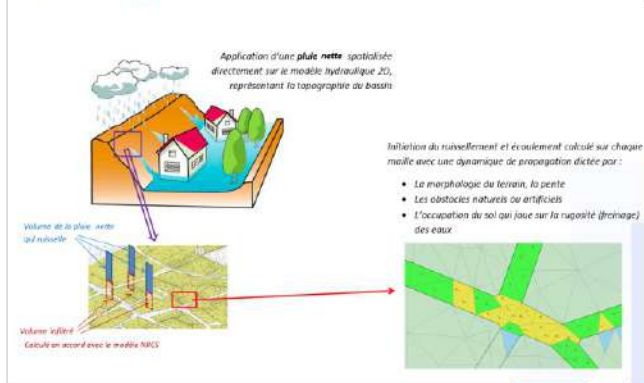
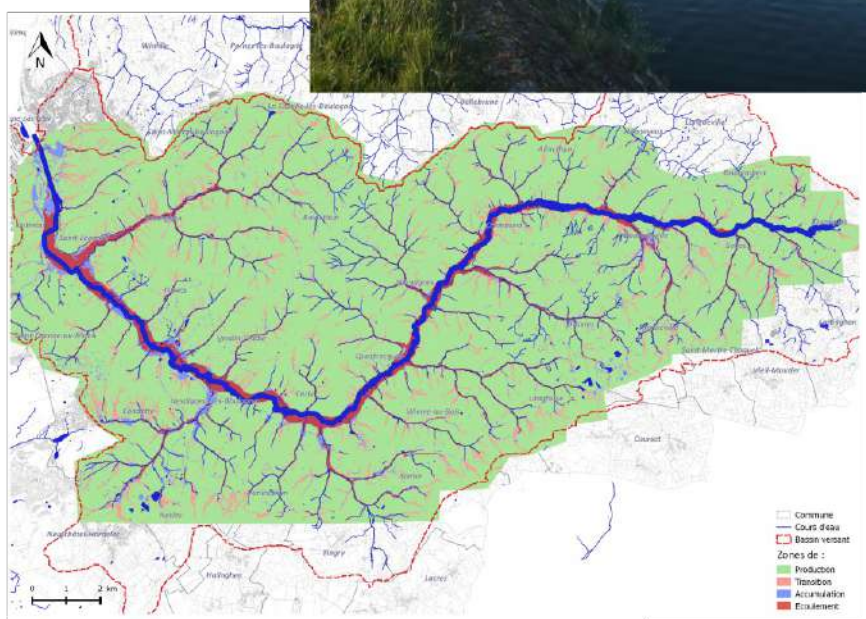


PAPI / PPRI DU BOULONNAIS

DDTM DU PAS-DE-CALAIS / SYMSAGEB MÉTHODES D'ANALYSE DU FONCTIONNEMENT ET DE DÉTERMINATION DES ALÉAS - CALAGE DU MODÈLE



PARTIE 1 - PHASE 1



LIVRABLE VO.2

L 4-8

Table des matières

Préambule.....	6
Partie - 1 Aléa débordement	8
1.1 Approche pluie-débit à l'échelle du bassin versant.....	9
1.1.1 Objectifs et limites de la modélisation pluie-débit.....	9
1.1.2 Le découpage en sous bassins versants.....	9
1.1.3 Mise en œuvre de la méthode pluie-débit.....	14
1.1.4 Choix de la fonction de transfert.....	16
1.1.5 Mise en œuvre opérationnelle de l'approche pluie-débit.....	18
1.2 Modélisation de l'aléa débordement	18
1.2.1 Principe général de la modélisation 1D-2D.....	18
1.2.2 Modélisation des écoulements la Liane et de ses affluents.....	21
1.2.3 Modélisation des débordements en lit majeur.....	24
1.3 Prise en compte des interactions avec la nappe.....	26
Partie - 2 Aléa ruissellement.....	27
2.1 Transformation pluie-ruissellement	28
2.2 Modélisation de l'aléa ruissellement.....	29
2.2.1 Modèle bi-dimensionnel (2D).....	29
2.2.2 Aménagements hydrauliques contre le ruissellement.....	31
2.2.3 Conditions aux limites.....	31
Partie - 3 Calage hydrologique et hydraulique.....	32
3.1 Calage des modèles débordement et ruissellement du bassin versant de la Liane.....	33
3.1.1 Généralités.....	33
3.1.2 Principe et valeurs retenues.....	33
3.1.3 Événements de calage.....	36
3.1.4 Conclusion sur le calage.....	60

Index des illustrations

Figure 1- Grille d'accumulation obtenue sous SAGA GIS.....	10
Figure 2 : Réseau hydrographique grossier obtenu sous SAGA GIS.....	11
Figure 3 : Découpage topographique des sous bassins versants par SAGA GIS.....	12
Figure 4 : Sous bassins versants de la Liane.....	13
Figure 5 : Représentation schématique de l'hydrogramme unitaire.....	16
Figure 6 : Principe de construction du modèle hydraulique 1D/2D.....	20
Figure 7 : Localisation des levés et profils complémentaires des principaux affluents de la Liane...	23
Figure 8 : Deux types de modélisation des écoulements en zones inondables (Liane amont).....	25
Figure 9 : Deux type de modélisation des écoulements en zones inondables (Liane aval).....	25
Figure 10 : Fonctionnement global de la transformation pluie-ruissellement.....	28
Figure 11 : Localisation des points de mesures sur le bassin versant de la Liane.....	38
Figure 12 : Hydrogrammes mesuré et simulé en L1 (crue de janvier 2016).....	39
Figure 13 : Hydrogrammes mesuré et simulé en LV1 (crue de janvier 2016).....	39
Figure 14 : Hydrogrammes mesuré et simulé en LM1 (crue de janvier 2016).....	39
Figure 15 : Hydrogrammes mesuré et simulé en LHE1 (crue de janvier 2016).....	39
Figure 16 : Hydrogrammes mesuré et simulé en L2 (crue de janvier 2016).....	40
Figure 17 : Hydrogrammes mesuré et simulé en LS1 (crue de janvier 2016).....	40
Figure 18 : Hydrogrammes mesuré et simulé à la station de Wirwignes (crue de janvier 2016).....	40
Figure 19 : Hydrogrammes mesuré et simulé en LHA1 (crue de janvier 2016).....	40
Figure 20 : Hydrogrammes mesuré et simulé en LE1 (crue de janvier 2016).....	41
Figure 21 : Hydrogrammes mesuré et simulé à la station d'Isques (crue de janvier 2016).....	41
Figure 22 : Hydrogramme mesuré et simulé à la station de Wirwignes (crue de novembre 2012).	44
Figure 23 : Emprise inondable au niveau des communes de Saint-Léonard et de Saint-Etienne-au-Mont pour la crue de novembre 2012.....	47
Figure 24 : Emprise inondable au niveau des communes d'Isques, d'Hesdin-l'Abbé et d'Hesdigneullès-Boulogne pour la crue de novembre 2012.....	48
Figure 25 : Emprise inondable au niveau de la commune de Samer pour la crue de novembre 2012	

.....	49
Figure 26 : Emprise inondable au niveau de la commune de Bournonville pour la crue de novembre 2012.....	50
Figure 27 : Emprise inondable au niveau de la commune de Selles pour la crue de novembre 2012	51
Figure 28 : Hydrogrammes mesuré et simulés à la station de Wirwignes.....	52
Figure 29 : Emprise inondable maximale au sein des communes de Saint-Etienne-au-Mont et de Saint-Léonard pour la crue de novembre 2009.....	55
Figure 30 : Emprise inondable maximale au sein des communes d'Hesdin-l'Abbé et d'Hesdigneul-lès-Boulogne pour la crue de novembre 2009.....	56
Figure 31 : Emprise inondable maximale au sein des communes de Carly et de Samer pour la crue de novembre 2009.....	57
Figure 32 : Emprise inondable maximale au sein de la commune de Selles pour la crue de novembre 2009.....	58
Figure 33 : Emprise inondable maximale au sein de la commune de Baincthun pour la crue de novembre 2009.....	59
Index des tables	
Tableau 1 : Bilan des profils en travers de la Liane.....	21
Tableau 2 : Étapes de construction du maillage de calcul 2D.....	30
Tableau 3 : Classes de validité du calage hydraulique du modèle.....	34
Tableau 4 : Coefficients de rugosité du lit mineur.....	35
Tableau 5 : Rugosité différenciée du lit majeur.....	35
Tableau 6 : Valeurs de CN en fonction de l'occupation des sols (la ligne grisée correspond à la classe retenue pour le calage hydrologique des événements de novembre 2009 et 2012).....	36
Tableau 7 : Comparaison des débits de pointe modélisés et mesurés pour l'événement de janvier 2016.....	42
Tableau 8 : Comparaison des niveaux max mesurés et modélisés pour l'événement de janvier 2016	43
Tableau 9 : Comparaison du niveau mesuré et modélisé au droit de la station hydrométrique de	

Livrable L4-L8 /Méthodes d'analyse du fonctionnement et de détermination des aléas - Calage du modèle

Wirwignes.....	46
Tableau 10 : Comparaison des niveaux historiques et modélisés sur le bassin versant de la Liane pour la crue de novembre 2012.....	46
Tableau 11 : Comparaison du niveau mesuré et modélisé au droit de la station hydrométrique de Wimille.....	53

Préambule

L'objectif du présent livrable est de définir la méthodologie de modélisation des différents phénomènes d'inondation touchant le bassin versant de la Liane ainsi que le calage.

En effet, le modèle hydrologique et hydraulique sera utilisé pour analyser le fonctionnement hydraulique sur la base des événements historiques retenus pour le calage et des scénarios de référence (fréquent, moyen et extrême). Cela permettra, en particulier, d'identifier les zones de débordement, les sous-bassins versants les plus productifs, les temps de propagation et l'écrêtement de l'onde de crue, etc. La compréhension du fonctionnement hydraulique sera décrite dans le livrable L5.

Le présent document se décompose ainsi en trois parties :

- la première partie est consacrée à la description du modèle dédié à l'aléa débordement. Elle s'attache à décrire le modèle hydrologique envisagé, ainsi que les principes de construction du modèle hydraulique 1D, ainsi que de la zone 2D représentant les zones inondables ;
- Le second chapitre décrit la transformation de la pluie brute en lame d'eau ruisselée, ainsi que la construction de la zone de maillage propre au modèle ruissellement ;
- enfin, le dernier chapitre est consacré au calage hydrologique et hydraulique du modèle.

Le logiciel utilisé pour construire les modèles hydrologiques et hydrauliques (débordement et ruissellement) du bassin versant de la Liane est le logiciel ICM V6,5 développé par INNOVYZE.

Partie - 1 Aléa débordement

Ce chapitre s'attache à décrire les méthodes qui seront mises en place pour représenter au mieux le débordement de la Liane et de ses affluents principaux. Pour cela, le modèle réalisé au cours de « l'étude hydrologique et hydraulique des bassins versants du Boulonnais » en 2014-2015, pour le compte de la DDTM62, sera utilisé et mis à jour. Aussi, la méthodologie présentée ci-dessous reste inchangée au regard de celle décrite au sein de cette même étude.

1.1 Approche pluie-débit à l'échelle du bassin versant

L'approche numérique retenue consistera à modéliser **la transformation de la pluie en débit sur le bassin versant de la Liane**, au moyen d'une (ou plusieurs) fonction(s) de production (estimation de la pluie nette à partir de la pluie brute, modélisation des pertes au ruissellement), associée(s) à une fonction de transfert (transport de cette pluie nette à l'exutoire des bassins versants d'apport).

