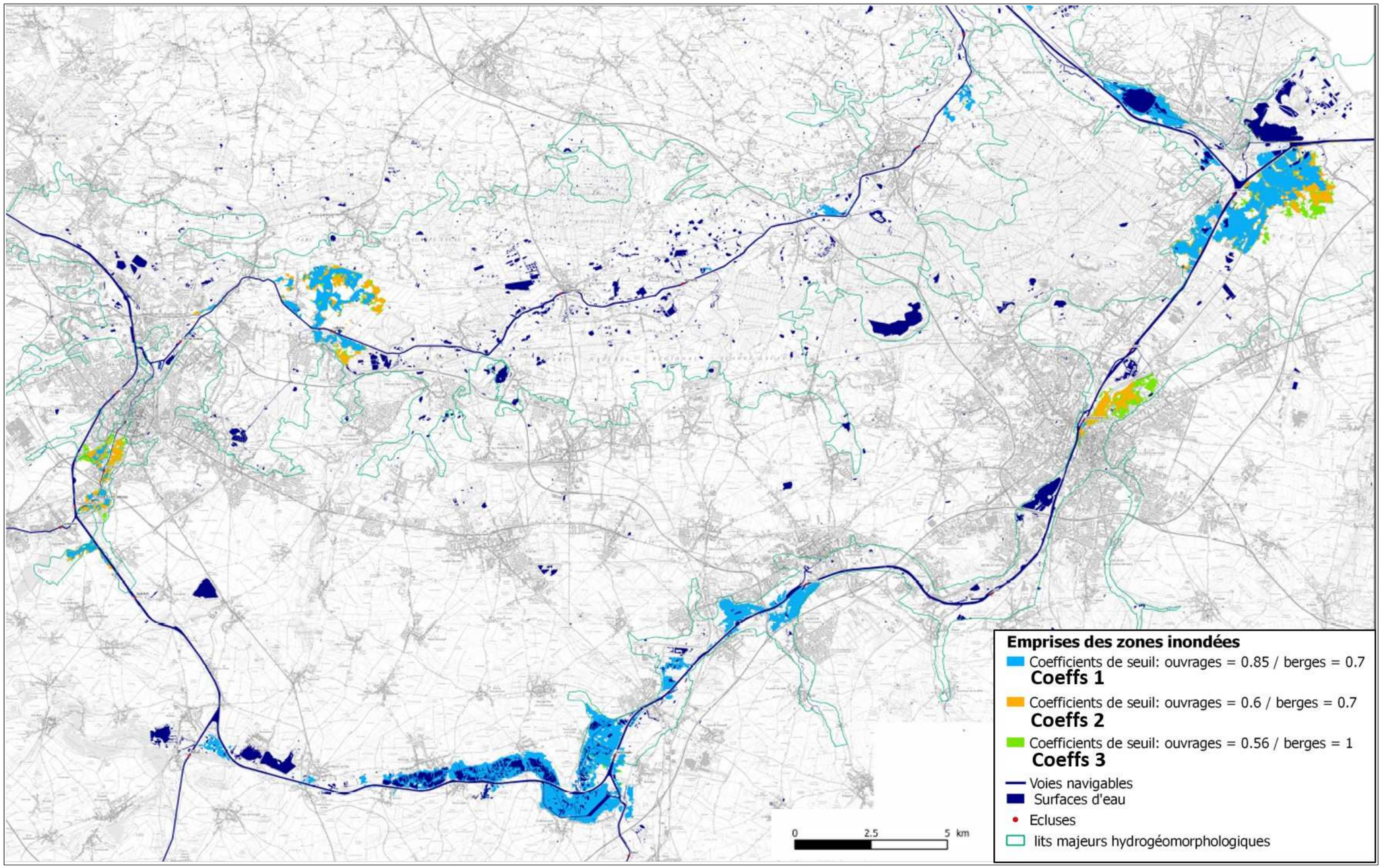


Figure 19 - Emprise des zones inondées pour trois jeux de coefficients de seuils (Coeffs 1, Coeffs 2 et Coeffs 3) dans le cas du scénario extrême (Q1000)

Les paramètres ainsi que la configuration hydrologique retenus pour la production des cartes de surfaces inondables sont donc :

- **Configuration hydrologique C2** correspondant aux données Shyreg avec des coefficients correctifs basés sur un point pivot à 20 ans ;
- **Jeu de coefficients 3**, à savoir un coefficient de seuil des ouvrages fixé à 0,56 et un coefficient de seuil des berges fixé à 1.

3.5 Vérification des résultats du modèle hydraulique

Les éléments de calage du modèle sont peu nombreux étant donné le caractère navigable des cours d'eau modélisés et leur gabarit, ainsi que l'absence d'éléments historiques faisant état de zones inondées clairement définies comme conséquences du débordement de la Scarpe aval ou de l'Escaut.