Cette méthode permettra d'exploiter les données pluviométriques et d'utiliser les caractéristiques topographiques et surfaciques locales pour générer les hydrogrammes.

1.1.1 Objectifs et limites de la modélisation pluie-débit

Les objectifs de la modélisation pluie-débit à l'échelle du bassin versant sont d'évaluer et de fournir les hydrogrammes de crue pour les scénarios de référence retenus sur la Liane, pour tous les apports (têtes de bassin versant, affluents principaux et secondaires), afin de représenter la dynamique de formation et de propagation des crues.

Le modèle pluie-débit (modèle hydrologique) est intégré au modèle hydraulique, qui sera présenté plus loin dans le présent document, et qui permet quant à lui d'estimer les niveaux au sein du réseau hydrographique modélisé, et de cartographier les débordements et l'aléa induit.

La partie ci-après décrit les données utilisées et la structure du modèle pluie-débit couplé au modèle hydraulique.

1.1.2 Le découpage en sous bassins versants

L'objectif du découpage en sous-bassins est de représenter finement la contribution intrinsèque à chaque bassin de drainage tout au long du linéaire de la Liane. La particularité du bassin versant de la Liane est de posséder un « chevelu » hydrographique très dense. Il est donc nécessaire de représenter finement les surfaces d'apports de ces différents affluents pour que la réponse globale du modèle hydraulique soit la plus fidèle possible.

1.1.2.1 Préparation du MNT

Le MNT de base a un pas de 25 m et est issu de la BD Alti. Avant de réaliser tout traitement de ce MNT, il faut combler les « puits », qui sont en fait des défauts du MNT. Cette étape est essentielle car ces dépressions entraînent une accumulation de l'eau, et la continuité du chemin hydraulique sera donc perturbée.

Cette étape se fera sous SAGA GIS par le module Terrain Analysis > Preprocessing. Plusieurs méthodes sont possibles pour éliminer ces « puits ». La méthode « Fill Sinks (Planchon et Darboux 2001) a été retenue». A l'issue de cette étape, le MNT est donc exploitable.

Remarque : Pour le découpage des bassins versants, le MNT au pas de 25 m (précision de 50 cm) sera utilisé plutôt que les levés LIDAR au pas de 1 m (précision de 10 cm) car cette opération ne nécessite pas une précision aussi fine qu'un pas de 1 m. Par contre, dans le cadre de la modélisation, ce sont bien les données LIDAR qui seront utilisées.

1.1.2.2 Création d'une grille d'accumulation

A partir de la topologie de la zone étudiée, SAGA GIS va déterminer l'accumulation d'eau dans chaque cellule, et mettre ainsi en évidence les cellules drainant une grande surface (les cellules des cours d'eau) et les cellules ne drainant quasiment rien (les cellules les plus élevées). Cette étape va donc mettre en évidence les cours d'eau.

La grille d'accumulation obtenue, donnant pour chaque cellule du MNT le nombre de cellules s'écoulant vers cette dernière, est présentée dans la figure suivante.

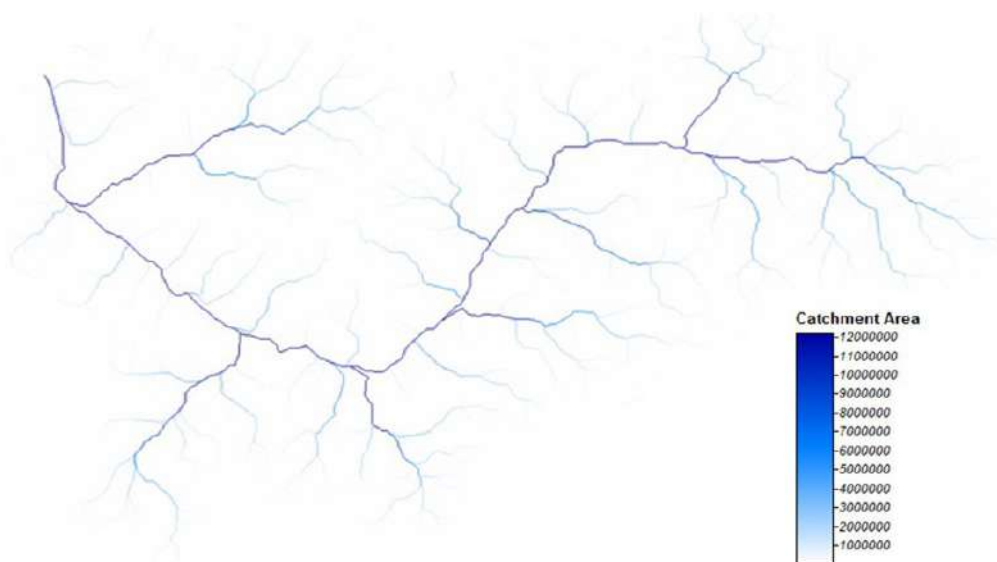


Figure 1- Grille d'accumulation obtenue sous SAGA GIS

On retrouve bien ci-dessus le tracé de la Liane et de ses affluents.

1.1.2.3 Création du réseau hydrographique

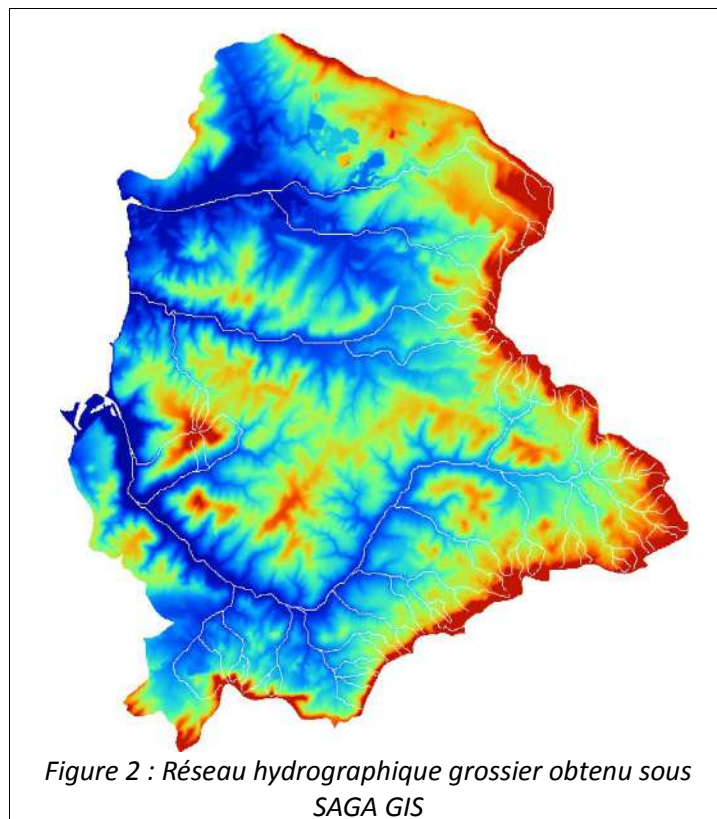
Une fois la grille d'accumulation réalisée, SAGA GIS va pouvoir construire le réseau hydrographique. Cette étape est importante car elle déterminera la finesse de la découpe en bassins versants.

Deux paramètres sont à déterminer au cours de cette étape :

- Initiation Threshold : c'est la surface minimale de drainage que doit avoir un cours d'eau pour être pris en compte. Plus ce seuil sera élevé, moins le nombre de cours d'eau pris en compte dans le réseau sera grand ;
- Minimum Segment Length (optionnel) : c'est la longueur minimale d'un cours d'eau pour qu'il soit pris en compte dans le réseau hydrographique.

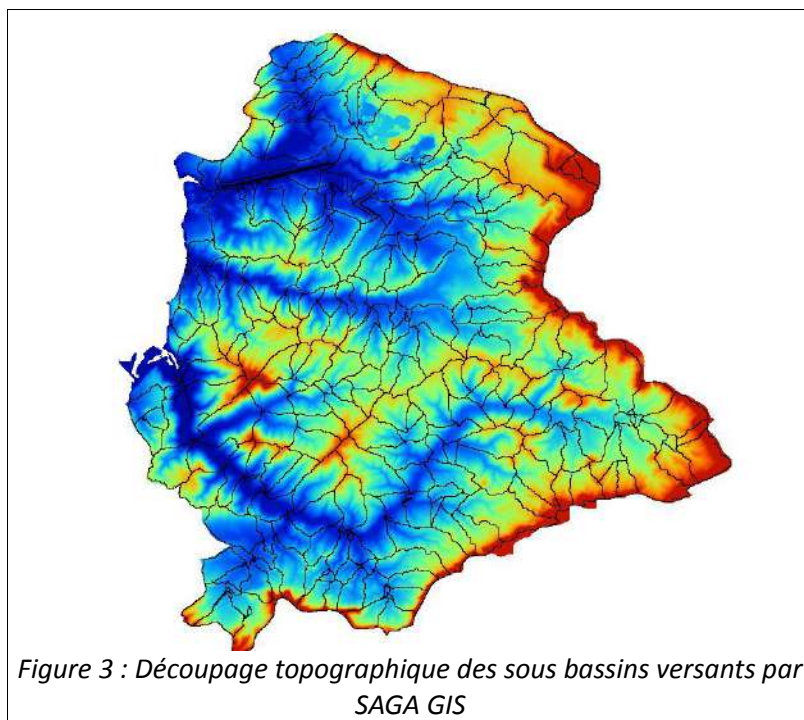
Ces deux paramètres détermineront la finesse du réseau hydrographique, et donc le nombre de sous-bassins versants créés.

Dans notre cas, ces paramètres permettront de prendre en compte les cours d'eau de rang 1, 2, 3 et 4, tout en ne sélectionnant que ceux d'une certaine importance.



1.1.2.4 Découpage automatique des sous-bassins versants

SAGA GIS propose un découpage en sous-bassins versants basé sur la topographie comme l'illustre la figure suivante.



1.1.2.5 Correction manuelle du découpage

Le découpage ainsi basé sur la topographie ne prend pas nécessairement en compte toutes les modifications anthropiques (remblais, déblais, etc...) qui peuvent être présentes au sein du bassin versant global. Dans les zones où la déclivité est particulièrement faible, une attention particulière sera nécessaire et une reprise du découpage automatique pourra être à envisager.

Une étape de correction des limites des sous-bassins en fonction de la présence ou non d'éléments anthropiques est alors réalisée suivie d'un regroupement de certains sous-bassins versants pour lesquels le découpage automatique pouvait être trop fin.

1.1.2.6 Découpage final en sous bassins versants d'apports

Lors de l'étude de 2014-2015 le bassin versant de la Liane a été découpé en 159 sous-bassins versants, représentés ci-après. Après intégration des affluents, dans le cadre de la présente étude, ce découpage sera éventuellement adapté.

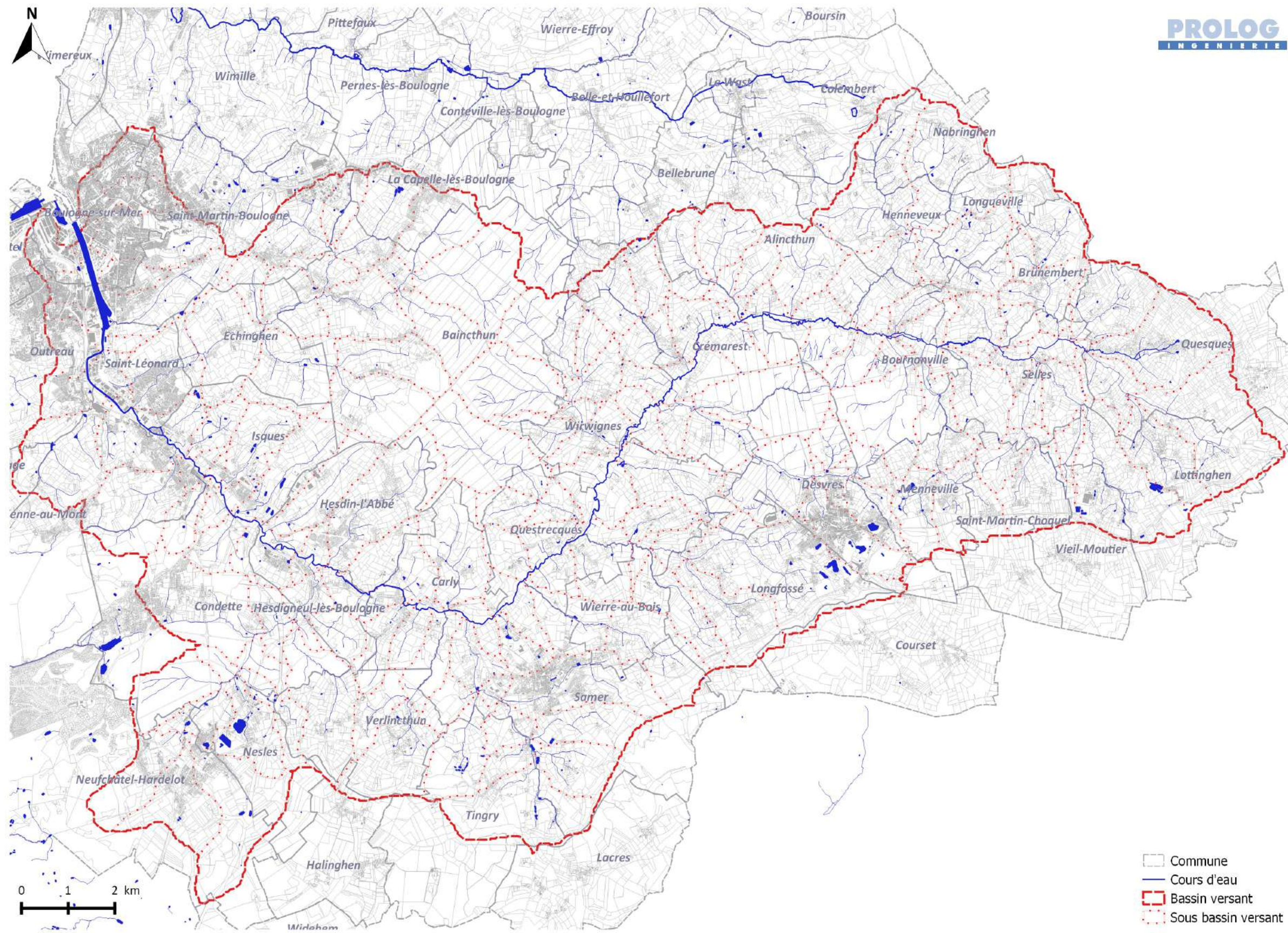


Figure 4 : Sous bassins versants de la Liane

1.1.3 Mise en œuvre de la méthode pluie-débit

1.1.3.1 Les principes théoriques de l'approche

Globalement, la modélisation hydrologique de type pluie-débit permet de passer d'un hétéogramme représentant la pluie tombant sur un bassin versant, à un hydrogramme représentant le débit restitué par ce bassin versant.

Classiquement, un modèle hydrologique se base sur 3 composantes principales :

- une pluie réelle observée ou une pluie de projet qui est une représentation simplifiée du phénomène pluvieux à l'origine de la formation de la crue ;
- une fonction de production, qui permet de modéliser le passage de la pluie brute à la pluie nette en évaluant les pertes (par infiltration notamment);
- une fonction de transfert, qui permet de modéliser le passage de la pluie nette à l'hydrogramme de crue à l'exutoire de chaque sous-bassin versant.

Les fonctions de production et de transfert dépendent de plusieurs paramètres en fonction du modèle choisi, comme par exemple l'occupation du sol, la perméabilité du sol dans le bassin versant, l'état de saturation du sol avant l'événement pluvieux, etc.

1.1.3.2 Choix de la fonction de production

En raison des caractéristiques du bassin versant de la Liane (occupation des sols principalement rural sauf au niveau de l'agglomération de Boulogne-sur-Mer fortement urbanisée), deux fonctions de production seront utilisées :

- **pour les sous-bassins d'apport ruraux**, la fonction de production utilisée se basera sur le modèle du NRCS (National Resources Conservation Service, ex-Soil Conservation Service) qui permet de rendre compte des pertes initiales et est particulièrement adaptée aux surfaces rurales peu imperméabilisées. Toutefois, lors du calage du modèle, si cette méthode s'avère peu adaptée, une autre fonction de production (modèle de Horton par exemple) sera utilisée.

Les surfaces considérées sont définies par un coefficient CN (Curve Number) qui est fonction de plusieurs facteurs dont le type et l'occupation du sol, la végétation, les conditions antécédentes d'humidité, la pente et les aménagements effectués. Dans le détail, on distingue :

- 4 types de sol A, B, C et D définis en fonction des caractéristiques géologiques des sols et notamment de leur perméabilité (forte, moyenne, faible et très faible) ;
- 3 hypothèses de conditions pluvieuses antécédentes :
 - I : conditions sèches ;
 - II : conditions normales ;

- III : conditions très humides

En se basant sur le profil géologique de son sous-sol, le bassin versant de la Liane **peut être globalement caractérisé par des sols peu perméables de type C**. Le calage des crues historiques permettra de valider ce type de sols. Les hypothèses sur les conditions antécédentes sont propres à chaque événement pluvieux. Elles seront définies, pour un événement donné, sur la base d'une analyse des conditions pluviométriques antécédentes.

La pluie nette est calculée de la façon suivante :

$$P_{nette} = \frac{(P_{brute} - 0,05 \times S)^2}{P_{brute} + 0,95 \times S} \quad (\text{si } P_{brute} > 0,05 \times S, 0 \text{ sinon})$$

Où :

- Pbrute et Pnette sont exprimés en mm,
- S est le paramètre de rétention (mm), calculé à partir du Curve Number :

$$S = 33,8 \times \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)^{1,15}$$

Il représente la quantité maximale de pluie absorbée par le sol au cours de l'événement pluvieux.

La détermination des valeurs du paramètre CN se basera sur l'hypothèse de sol mentionnée précédemment si elle s'avère pertinente et sera réalisée à l'échelle de chaque sous-bassin versant d'apport en fonction de l'occupation du sol, de la pratique agricole et de la végétation.

- **pour les sous-bassins d'apports urbains** (imperméabilisation supérieure à 25%), une fonction de production à coefficient de ruissellement constant sera utilisée. Ce coefficient de ruissellement constant Cr sera égal à Cp x IMP où IMP est le coefficient d'imperméabilisation du sous-bassin versant considéré (rapport de la surface imperméabilisée sur la surface totale) et Cp le coefficient de production.

Le coefficient de production Cp traduit le fait que l'ensemble des surfaces imperméables ne contribue pas au ruissellement (stockage dépressionnaire, pertes continues, etc.).

Les pertes initiales Pi sont typiquement comprises entre 0,5 mm et 2 mm et seront ajustées lors du calage du modèle.

La pluie nette (hauteur d'eau ruisselée Hr) sera alors calculée à partir de la pluie brute (hauteur d'eau précipitée Hp) selon la formule suivante :

$$Hr = Cr \times (Hp - Pi)$$

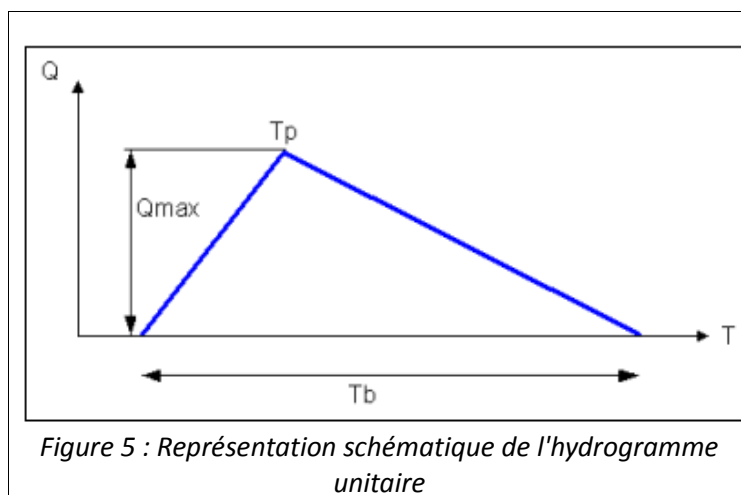
Ce modèle hydrologique est le plus classiquement utilisé en hydrologie urbaine et est adapté aux bassins versants fortement urbanisés de la partie aval du territoire d'étude.

L'imperméabilisation de chaque sous-bassin versant sera évaluée à partir de l'occupation des sols. Cette dernière est égale au rapport de la surface imperméabilisée (route, toits, ...) sur la surface totale. Les valeurs de ces coefficients seront ajustés sur la base du calage des épisodes de crues historiques.

1.1.4 Choix de la fonction de transfert

Là encore deux fonctions de transfert seront utilisées pour différencier les sous bassins versant ruraux et urbains :

- **pour les sous-bassins d'apports ruraux**, la fonction de production du NRCS sera associée au modèle de l'hydrogramme unitaire afin de calculer les hydrogrammes à l'exutoire des sous-bassins versants de la Liane. Ce modèle se base sur trois paramètres :
 - le temps de montée au pic (**Tp**) ;
 - le temps de base de l'hydrogramme (**Tb**) ;
 - le débit de pointe de l'hydrogramme (**Qmax**).



Ces trois paramètres sont définis à partir des caractéristiques géométriques des sous-bassins versant (temps de concentration) ainsi que des caractéristiques propre à la pluie étudiée (notamment la durée de la pluie nette après infiltration).

La formulation retenue pour définir le temps de concentration (Tc) des sous-bassins versants est celle du SCS-RURAL, adaptée au caractère rural des sous-bassins, et qui définit Tc comme

$$T_c = \frac{T_L}{0.8} = \frac{1}{0.8} \times 2.7 \times \left(\frac{L}{\sqrt{p}} \right)^{0.221}$$

avec :

- T_c le temps de concentration en heures ;
- T_L le décalage temporel en heures ;
- L la longueur hydraulique du sous-bassin en km ;
- p la pente du sous-bassin en m/km

Les différents paramètres de l'hydrogramme unitaire sont ensuite calculés de la façon suivante :

$$T_p = f_{ts} + f_{tp} \times T_c \quad (1)$$

avec :

- T_p : temps de montée au pic ;
- T_c : temps de concentration du sous-bassin ;
- f_{ts} le facteur pas de temps qui pour l'approche SCS retenue se calcule comme étant la durée de la pluie nette (après infiltration) divisée par 2 ;
- f_{tp} le facteur de montée au pic fixé à 0,8 (valeur couramment utilisée)

$$T_b = 2,67 \times T_p \quad (2)$$

avec :

- T_b : temps de base de l'hydrogramme ;
- T_p : temps de montée au pic

Le débit de pointe de l'hydrogramme est ensuite défini très simplement via la formulation géométrique suivante :

$$Q_{max} = 2/T_b \quad (3)$$

- **pour les sous-bassins d'apports urbains**, la fonction de transfert classiquement utilisée en hydrologie urbaine est celle du réservoir linéaire, utilisée pour des sous-bassins avec une imperméabilisation supérieure à 25%. Cette fonction représente le bassin versant comme un réservoir qui se vidange.