Aussi, les résultats des simulations sont comparés à des éléments réels disponibles tels que:

- les cotes de premier débordement pour les biefs disposant d'un dossier d'ouvrage ;
- la cohérence des résultats avec le niveau normal de navigation (NNN) ;
- les limites du lit majeur hydrogéomorphologique pour le scénario extrême.

Le tableau 3.4 compare les cotes de premier débordement simulées des biefs pour lesquels un dossier d'ouvrage existe avec les cotes de premier débordement théoriques (VNF). Ces biefs sont localisés sur la Scarpe moyenne et l'Escaut, aucun dossier d'ouvrage n'existant à ce jour pour les écluses de la Scarpe aval.

Excepté pour le bief situé à l'amont de l'écluse de Denain pour lequel l'écart entre la cote de débordement simulée et théorique est supérieure à 20 cm (la cote théorique est cependant une estimation d'après le dossier d'ouvrage), les écarts pour les autres biefs sont de l'ordre de 15 cm pour la Scarpe moyenne et inférieurs à 10 cm pour l'Escaut. Ces écarts sont satisfaisants étant donnée la précision du MNT disponible dans ces secteurs qui est de l'ordre de 20 cm.

Voie navigable	Bief	Cote de premier débordement (m NGF) - dossier d'ouvrage -	Localisation (dossier d'ouvrage)	Cote de premier débordement simulée (m NGF)	Ecart cote simulée / cote théorique (cm)	Remarques
Scarpe moyenne	Couteau amont	30.69	stade de foot de Courchelettes	30.52	-17	Ecart de l'ordre de 15 cm, acceptable étant donné la précision des données topographiques
	Lambres amont	27.69	amont immediat ecluse lambres	27.69	0	les berges présentaient de nombreux points bas jusqu'à 60 cm inférieurs à la cote de premier débordement, en accord avec les services de l'Etat, ces points bas ont été relevés jusqu'à 27,69 m NGF
	Augustins amont	25.44	RD amont barrage	25.58	14	Ecart de l'ordre de 15 cm, acceptable étant donné la précision des données topographiques
Escaut	Pont-Malin amont	35.14	au niveau berges bras paillancourt	35.12	-2	Ecart inférieur à 10 cm
	Denain amont	31.07	estimation	31.32	25	Ecart supérieur à 20 cm. La cote de débordement théorique est une estimation (dossier d'ouvrage), il n'y a pas de certitude sur cette valeur
	Trith amont	27.44	amont ecluse RD quartizer le marais	-		Le niveau d'eau reste inférieur à 27 m NGF sur ce bief, il n'y a donc pas de débordement
	Valenciennes amont	23.18	(RG au droit bat vert gazon)	23.21	3	Ecart inférieur à 10 cm
	Bruay amont	21.35	RG amont ecluse	-		Le niveau d'eau reste inférieur à 21 m NGF sur ce bief, il n'y a donc pas de débordement
	Fresnes amont	17.62	amont immediat ecluse	17.7	8	Ecart inférieur à 10 cm

Tableau 3.4 - Comparaison des cotes de débordement simulées avec les cotes de débordement théoriques pour les biefs munis d'un dossier d'ouvrage

Pour les biefs ne disposant pas de dossier d'ouvrage, et donc pas de cote de débordement connue, les débordements simulés sont vérifiés à partir des données topographiques disponibles :

- MNT du CG59 (mailles de 5 m avec une précision d'environ 20 cm) ;
- LIDAR Scarpe aval (mailles d' 1 m avec une précision inférieure à 10 cm).

L'exemple ci-dessous concerne des débordements de la Scarpe aval ayant lieu aux abords des communes d'Anhiers et de Lallaing. La figure illustre les débordements simulés dans le cas du scénario extrême. On constate la présence de 4 points de débordements importants (numérotés de 1 à 4).