La formule reliant linéairement le débit de vidange (Q) à l'exutoire du bassin versant en fonction du volume stocké au sein du bassin versant (S) est du type :

$$S(t) = K \times Q(t)$$

K est la constante de réservoir linéaire, calculée ici à partir de la formule de Desbordes simplifiée (modèle « SPRINT » du logiciel Inforworks ICM):

$$K = 5,3 \times A^{0,30} \times \left(\frac{IMP}{100}\right)^{-0,45} \times p^{-0,38}$$

- Où :
 - A est la superficie du bassin versant (ha);
 - p est la pente du bassin versant (%);
 - IMP est le taux d'imperméabilisation du bassin versant (sans unité);

1.1.5 Mise en œuvre opérationnelle de l'approche pluie-débit

1.1.5.1 Exploitation des données pluviométriques

Comme expliqué précédemment, la méthode pluie-débit se basera avant tout sur une exploitation des données pluviométriques sous toutes les formes disponibles localement au droit du bassin versant.

L'utilisation d'un modèle de transformation pluie-débit sous-entend un calage de ce dernier sur la base de pluies réelles. L'analyse historique a permis de mettre en évidence des événements passés.

L'exploitation des données RADAR permettra de reconstituer de manière très fine la dynamique spatio-temporelle des pluies et notamment le déplacement de l'onde orageuse.

1.1.5.2 Génération des hydrogrammes

Le processus hydrologique décrit précédemment, à savoir l'application d'une pluie brute réduite à une pluie nette par la fonction de production puis transformée en lame d'eau d'eau ruisselée par la fonction de transfert, découlera sur le calcul d'un hydrogramme de débit à l'exutoire de chaque sous-bassin versant.

Les hydrogrammes seront injectés ponctuellement au niveau de la Liane ou de ses affluents.

C'est alors la structure du modèle hydraulique et les paramètres de rugosité des sols et du lit des cours d'eau qui conditionneront la transmission des débits vers l'aval et l'évacuation à la mer.

1.2 Modélisation de l'aléa débordement

1.2.1 Principe général de la modélisation 1D-2D

L'approche retenue pour représenter au mieux l'aléa débordement sur l'ensemble du linéaire de la Liane et de ses affluents principaux se base sur une modélisation dite couplée.

- **La Liane et les affluents principaux seront représentés selon une approche unidimensionnelle**, qui fait l'hypothèse dans les biefs d'un écoulement majoritairement perpendiculaire à la section du cours d'eau, et d'une vitesse d'écoulement moyennée sur cette section. Ces biefs sont ainsi représentés sous la forme d'une succession de profils en travers de cours d'eau, issus de levés topographiques. Les écoulements y sont calculés selon les équations de Barré de Saint Venant, basées sur la conservation de la masse et du mouvement. Aussi, la résolution de ces équations prend en compte la section mouillée, la pente des biefs ainsi que la rugosité du fond du lit.

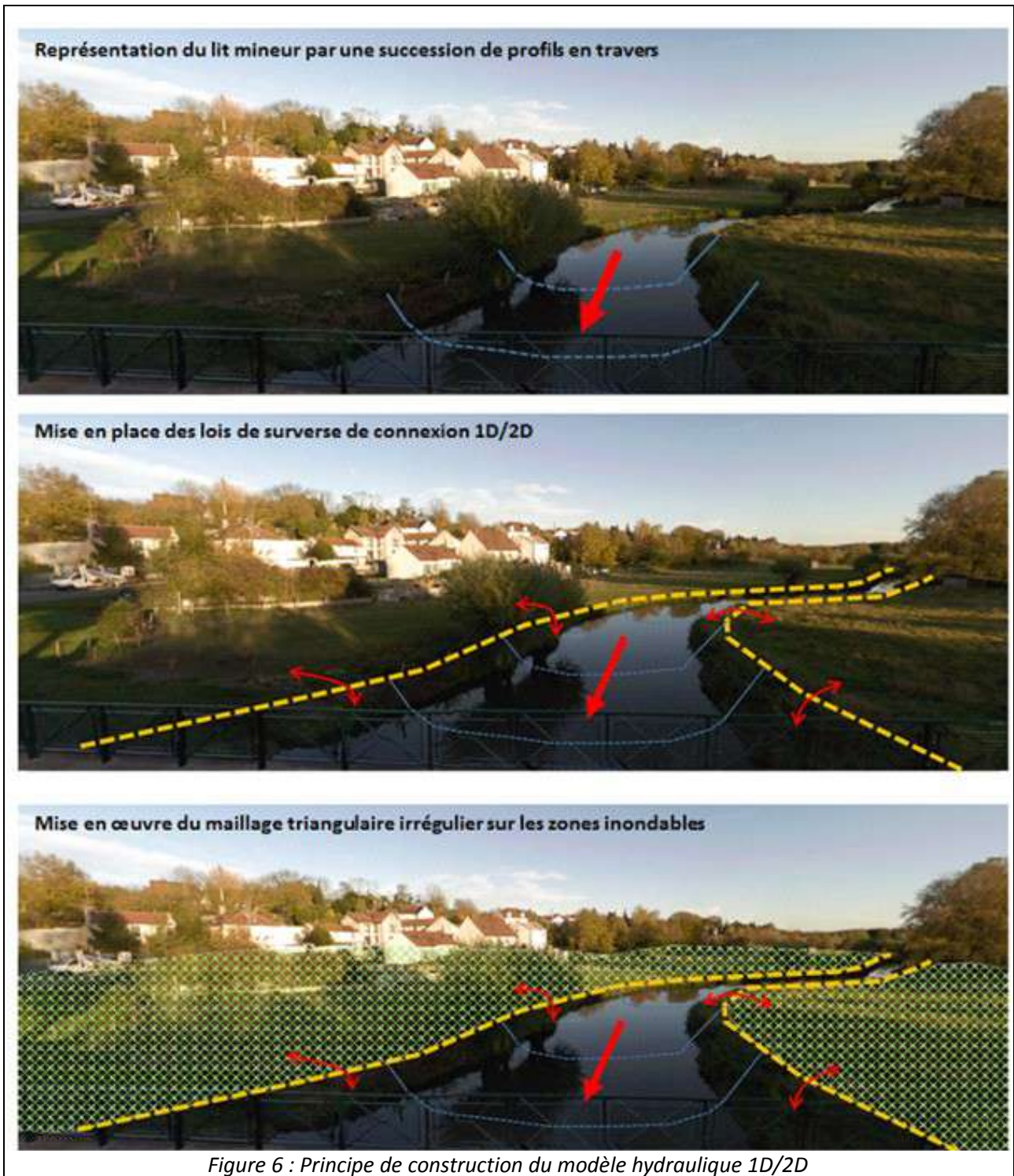
Ces hypothèses simplificatrices sont admissibles dans le lit mineur des cours d'eau et permettent de couvrir des linéaires importants en conservant des temps de calculs opérationnels. Tous les types d'ouvrages impactant la ligne d'eau et les écoulements en lit mineur pourront être intégrés dans la schématisation unidimensionnelle. Les écoulements au droit de ces ouvrages, et notamment la relation entre le débit transitant via l'ouvrage et les niveaux amont/aval correspondants, seront calculés sur la base d'équations théoriques ou empiriques éprouvées.

- **Le lit majeur sera quant à lui représenté par un schéma dit bidimensionnel sauf sur les secteurs sans enjeux (modélisation 1D étendu dans ce cas-là)**. Pour rappel, pour un tel schéma, aucune hypothèse concernant les directions prises par l'écoulement ou encore quant aux phénomènes d'inondation prédominants à l'inverse des approches unidimensionnelles n'est effectuée. Les surfaces inondables seront donc représentées par un ensemble de mailles de calcul triangulaires, dont la taille est adaptée localement à l'échelle géographique des éléments venant perturber les écoulements.

Les équations décrivant les écoulements sont celles dites de Navier-Stokes¹, avec l'hypothèse d'une vitesse constante sur toute la hauteur de l'écoulement en un point donné. Le calcul des écoulements est de ce fait bidimensionnel (selon la direction x et y).

- **L'ensemble des ouvrages (fixes, mobiles) ou obstacles** venant perturber les écoulements, au sein du lit mineur (ponts, seuils) ou dans le lit majeur (bassins de rétention, buses) peuvent être intégrés à la modélisation. Leur impact sur les écoulements sera calculé sur la base d'équations théoriques ou empiriques (loi d'orifice, loi de seuils, ...). Toutefois, l'ajout des ouvrages ayant un impact sur les temps de calculs des simulations, leur intégration dépendra de leur incidence sur l'écoulement en période de hautes eaux.
- La connexion entre ces espaces 1D et 2D, se produit principalement au droit des hauts de berge, points de transition naturelle entre ces deux fonctionnements distincts, les écoulements au sein du lit mineur d'une part et la propagation des eaux débordées. Cette connexion s'effectuera à chaque pas de temps de calcul, et est représentée par une loi de surverse prenant en compte la cote des hauts de berge comme niveau de débordement.

1 Equations dites « Shallow Water Equations », applicables dans tous les domaines où les variations de vitesse verticale dans la tranche d'écoulement sont négligeables, par conséquent dans les cas où la profondeur n'est pas significative par rapport aux dimensions x et y des écoulements.



1.2.2 Modélisation des écoulements la Liane et de ses affluents

1.2.2.1 Représentation du lit mineur

Le lit mineur de la Liane et de l'ensemble des affluents principaux seront donc représentés par une succession de profils en travers, pour lesquels des levés géomètres précis ont été réalisés ou sont en cours de réalisation.

En effet, les profils en travers sont issus de différentes sources :

- pour le lit mineur de la Liane :
 - 126 profils en travers ont été extraits du modèle CARIMA, mis en place par SOGREAH dans cadre de l'élaboration du PPRI. Ils s'étendent de Wirwignes à la mer et datent de 1995, 2003 ou 2008 suivant les secteurs (voir tableau ci-après).
 - 97 profils en travers extraits de l'étude hydrologique et hydraulique des bassins versants du Boulonnais. Ils concernent la Liane, de Quesques à Wirwignes.

SECTEUR		Linéaire	Année des levés
DEBUT	FIN	km	
Quesques (source)	Amont pont RD341 Wirwignes	17.5	2014
Amont pont RD341 à Wirwignes	Confluence ruisseau Blanchard Liane à Isques	11.5	1995
Confluence ruisseau Blanchard/ Liane à Isques	Difffluence Pont-de-Briques	1.7	2003 et 1995 corrigé
Difffluence Pont-de-Briques	Confluence Pont-de-Briques	0.8 (deux bras)	2008
Confluence Pont-de-Briques	Pont RD901E3 (RN142) à Saint-Léonard	2.5	2003 et 1995 corrigé
Pont RD901E3 (RN142) à Saint-Léonard	Mer	2.8	1995

Tableau 1 : Bilan des profils en travers de la Liane

- Des levés complémentaires (116 profils en travers et 195 ouvrages) ont été réalisés et concernent les affluents de la Liane, cités d'amont en aval ci-dessous :
 - la Creuze ;
 - la petite Liane ;
 - le ruisseau aux Fromages ;
 - le ruisseau de Menneville ;
 - le ruisseau de la Rivièrelette ;
 - le ruisseau du Bois des Pierres ;
 - le ruisseau de Lamy ;
 - le ruisseau de Fresnoye ;
 - le ruisseau de Mogreville ;
 - le petit Hasard ;
 - le ruisseau du fond de l'étang ;
 - le ruisseau de Desvres ou la Lène ;
 - le ruisseau de la Haute Faude ;
 - le ruisseau de la Halle ;
 - le ruisseau de Wierre-au-bois ;
 - l'Edre ;
 - les ruisseaux d'Ecames et de Longpré ;
 - le ruisseau de Brucquedal ;
 - le ruisseau des Dunes ;
 - le ruisseau de la Cachaine ;
 - le ruisseau de Belle-Isle et ses affluents.

Ces affluents sont représentés au sein de la carte page suivante.

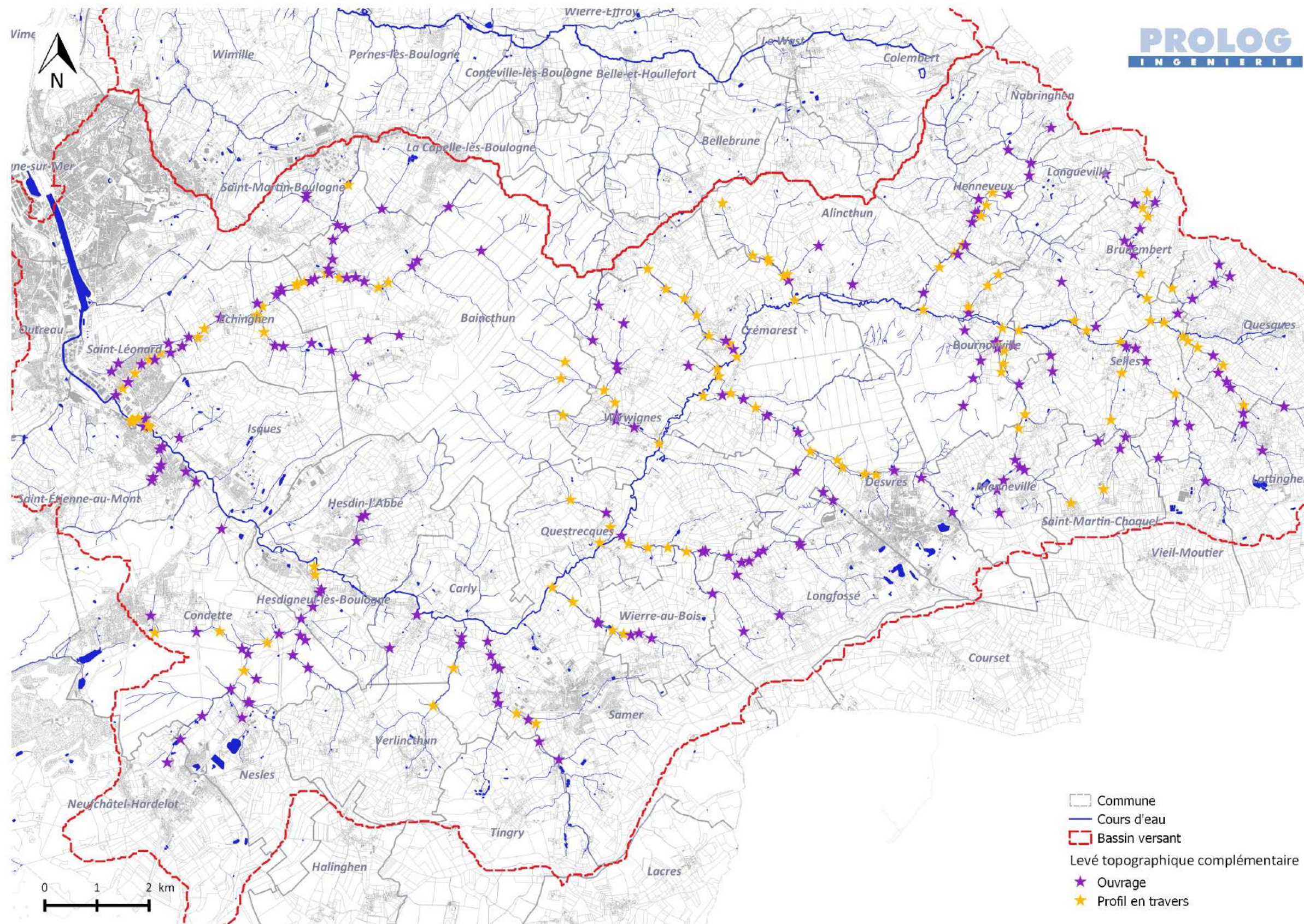


Figure 7 : Localisation des levés et profils complémentaires des principaux affluents de la Liane

1.2.2.2 Ouvrages

Les principaux ouvrages de la Liane et les trois ZEC du SYMSAGEB ont été intégrés dans le modèle de l'étude 2014-2015. Les levés complémentaires d'ouvrages décrits précédemment et concernant essentiellement les affluents de la Liane ont été ajoutés dans le cadre de cette étude.

Le barrage Marguet, avec les récents travaux sur la passe à poissons, est pris en compte dans le modèle.

1.2.2.3 Conditions aux limites aval

Un limnigramme (niveau à l'amont du barrage Marguet) sera imposé à l'exutoire du modèle de la Liane pour les crues de calage retenues. Pour les scénarios de référence, un marégramme prenant en compte le cycle des marées sera appliqué à l'aval du barrage.

1.2.3 Modélisation des débordements en lit majeur

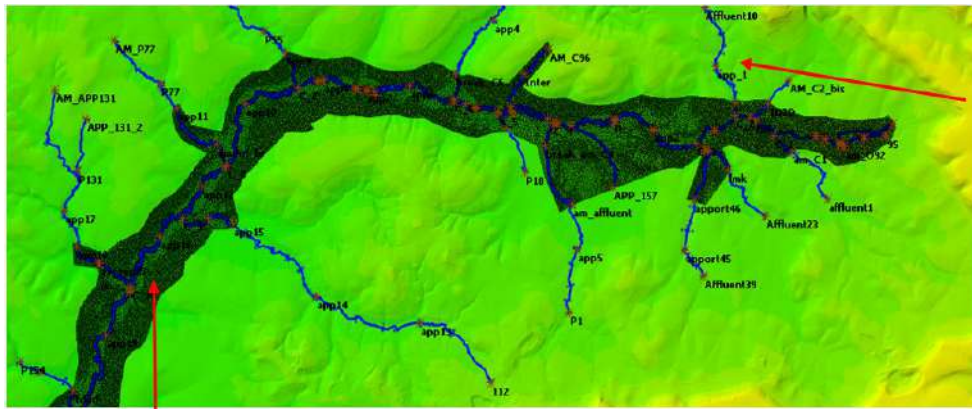
Les débordements en lit majeur sont représentés selon la morphologie du cours d'eau :

- dans le cas où le lit mineur est encaissé, les débordements seront caractérisés par le biais de profils en travers, l'hypothèse quant à un écoulement unidimensionnel donc perpendiculaires aux sections des cours d'eau restant valide ;
- en revanche lorsque le lit majeur est plus étendu (Zone d'Expansion de Crue, ou encore aux abords des confluences), l'écoulement ne pouvant être contraint selon une direction, l'ensemble de ces derniers seront représentés par une modélisation bidimensionnelle, basée sur un maillage de calcul 2D. Chaque maille est un élément de calcul qui représente la topographie, et prend en compte la rugosité du sol. Les différentes données d'entrée, nécessaire à la construction du maillage sont les suivantes :
 - **la topographie**, qui caractérise le relief, les pentes et obstacles du modèle ;
 - **l'occupation des sols**, qui permet de définir leur rugosité.

Les principales étapes de construction de ce maillage sont décrites au sein du Tableau 2.

Les figures page suivante permettent de visualiser les différents types de modélisation pour caractériser les débordements en lit majeurs pour le bassin versant de la Liane.

La présence de clapets anti-retour au sein des traversées d'Hesdigneul-lès-Boulogne, Isques, Saint-Léonard et Saint-Etienne-au-Mont empêchent tout refoulement des eaux de la Liane vers les réseaux. Aussi, ces derniers n'ont pas été intégrés à la modélisation.



Modélisation 1D étendu :

- lit mineur encaissé
- écoulement unidirectionnel
- faibles enjeux environnants

Modélisation 1D-2D :
hypothèse écoulement
unidirectionnel fausse

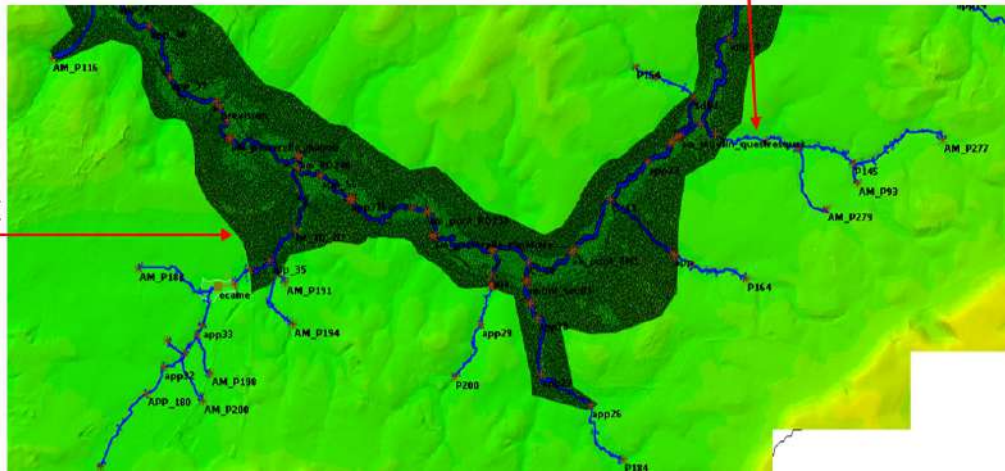


Figure 8 : Deux types de modélisation des écoulements en zones inondables (Liane amont)

Modélisation 1D étendu :

- lit mineur encaissé
- écoulement unidirectionnel
- faibles enjeux environnants



Modélisation 1D-2D :
hypothèse écoulement
unidirectionnel fausse

Figure 9 : Deux type de modélisation des écoulements en zones inondables (Liane aval)

1.3 Prise en compte des interactions avec la nappe

Lors des rencontres avec les communes, des pertes et des résurgences liées à la présence de karst ont été identifiés sur le secteur entre Selles et Bournonville. L'absence de localisation précise et de données sur ces phénomènes ne permet pas une représentation fine de ces derniers.

Les interactions de la Liane avec la nappe seront ainsi pris en compte par le biais d'une variation du débit de base. La campagne de mesures du SYMSAGEB ainsi que celle du syndicat des eaux de Quesques donneront des informations sur la répartition des débits de base mais les valeurs devront être ajustées au regard de l'événement considéré et des conditions pluvieuses antécédentes.

Partie - 2 Aléa ruissellement

2.1 Transformation pluie-ruisellement

Il est important de rappeler ici la spécificité des phénomènes de ruissellement, qui se forment par concentration des eaux de pluie tombant sur des surfaces plus ou moins perméables et évoluent en fonction de la topographie pour former des zones d'écoulement, présentant des vitesses importantes, ou au contraire des zones d'accumulation dans les points bas topographiques.