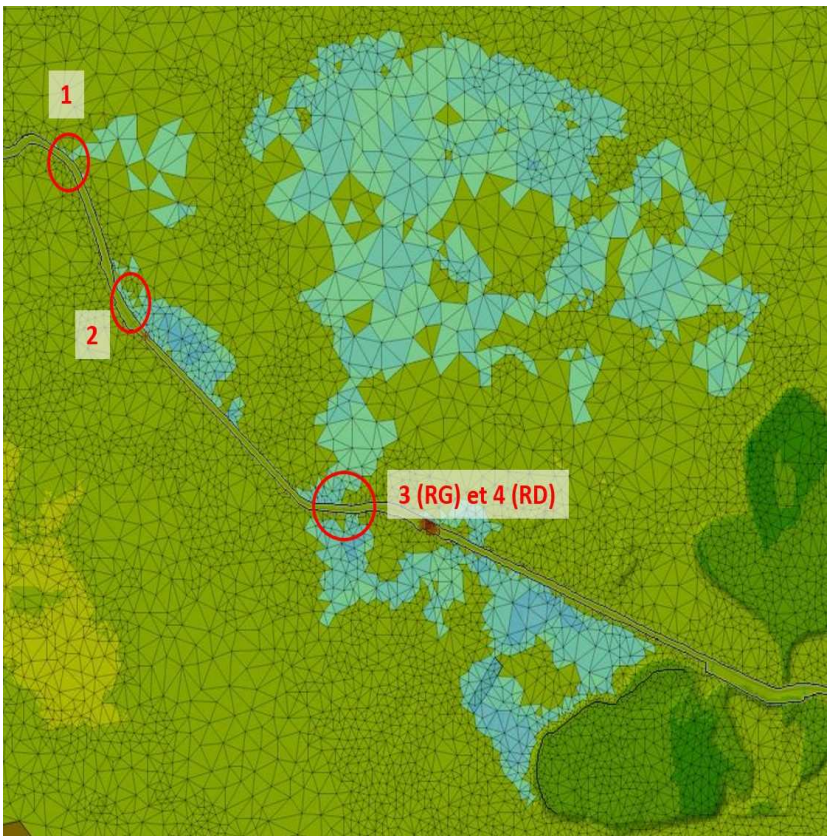


Figure 20 - Débordements simulés dans le cas du scénario extrême aux abords des communes de Lallaing et d'Anhiers

Ces points bas, à l'origine des débordements, ont été vérifiés à l'aide d'une visualisation des MNT permettant de faire ressortir les secteurs dont l'altitude est inférieure au niveau d'eau simulé atteint lors du premier débordement.

Sur ce bief situé à l'amont de l'écluse de Lallaing, le niveau d'eau simulé (dans le cas du scénario extrême) lors du premier débordement est de 19,82 m NGF. Une visualisation du MNT (LIDAR Scarpe aval fin) avec des seuils d'altitude de 19,8 m NGF et 19,9 m NGF permettent de mettre en exergue les points dont l'altitude est comprise entre ces deux valeurs, c'est à dire proche de la cote d'eau étant donné la précision du MNT de l'ordre de 10 cm. La figure suivante montre ainsi ces zones (en rouge) et permet de retrouver les 4 points bas à l'origine des débordements. Ces points bas du MNT fin (LIDAR Scarpe aval) se retrouvent également sur le MNT du CG59.