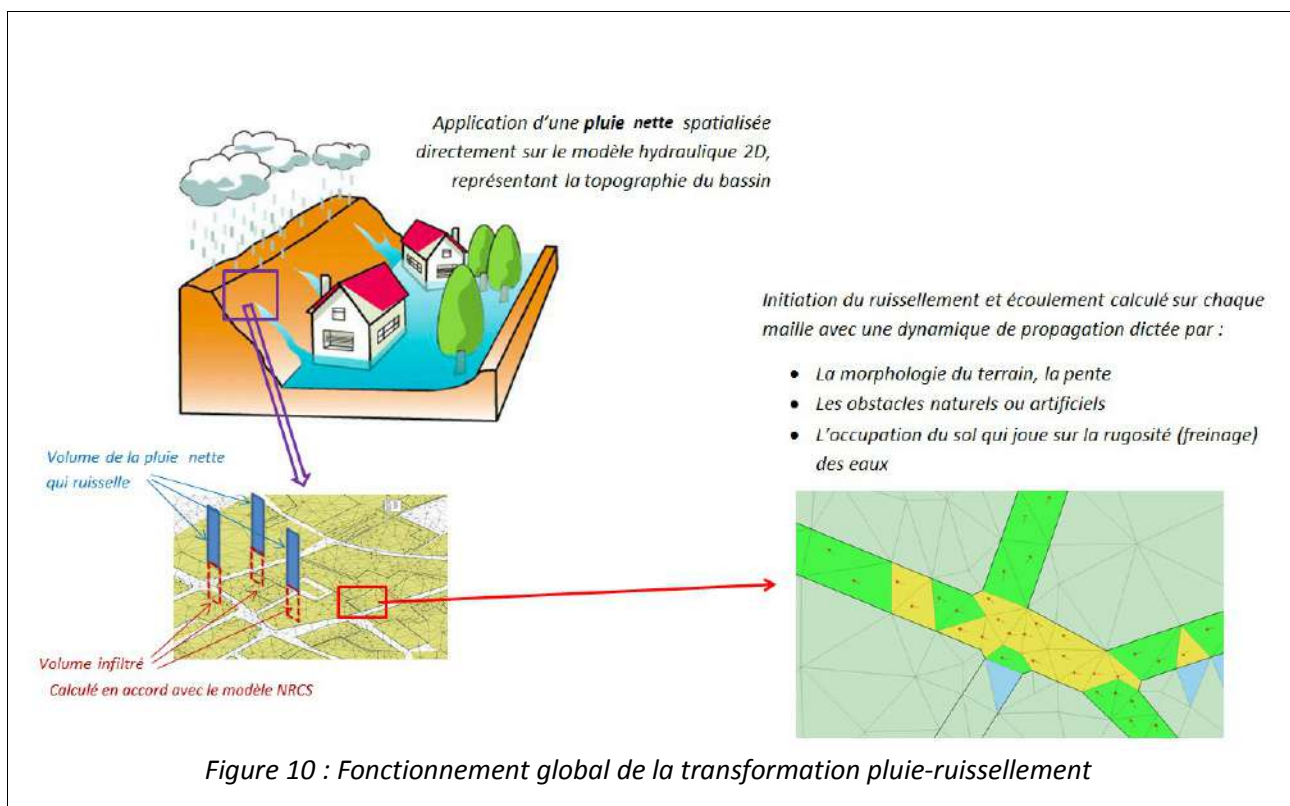
Ces phénomènes de ruissellement peuvent se produire en tout point d'un bassin versant et sont difficilement quantifiables, à l'opposé par exemple de la crue d'un cours d'eau, dont le débit peut être mesuré en un point précis du bassin-versant, à l'exutoire d'une zone de collecte.

Une étape majeure de la caractérisation de l'aléa inondation par des phénomènes de ruissellement sera donc de représenter fidèlement la transformation de la pluie tombée (pluie brute), en volume d'eau qui va ruisseler, en évaluant correctement les pertes, c'est à dire le volume d'eau qui ne participera pas au ruissellement.

La méthodologie mise en œuvre pour cette transformation est décrite dans la section suivante.

La particularité de l'approche proposée par rapport à la méthode pluie-débit décrite au chapitre précédent est que la pluie sera appliquée directement sur un modèle bi-dimensionnel de calcul des écoulements et non sur des sous-bassins versants.

Le schéma ci dessous synthétise les grands principes de la méthodologie proposée (**transformation pluie-ruisellement**) :



Le modèle de transformation pluie-ruissellement retenu consiste à transformer la pluie brute en pluie nette par le biais du modèle NRCS dont les paramètres auront été calés au cours du calage hydrologique du modèle débordement. La pluie nette, appliquée directement sur le maillage 2D, sera majorée afin de contrer les pertes au niveau des différents points bas du maillage.

Aussi, par le biais de cette méthode, les conditions de saturation des sols en eau au début de l'événement seront identiques à celles du modèle débordement, qui aura été calé auparavant.

2.2 Modélisation de l'aléa ruissellement

2.2.1 Modèle bi-dimensionnel (2D)

Le modèle hydraulique construit sera un modèle bidimensionnel (2D). Il couvre l'intégralité de la zone d'étude et permettra ainsi de caractériser les phénomènes de **ruissellement** sur l'ensemble du bassin versant de la Liane. Cette modélisation permettra ensuite de différencier les zones de production, de transition et d'accumulation.

Deux représentations des phénomènes de ruissellement seront envisagées :

- la première représentera par le biais d'un modèle ruissellement indépendant du modèle débordement le ruissellement en tête de bassin, non soumis à l'aléa débordement et ne recensant que peu d'enjeux ;
- la seconde sera quant à elle couplée au modèle débordement, afin de prendre en compte l'interaction entre ces deux phénomènes et sur des zones à enjeux.

Le module bidimensionnel d'ICM se base sur un système de maillage du territoire pour sa modélisation 2D. Chaque maille est un élément de calcul qui représente la topographie et prend en compte la rugosité des sols. La forme du maillage est également influencée par les obstacles que l'on retrouve sur les versants (remblais, ouvrages, ponts, etc).

La méthodologie de construction de ce modèle est décrite pas à pas au sein du tableau ci-après :

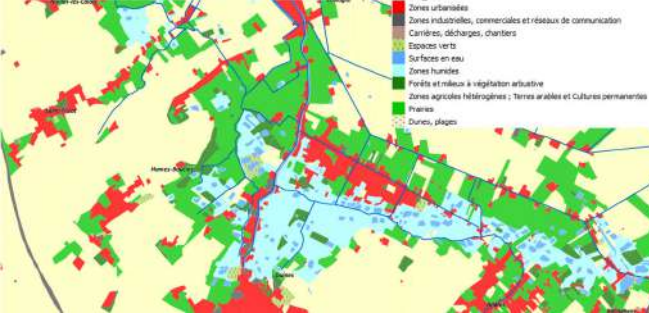
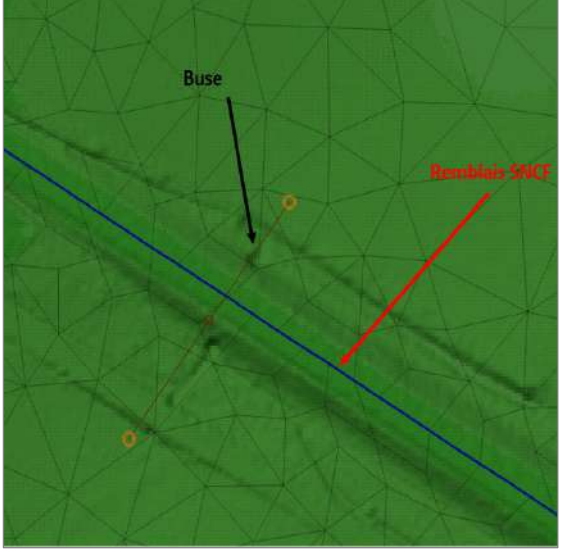
Étape	Objectifs	Détail et commentaires	Illustrations (tirées du PPRI des pieds de coteaux)
1	Prise en compte de l'effet de freinage/accélération des différentes couvertures de sol	<p>Il s'agit ici de sectoriser le périmètre d'étude en différentes zones d'écoulement dont les coefficients de rugosité seront adaptés au type d'occupation des sols. En effet, la dynamique d'écoulement sur une parcelle agricole, dans une zone de forêt ou sur une voirie est différente, les phénomènes de frottement n'étant pas les mêmes. Ce découpage sera réalisé à partir de la base de données SIGALE et chaque zone se verra affecter un coefficient de Strickler correspondant à sa couverture de sol.</p> <p>Le maillage sera contraint vis à vis de ces zones de rugosité.</p>	
2	Adapter le maillage aux variations topographiques du terrain naturel et identifier les surverses	<p>Il est nécessaire d'affiner le maillage numérique 2D au droit des zones de variations topographiques importantes pour que le niveau de terrain naturel affecté dans les mailles soit le bon. Ainsi, au niveau d'un remblai, il est nécessaire de tracer les lignes de forçage en pied de remblai et le long de sa crête afin que la taille des mailles s'adapte et viennent récupérer la bonne information altimétrique.</p> <p>Il faut ensuite identifier les éléments de topographie où peuvent se produire des phénomènes de surverse. En effet, les équations de Saint-Venant n'étant pas adaptées pour ces phénomènes, il est donc important de mettre une loi de seuil au passage d'un remblai, d'une digue, par l'intermédiaire d'un élément spécifique du modèle qui applique une loi de seuil aux frontières des mailles concernées.</p>	
3	Prise en compte des ouvrages de décharge sous remblai	<p>Pour ne pas surestimer les effets de blocage en arrière des remblais (en particulier les voies SNCF ou certains axes routiers), les points de passages ou ouvrages de décharge type trémie seront intégrés dans le modèle sur la base de leurs géométries réelles</p>	

Tableau 2 : Étapes de construction du maillage de calcul 2D

La précision du maillage de calcul 2D repose en grande partie sur la finesse du modèle numérique de terrain (MNT) utilisé. Dans le cadre du PPRI – PAPI des bassins versants du Boulonnais, les données topographiques mises à notre disposition sont :

- le MNT RGE de la BD ALTI de l'IGN (mailles de 25 m avec une précision d'environ 50 cm) ;
- les courbes de niveau à pas de 5 m de la BD ALTI de l'IGN ;
- les levés LIDAR du 29 mars 2014 réalisés par AERODATA (mailles d'un mètre avec une précision inférieure à 10 cm).

Les levés LIDAR étant les plus précis seront utilisés en priorité.

2.2.2 Aménagements hydrauliques contre le ruissellement

Les bassins de rétention des eaux pluviales les plus importants et pour lesquels des données ont pu être obtenues auprès des gestionnaires ont été intégrés au modèle ruissellement. Ils concernent l'autoroute A16 et la commune de Samer.

2.2.3 Conditions aux limites

Comme énoncé dans le paragraphe 2.1, l'objectif de l'approche pluie-ruissellement est d'utiliser le profil des précipitations pour simuler les écoulements dans le modèle. Les pluies nettes réelles ou théoriques seront donc appliquées directement sur la maillage de calcul 2D.

Partie - 3 Calage hydrologique et hydraulique

3.1 Calage des modèles débordement et ruissellement du bassin versant de la Liane

3.1.1 Généralités

Une fois le modèle construit, il est nécessaire de procéder à sa validation en analysant sa réponse à des événements pluvieux réels ayant touchés le bassin versant, et le confrontant aux données historiques (repères de crues) et quantitatives (mesures de débit et de niveaux aux stations hydrométriques). Il est indispensable de s'assurer que la réponse du modèle pour le débit de crue historique mesuré est bien conforme aux témoignages et repères de crue, et par conséquent qu'il rend bien compte de la dynamique des débordements et des échanges lit mineur/lit majeur.

On distingue deux types de témoignages historiques :

- les témoignages ponctuels ou surfaciques (voiries ou lotissements inondés) qui localisent géographiquement le désordre (plus ou moins précisément) sans évaluation de la hauteur de submersion ou sans y adjoindre une photographie qui permettrait de reconstituer cette hauteur ;
- les témoignages quantifiés (là encore avec un fiabilité plus ou moins représentative) que l'on appelle « repères de crue ».

Ce calage se base donc sur la comparaison entre les niveaux d'eau simulés par le modèle et les hauteurs reconstituées lors de l'analyse historique (repères de crue). Les données limnimétriques sur les cours d'eau serviront aussi de points de comparaison.

Les témoignages non quantifiés servent de validation qualitative et comportementale, en particulier pour les phénomènes de ruissellement.

3.1.2 Principe et valeurs retenues

Le calage hydrologique se base donc sur la comparaison du débit de pointe et de la forme de l'hydrogramme (volume) calculés par le modèle et les débits aux stations de mesures. Les paramètres de calage correspondent aux coefficients qui dictent la répartition entre la part de pluie qui contribue au ruissellement et les pertes (par interception par la végétation éventuelle, par stockage dans les dépressions du sol, par infiltration dans le sous-sol). Le calage est jugé bon lorsque l'écart modèle – mesure est de +/- 10 %. Notons que la mesure est elle aussi caractérisée par une certaine incertitude, qui peut être dans certains cas bien supérieure à l'écart constaté avec le modèle.

Pour le calage hydraulique, une comparaison est faite entre les niveaux d'eau simulés par le modèle et les hauteurs reconstituées lors de l'analyse historique ou mesurées aux stations. La rugosité du lit et les coefficients spécifiques des ouvrages sont les variables d'ajustement de cette

étape. Notons là encore que l'incertitude sur certains niveaux relevés ou estimés lors des crues historiques (observations de terrain, photographies, témoignages, etc.) peut aussi être très importante et bien supérieure à la précision du calcul numérique. Les comparaisons sont ainsi adaptées à la qualité de la mesure ou de l'observation. Il existe ainsi une incertitude sur la hauteur d'eau dans les maisons, beaucoup plus importante que sur une laisse nivelée ou un niveau à une station de mesure.

La pertinence des points de calage hydraulique est appréciée en fonction de l'écart des résultats du modèle par rapport aux repères de crue ou stations de mesures selon trois classes.

<i>Écart (en cm) entre les niveaux historiques et modélisés</i>	<i>Validité du calage</i>
[-20 cm ; +20 cm]	Bonne
[-50 cm ; +50 cm]	Moyenne
< -50 cm ou > +50 cm	Mauvaise

Tableau 3 : Classes de validité du calage hydraulique du modèle

Pour les témoignages, en revanche la validité du calage résultera de la présence ou non d'eau au droit de ces zones.

Les points de calage présentant une validité « moyenne » ou « mauvaise » ont systématiquement été vérifiés de manière exhaustive afin d'identifier l'origine de la divergence.

Aussi, les paramètres hydrologiques et hydrauliques retenus pour représenter la dynamique des inondations sur le territoire d'étude sont présentés au sein des paragraphes suivants.

La saturation en eau des sols, correspond pour les événements de novembre 2009, de novembre 2012 à un CN de type sol imperméable présentant des conditions pluvieuses antécédentes très soutenues soit un CN CIII. L'épisode pluvieux de janvier 2016 sera la moyenne entre des conditions pluvieuses antécédentes humides et très humides (i.e. entre CII et CIII). Le tableau 6 ci-après présente les valeurs des CN en fonction de l'occupation des sols.

Le coefficient de frottement au sein du cours d'eau principal, à savoir le Wimereux et des affluents principaux sont synthétisés ci-dessous :

Tronçon	Coefficient de Strickler ($m^{1/3}/s$)
Liane amont – Wirwignes	20
Wirwignes – chenal maritime	13
Chenal maritime – exutoire Liane	20
Affluents (sauf Belle-Isle)	20
Ruisseau de Belle-Isle	15

Tableau 4 : Coefficients de rugosité du lit mineur

Classes rugosité	Coefficient de rugosité
Axes routiers principaux	40
Espaces verts - Prairies	20
Forêt	11
Plans d'eau	60
Zones Agricoles	25
Zones industrielles, commerciales, scolaires et réseaux de communication	15
Zones urbanisées	15

Tableau 5 : Rugosité différenciée du lit majeur

Une fois calé et validé sur plusieurs événements, le modèle sera exploité pour simuler l'aléa de référence.

			Autres céréales	Chantiers	Commercial	Eau	Espace ouvert	Forêts	Friche	Industriel	Paturages	Routes	Serres	Urbain dense	Urbain moyen	Verger
Coefficients CN	AMC I	A	43.0	53.4	76.4	0.0	30.2	19.8	59.4	64.4	12.0	94.8	48.6	59.4	34.2	22.2
		B	57.0	65.8	81.6	0.0	49.8	40.0	71.6	74.8	39.0	94.8	57.0	70.0	51.0	33.4
		C	67.2	73.2	85.2	0.0	61.8	54.6	79.8	79.8	57.0	94.8	64.4	78.0	63.0	46.2
		D	73.2	76.4	87.0	0.0	68.6	61.8	85.2	83.4	67.2	94.8	68.6	81.6	70.0	52.2
	AMC II	A	63.0	72.0	89.0	0.0	49.0	36.0	77.0	81.0	25.0	98.0	68.0	77.0	54.0	39.0
		B	75.0	82.0	92.0	0.0	69.0	60.0	86.0	88.0	59.0	98.0	75.0	85.0	70.0	53.0
		C	83.0	87.0	94.0	0.0	79.0	73.0	91.0	91.0	75.0	98.0	81.0	90.0	80.0	66.0
		D	87.0	89.0	95.0	0.0	84.0	79.0	94.0	93.0	83.0	98.0	84.0	92.0	85.0	71.0
	AMC III	A	81.4	88.6	97.8	0.0	69.0	56.0	92.2	94.6	45.0	99.6	85.4	92.2	74.0	59.0
		B	91.0	95.2	81.6	0.0	86.2	79.0	97.2	97.6	78.2	99.6	91.0	97.0	87.0	73.0
		C	95.8	97.4	85.2	0.0	93.4	89.4	98.2	98.2	91.0	99.6	94.6	98.0	94.0	83.8
		D	97.4	97.8	87.0	0.0	96.4	93.4	98.8	98.6	95.8	99.6	96.4	98.4	97.0	87.8

Tableau 6 : Valeurs de CN en fonction de l'occupation des sols (la ligne grisée correspond à la classe retenue pour le calage hydrologique des événements de novembre 2009 et 2012)

3.1.3 Événements de calage

3.1.3.1 Calage de la crue de janvier 2016

Calage hydrologique

La campagne de mesures réalisée au cours de l'hiver 2015-2016 par le SYMSAGEB autorise le calage de la Liane sur sa partie amont. Au nombre de 10, ces points de mesures sont localisés comme suit :

- quatre jalonnent le linéaire de la Liane et sont implantés au niveau de :
 - la commune de Selles, en aval immédiat de la commune de Quesques, extrémité amont du bassin versant de la Liane (**L1**) ;
 - la commune de Bournonville, en aval des ruisseaux aux Fromages et de Menneville en rive gauche ainsi que du ruisseau de Lamy en rive droite (**L2**) ;
 - la commune de Samer, qui permet de quantifier les apports provenant des sous bassins versants situés au milieu du bassin versant de la Liane comme ceux issus des ruisseaux de la Halle, du Quesnaval et de la Haute Fraude (**L3-L4**) ;
- quatre caractérisent les apports principaux de la Liane :
 - la station **LV1**, (commune de Selles) en amont de la confluence entre la Liane et le ruisseau aux Fromages, permet de mesurer les apports des sous bassins versants drainés par ces cours d'eau secondaires, localisés en rive gauche de la Liane ;
 - la station **LM1**, (commune de Bournonville), quantifie les apports provenant du ruisseau de Menneville, un affluent important de la Liane en rive gauche ;
 - La station **LHE1**, (commune de Bournonville) en aval du ruisseau de Lamy, permet d'estimer les apports en rive droite de l'amont du bassin versant de la Liane ;
 - la station **LS1** (commune de Crémarest) située sur la Lène, cours d'eau contournant le centre ville de Desvres, permet l'analyse de ces apports juste avant sa confluence avec la Liane en amont de la station hydrométrique de Wirwignes ;
 - la station **LHA1**, (commune de Wirwignes) en aval de la confluence entre les ruisseaux de Sainte Gertrude et du Bellonoy permet de juger de l'influence des apports des bassins versant drainés par ces cours d'eau secondaires sur la dynamique de la Liane en période de hautes eaux ;
 - la station **LE1**, (commune de Samer) mesure les apports de l'Edre, affluent en rive gauche de la Liane, ce point de mesures est en aval des stations L3 et L4.

L'hydrogramme mesuré au point L3-L4 donnant un débit de pointe plus faible que celui de Wirwignes alors qu'aucune zone d'expansion de crue pouvant justifier un tel écrêtement n'est pas présenté, ce point ayant été écarté de la comparaison pour le calage.

Ces mesures de débits sont cependant soumises à une incertitude relativement importante pouvant aller jusqu'à 40 % d'après la société OTECH Environnement qui a réalisé ces mesures. Cet écart en terme de débit de pointe sera jugé comme tolérable pour l'ensemble des points de mesures.

Pour cet événement, les chroniques des stations hydrométriques de la DREAL à Wirwignes et Isques sont également disponibles.

La carte ci-dessous rappelle la localisation de l'ensemble de ces points sur le bassin versant du Wimereux.