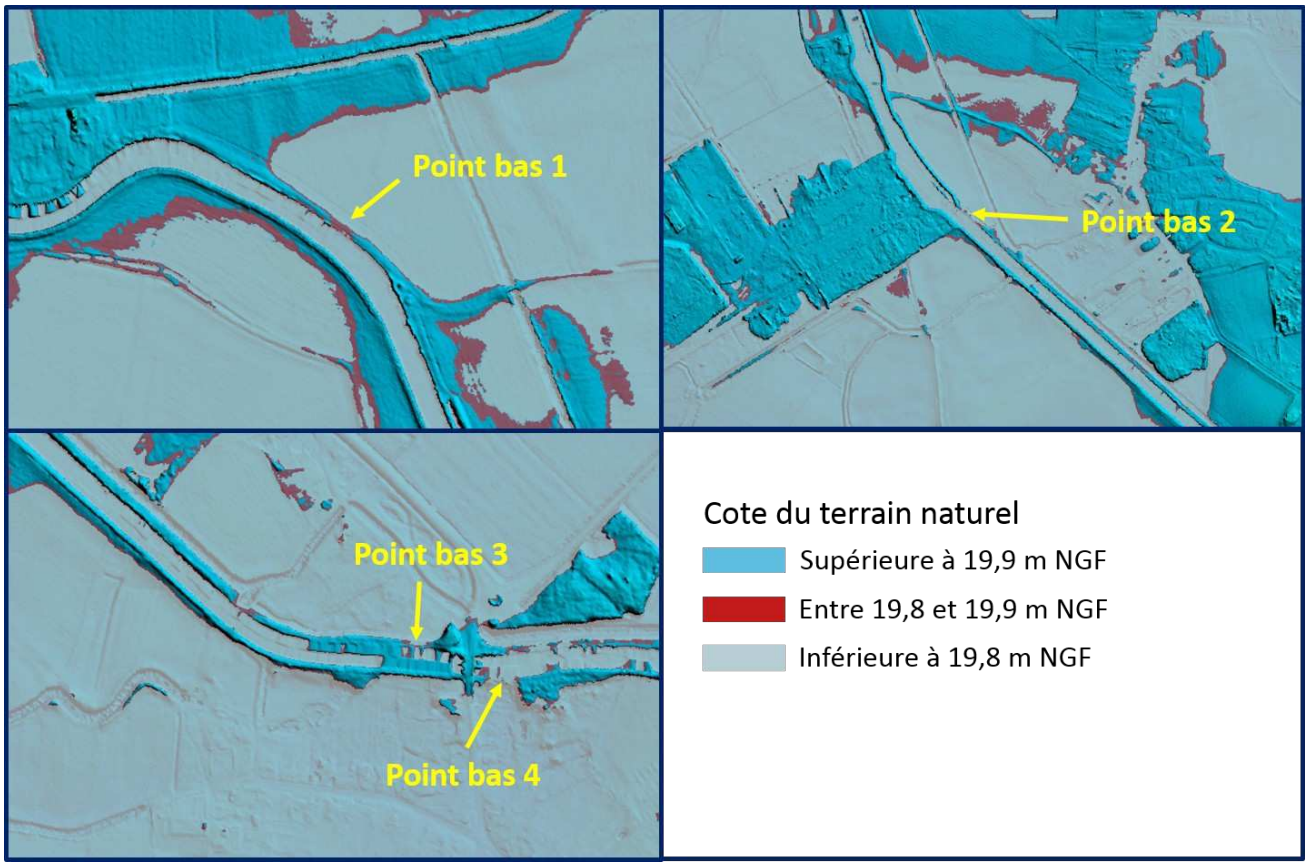


Figure 21 - Vérification des points bas des berges à l'origine des débordements aux abords des communes de Lallaing et d'Anhiers sur le LIDAR Scarpe aval

Ces deux MNT (LIDAR fin et LIDAR du CG59) ont été produits de manière distincte, aussi, leur concordance dans la mise en exergue de ces points bas permet de confirmer la présence de points bas sur ces secteurs qui nécessiteraient des levés de géomètres.

Une analyse similaire a été réalisée pour les différents débordements des biefs et a permis de valider, en considérant la précision du MNT de l'ordre de 20 cm (pour l'Escaut, la Sensée et la Scarpe moyenne), l'occurrence de ces derniers au niveau de points bas des berges.

Dans le cas du scénario extrême, la cohérence des emprises inondées avec les limites des lits majeurs hydro-géomorphologiques déterminés dans le cadre de la Phase 2 est vérifiée, en gardant à l'esprit que ces limites sont basées sur une approche naturaliste ne prenant pas en compte l'anthropisation des vallées. Aussi, il est possible d'obtenir des surfaces inondées extérieures à la limite du lit majeur hydro-géomorphologique sur certains secteurs (notamment pour la Scarpe moyenne pour laquelle les interventions humaines ont été nombreuses lors des siècles derniers).

Les figures suivantes illustrent la cohérence des zones inondées avec les limites des lits majeurs hydrogéomorphologiques dans le cas du scénario extrême. La figure 22 concerne le secteur de Courchelettes pour lequel on observe une zone inondée située à l'extérieur de l'emprise hydrogéomorphologique (EHGM), représentée par le trait vert. Cette divergence dans ce secteur n'est pas surpenante, étant donné les interventions humaines historiques . Le remaniement historique de la Scarpe moyenne est effectivement

visible sur cette figure au niveau de Lambres-Lez-Douai où le lit mineur de la Scarpe moyenne se situe en dehors de l'enveloppe hydrogéomorphologique. La figure 23 montre quant à elle le secteur de Douchy-les-Mines pour lequel la zone inondée atteint la limite du lit majeur de l'Escaut au niveau de la confluence avec la Selle.

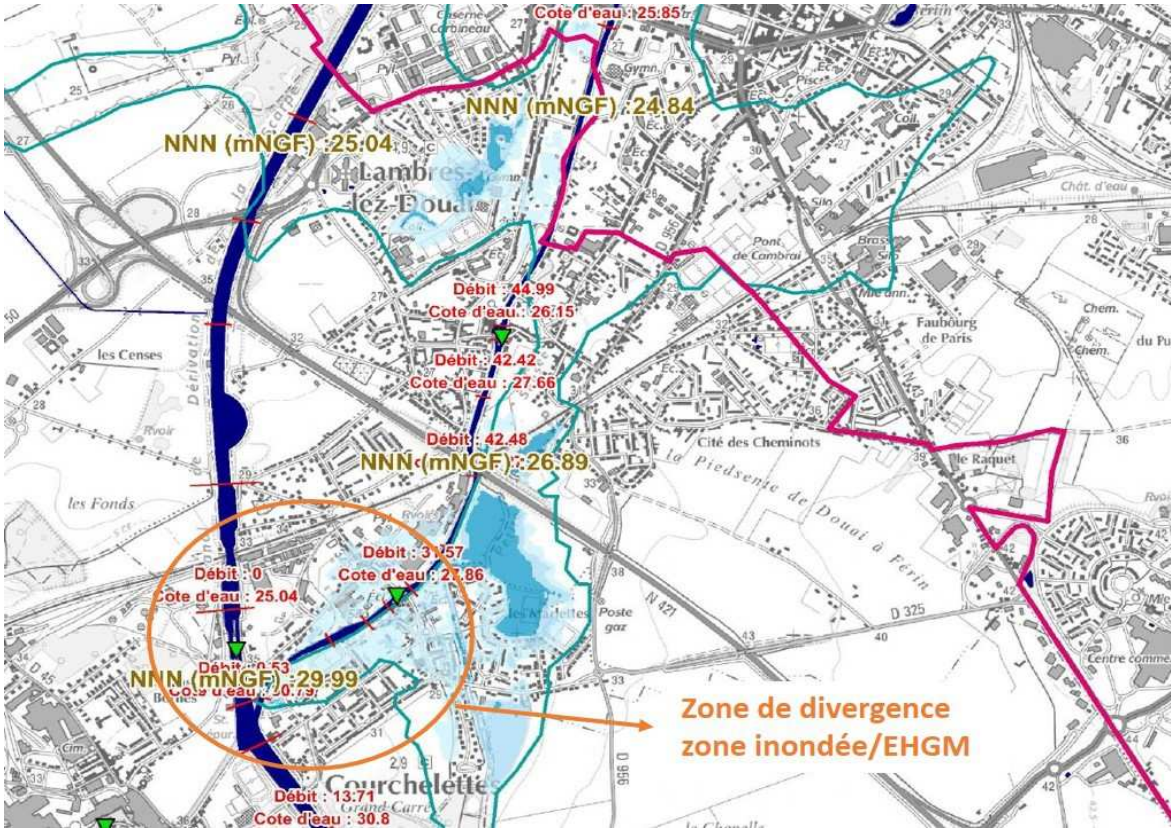


Figure 22 - Vérification de la cohérence entre les zones inondées et l'enveloppe hydrogéomorphologique - secteur de Courchelettes -

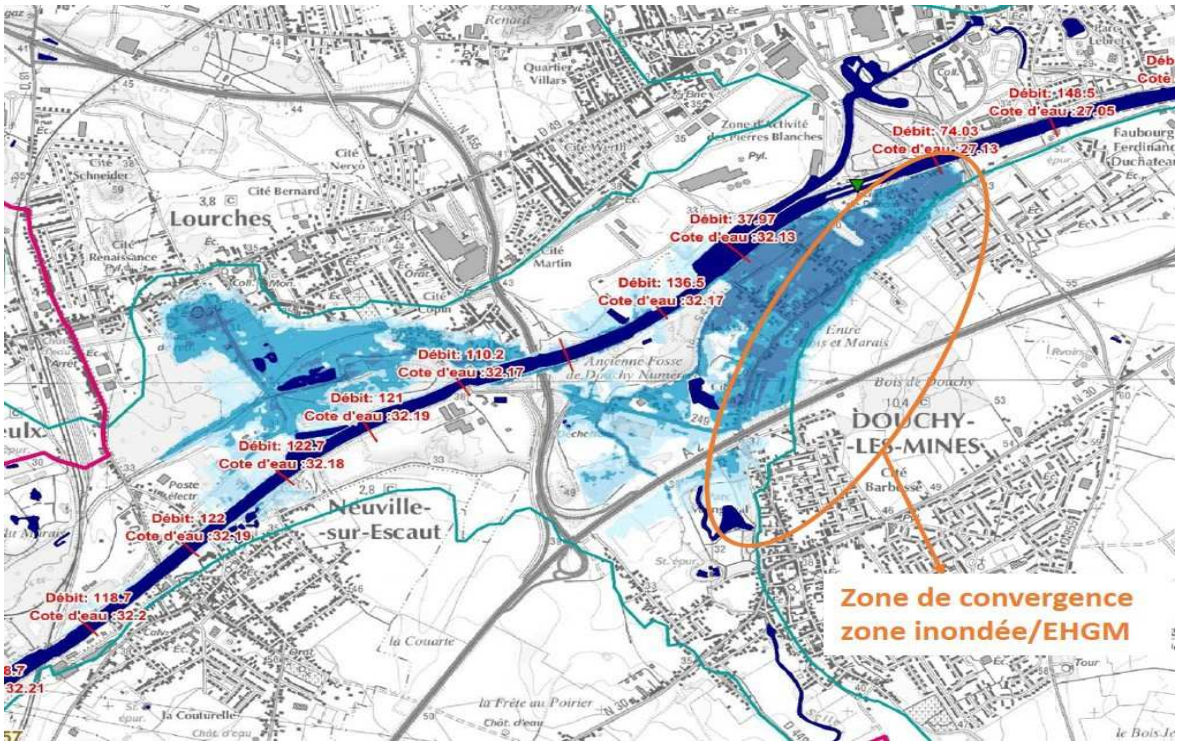


Figure 23 - Vérification de la cohérence entre les zones inondées et l'enveloppe hydrogéomorphologique - secteur de Douchy-les-Mines -

3.6 Les limites de l'approche et les améliorations à envisager

Il est important de rappeler que les cartes des surfaces inondables sont directement liées à la précision du modèle hydraulique. Les résultats de ce dernier sont ainsi limités par la qualité des données utilisées que ce soit :

- dans la construction du modèle (données topographiques, bathymétriques, d'ouvrages) ;
- dans les conditions aux limites (conditions amont – l'hydrologie- et aval) ;
- dans le calage du modèle (données historiques).

Les données topographiques ont une précision de 20 cm environ pour le MNT CG59 et de 10 cm environ pour le MNT plus fin dont l'emprise se limite à la Scarpe aval. A noter que cette précision est fonction du couvert végétal présent lors des prises de vues. Ainsi, le MNT du CG 59, censé représenté le terrain nu, présentait des erreurs de filtrages (végétation conservée dans le MNT au niveau des cultures et des zones arborées). La majorité de ces erreurs a été corrigée selon la méthode présentée ci après, cependant il n'est pas impossible que des erreurs soient restées, notamment dans les secteurs arborés de faible superficie (ripisylve notamment).

Les zones présentant des erreurs de filtrage ont été identifiées visuellement sur les emprises hydro-géomorphologiques à l'aide d'une visualisation ombrée du MNT et de la représentation des pentes. La figure suivante illustre un secteur proche de la commune de Vred pour lequel des champs non filtrés ont été identifiés.

Figure 24 - Détection de zones de végétation non filtrées

Les semis de points altimétriques de ces secteurs identifiés (en rouge sur l'image de droite de la figure précédente) sont supprimés du MNT. Les vides sont alors complétés par une méthode d'interpolation avec les points voisins. Un illustration du MNT après filtrage est donnée dans la figure suivante. Cette méthode permet de supprimer les erreurs étendues, visibles, en revanche il est plus délicat de corriger les erreurs sur des secteurs plus restreints.

Figure 25 - Filtrage des secteurs de végétation du MNT

Le LIDAR « Scarpe » peut également contenir ce genre d'erreur, difficile a quantifier sans disposer de données de contrôle fiables et étendues (levés géomètres terrestres notamment). Il existe donc une réelle incertitude sur la cote précise de débordement des biefs, notamment dans le cas de berges couvertes par de la végétation.

Les données bathymétriques n'ont pu être récupérées sur l'ensemble du réseau navigables modélisé. Certains tronçons de la Scarpe moyenne et du canal de dérivation de la Scarpe ont du faire l'objet d'hypothèse quant aux profils en travers. Concernant la Scarpe aval, les profils en travers sont issus du modèle Sogreah de l'AZI Scarpe aval mais ont nécessité une géolocalisation qui induit une imprécision sur leur position.

L'analyse hydrologique, étant donné la complexité du réseau hydrographique secondaire, n'a pas pu prendre en compte les nombreux échanges de ce dernier. A cela, s'ajoute les faibles durées des chroniques de mesures fiables (seules 2 stations présentent des données exploitables sur une durée inférieure à 10 ans).

La Phase 1 de cette étude n'a pas permis d'identifier des éléments historiques sur des débordements directement imputables aux voies navigables modélisées. Ce manque de données de calage du modèle implique une vérification des résultats sur les seules informations disponibles, à savoir les cotes de débordement des biefs issus des dossiers d'ouvrages. Ces dossier d'ouvrages ne sont en revanche disponibles que pour une partie des biefs (biefs de l'Escaut et de la Scarpe moyenne).

Cette cartographie des surfaces inondables, sur des secteurs géographiques étendus, permet donc d'avoir une première identification des secteurs à risques concernant les débordements des voies navigables.

Afin de limiter les incertitudes de calcul, il conviendrait de travailler sur les axes d'amélioration suivants :

- réalisation de levés continus des hauts de berge pour limiter l'incertitude de la donnée topographique ;
- finalisation des dossiers d'ouvrage pour une meilleure connaissance des configurations des écluses et barrages ;
- fiabilisation de l'approche hydrologique pour limiter la sensibilité du calcul des hydrogrammes.

4 - Cartographie des zones inondables

4.1 Des résultats aux surfaces inondables

4.1.1 Exploitation des résultats du modèle hydraulique

L'exploitation des résultats du modèle permet d'accéder en tout point du domaine représenté aux hauteurs de submersions. Ainsi, pour chaque scénario, une carte d'iso-hauteurs d'eau est produite.

4.1.2 Méthodologie d'élaboration des cartes

Le logiciel de modélisation hydraulique utilisé (ICM) possède un module de cartographie automatique (« Flood Mapping ») qui exploite les résultats du modèle au niveau de chaque maille (niveaux maximums d'inondation en m NGF).

Ainsi, en croisant les résultats du modèle directement avec le Modèle Numérique de Terrain (MNT), il permet d'obtenir une grille couvrant toute la zone d'étude (avec un pas d'espace égal à celui du MNT soit 5 m) avec, sur chaque pixel, l'information en termes de hauteurs de submersion.

4.2 Le format des cartes de surfaces inondables

Pour chacun des TRI de Douai et de Valenciennes, 4 cartes sont produites sur fond SCAN 25 (IGN):

- 3 cartes des surfaces inondables au 1/25 000^{e} donnant les hauteurs de submersion pour :
  - le scénario fréquent (Q10) ;
  - le scénario moyen (Q100) ;
  - le scénario extrême (Q1000) ;
- 1 carte de synthèse des surfaces inondables au 1/25 000^{e}, donnant l'emprise des surfaces inondables pour chacun des scénarios de crue.

4.3 Lecture des cartes des surfaces inondables

Un zonage des surfaces inondables est appliqué en fonction des hauteurs de submersion selon les classes suivantes :

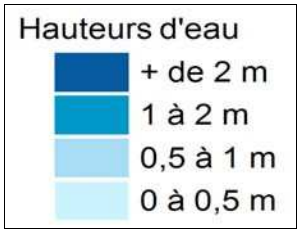


Figure 26 - Classe des hauteurs de submersion

Il s'agit des hauteurs de submersion maximales, c'est à dire le niveau d'eau maximal atteint par les eaux en chacune des mailles de calcul du modèle hydraulique. Ces hauteurs maximales ne sont pas atteintes en même temps sur tout le secteur d'étude étant donné la propagation de l'onde de crue d'amont en aval.

Pour chacun des TRI de Douai et de Valenciennes, et pour chaque scénario de crue, les cartes des surfaces inondables sont composées de :

- un bloc de « **titre** » comprenant :
  - *le nom du TRI considéré* (Douai ou Valenciennes) ;
  - *le numéro de la planche* (1/2 ou 2/2) ;
  - *le scénario de crue* (fréquent, moyen ou extrême) ;
- un bloc de « **légende** » comprenant :
  - *les éléments relatifs aux résultats de simulations hydrauliques* :
    - les classes de hauteurs de submersion ;
    - les débits et niveaux d'eau atteints par l'écoulement dans le lit mineur aux points de contrôle ;
  - *les éléments de contexte* :
    - les écluses ;
    - les niveaux normaux de navigation (NNN) en m NGF des biefs ;
    - le découpage administratif des TRI ;
    - les limites du lit majeur hydro-géomorphologique ;
  - *une vue globale du TRI et son planchage* ;
  - *l'échelle*, qui donne graphiquement la correspondance entre les distances géographiques sur le terrain et les distances sur la carte ;
- un bloc « **carte** » comprenant :
  - *la couche des hauteurs de submersion sur fond SCAN 25 ;*
  - *les surface d'eau du territoire (marais, étangs...).*

4.4 Lecture des cartes de synthèse

Les emprises des surfaces inondables sont classées en fonction du scénario de crue considéré:

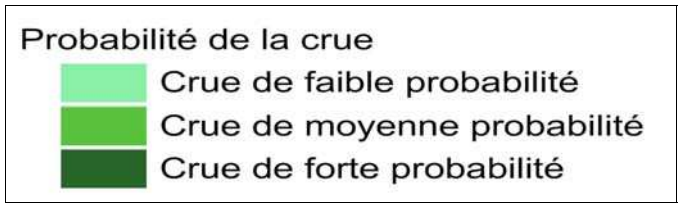


Figure 27 - Emprise des surfaces inondables pour les trois scénarios de crue: fréquent (forte probabilité), moyen(moyenne probabilité) et extrême (faible probabilité)

Pour chacun des TRI de Douai et de Valenciennes, les cartes de synthèse des surfaces inondables sont composées de :

- un bloc de « **titre** » comprenant :
  - *le nom du TRI considéré* (Douai ou Valenciennes) ;
  - *le numéro de la planche* (1/2 ou 2/2) ;
- un bloc de « **légende** » comprenant :
  - *les éléments relatifs aux résultats de simulations hydrauliques* :
    - les emprises des surfaces inondables pour les crue de faible, moyenne et forte probabilité (i.e scénario extrême, moyen et fréquent) ;
  - *les éléments de contexte* :
    - le découpage administratif des TRI ;
    - les limites du lit majeur hydro-géomorphologique ;
  - *une vue globale du TRI et son planchage* ;
  - *l'échelle*, qui donne graphiquement la correspondance entre les distances géographiques, sur le terrain, et les distances sur la carte ;
- un bloc « **carte** » comprenant :
  - *les couches des surfaces inondables pour chaque scénario de crue sur fond SCAN 25 ;*
  - *les surface d'eau du territoire.*

5 - Liste des documents fournis en annexes au rapport

5.1 Hydrologie

Les tableaux donnant les hydrogrammes de crue pour les trois configurations hydrologiques et pour les trois scenarios de crue fournis par le bureau d'étude DHE sont données en annexe dans les fichiers au format pdf suivants :

- hydrogrammes_pivot20ans.pdf ;
- hydrogrammes_pivot50ans.pdf ;
- hydrogrammes_shyreg_brut.pdf .

5.2 Analyse de sensibilité

5.2.1 Coefficients de seuils

Les cartes de résultats de l'analyse de sensibilité aux coefficients de seuil sont données en annexe dans les fichiers au format pdf suivants :

- niveaux_eau_coefficients_seuil_Q10.pdf ;
- niveaux_eau_coefficients_seuil_Q100.pdf ;
- niveaux_eau_coefficients_seuil_Q1000.pdf ;
- emprise_coefficients_seuil_Q1000.pdf .

5.2.2 Configurations hydrologiques

Les cartes de résultats de l'analyse de sensibilité aux configurations hydrologiques sont données en annexe dans les fichiers au format pdf suivants :

- niveaux_eau_configs_hydro_Q10.pdf ;
- niveaux_eau_configs_hydro_Q100.pdf ;
- niveaux_eau_configs_hydro_Q1000.pdf ;
- emprise_configs_hydro_Q1000.pdf .

5.3 Cartes des zones inondables

5.3.1 TRI de Douai

Les cartes des zones inondables pour les trois scénarios et la carte de synthèse pour le TRI de Douai sont données en annexe dans les fichiers au format pdf suivants :

- Carte_SYNTHESE_Douai_1.pdf ;

- Carte_SYNTHESE_Douai_2.pdf ;
- Douai_Scenario_Extreme_1.pdf ;
- Douai_Scenario_Extreme_2.pdf ;
- Douai_Scenario_Moyen_1.pdf ;
- Douai_Scenario_Moyen_2.pdf ;
- Douai_Scenario_Frequent_1.pdf ;
- Douai_Scenario_Frequent_2.pdf .

5.3.2 TRI de Valenciennes

Les cartes des zones inondables pour les trois scénarios et la carte de synthèse pour le TRI de Valenciennes sont données en annexe dans les fichiers au format pdf suivants :

- Carte_SYNTHESE_Valenciennes_1.pdf ;
- Carte_SYNTHESE_Valenciennes_2.pdf ;
- Douai_Scenario_Valenciennes_1.pdf ;
- Douai_Scenario_Valenciennes_2.pdf ;
- Douai_Scenario_Valenciennes_1.pdf ;
- Douai_Scenario_Valenciennes_2.pdf ;
- Douai_Scenario_Valenciennes_1.pdf ;
- Douai_Scenario_Valenciennes_2.pdf .

5.4 Éléments géométriques du modèle

5.4.1 Profils en travers

Les profils en travers du modèle hydraulique sont donnés sous forme de couche SIG (projection Lambert 93) et dont les tables contiennent le chaînage et les hauteurs d'eau. Ces couches sont fournies en annexe pour chaque scenario de crue :

- profils_travers_Q10.shp ;
- profils_travers_Q100.shp ;
- profils_travers_Q1000.shp .

5.4.2 Profils en long

Les profils en long des berges et des niveaux d'eau sont fournis pour l'Escaut, la Scarpe aval, la Scarpe moyenne et la Sensée pour chaque scenario de crue. Les profils sont donnés en annexe dans les fichiers au

format DWG compatible avec Autocad 2007 suivants :

- Pour l'Escaut :
  - escaut_pont_malin_confl_scarpe_Q10.dwg ;
  - escaut_pont_malin_confl_scarpe_Q100.dwg ;
  - escaut_pont_malin_confl_scarpe_Q1000.dwg ;
- Pour la Scarpe aval :
  - scarpe_aval_Q10.dwg ;
  - scarpe_aval_Q100.dwg ;
  - scarpe_aval_Q1000.dwg ;
- Pour la Scarpe moyenne :
  - scarpe_moyenne_FDS_Q10.dwg ;
  - scarpe_moyenne_FDS_Q100.dwg ;
  - scarpe_moyenne_FDS_Q1000.dwg ;
- Pour la Sensée :
  - sensee_goeulzin_courchelettes_Q10.dwg ;
  - sensee_goeulzin_courchelettes_Q100.dwg ;
  - sensee_goeulzin_courchelettes_Q1000.dwg ;
  - sensee_goeulzin_pont_malin_Q10.dwg ;
  - sensee_goeulzin_pont_malin_Q100.dwg ;
  - sensee_goeulzin_pont_malin_Q1000.dwg .