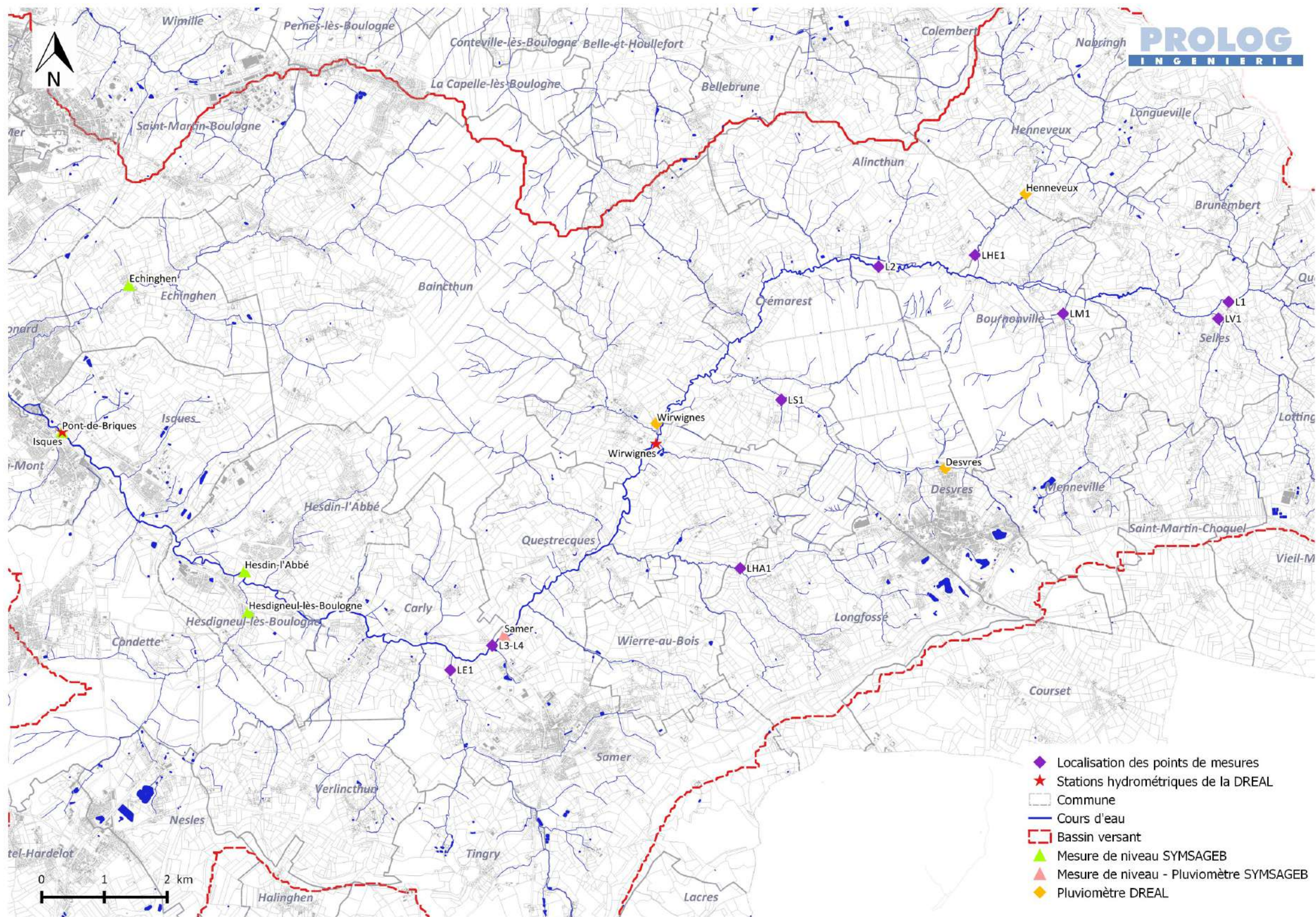


Figure 11 : Localisation des points de mesures sur le bassin versant de la Liane

Les graphiques ci-dessous présentent d'amont en aval la comparaison des hydrogrammes pour l'ensemble de ces points.

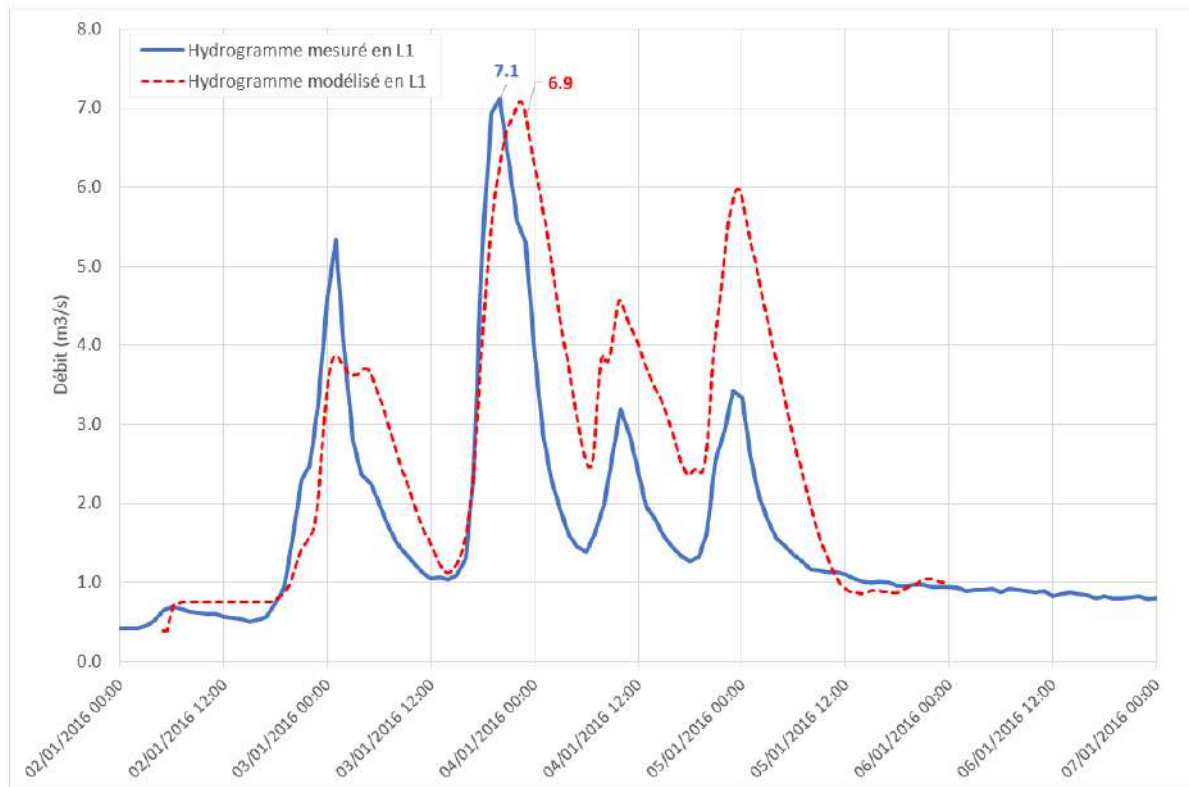


Figure 12 : Hydrogrammes mesuré et simulé en L1 (crue de janvier 2016)

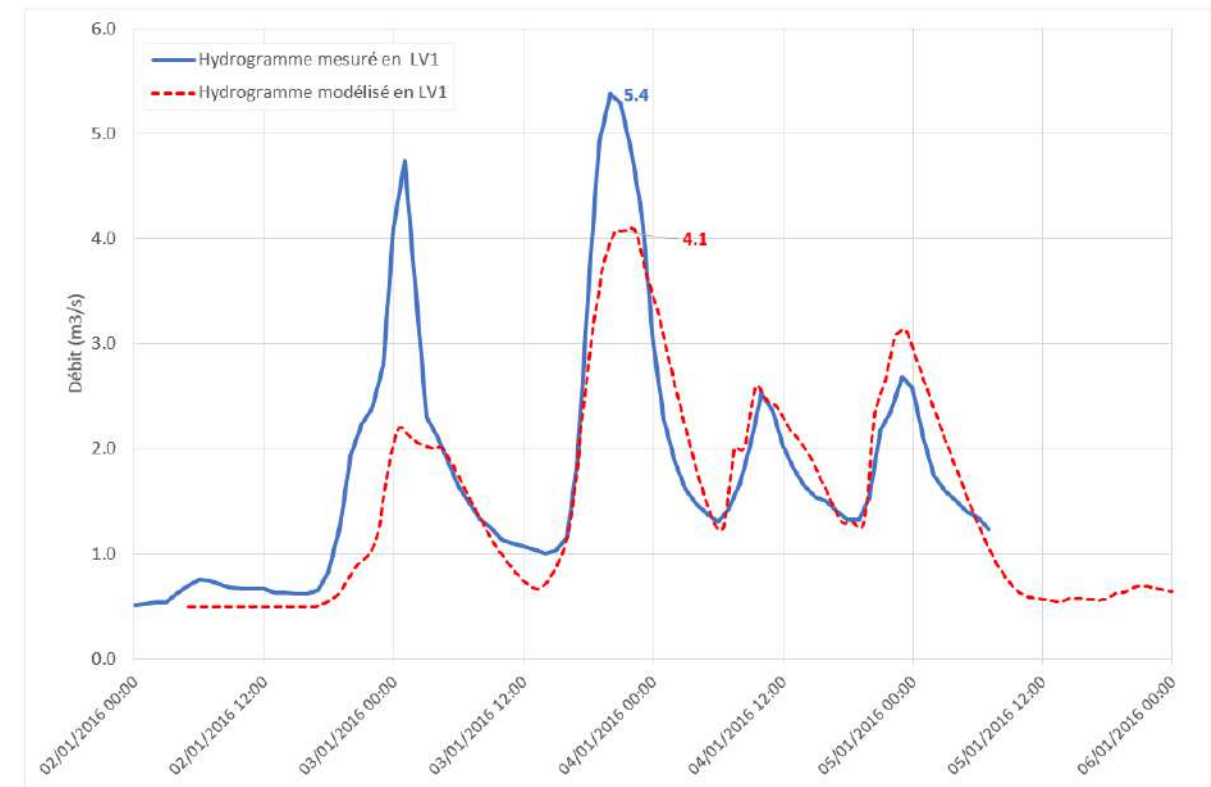


Figure 13 : Hydrogrammes mesuré et simulé en LV1 (crue de janvier 2016)

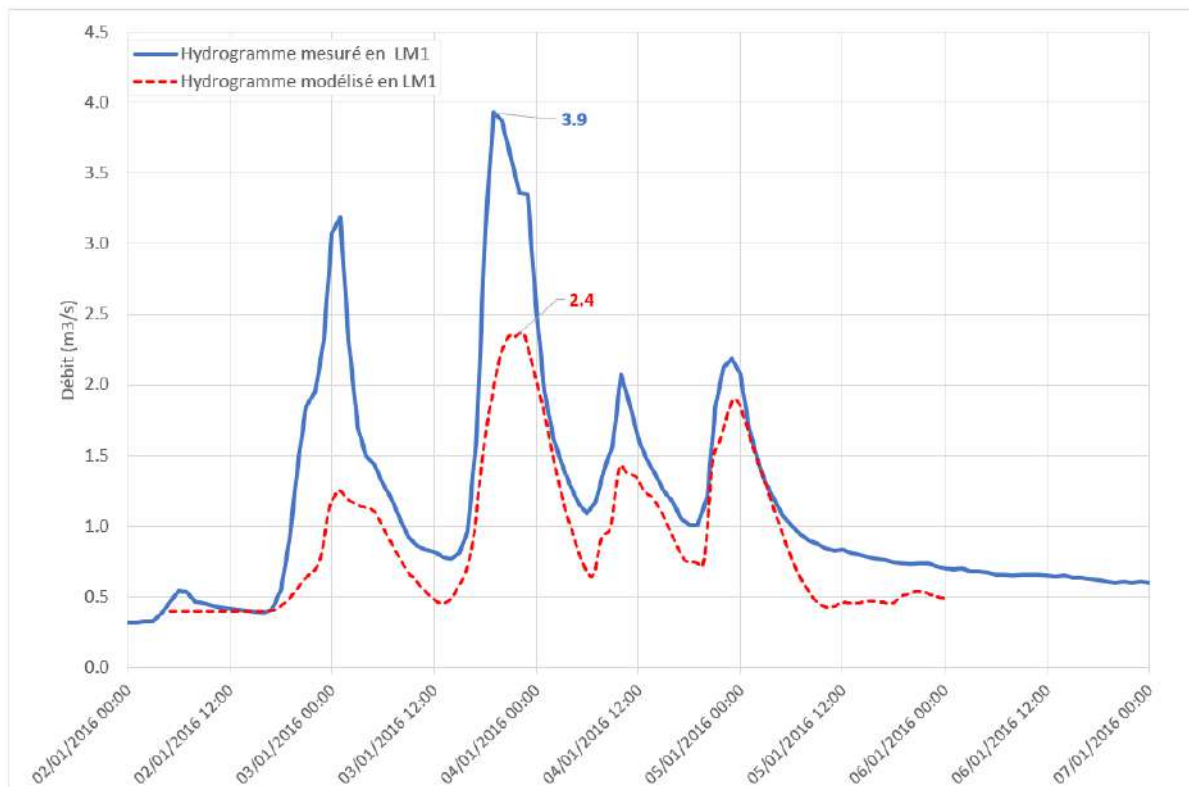


Figure 14 : Hydrogrammes mesuré et simulé en LM1 (crue de janvier 2016)

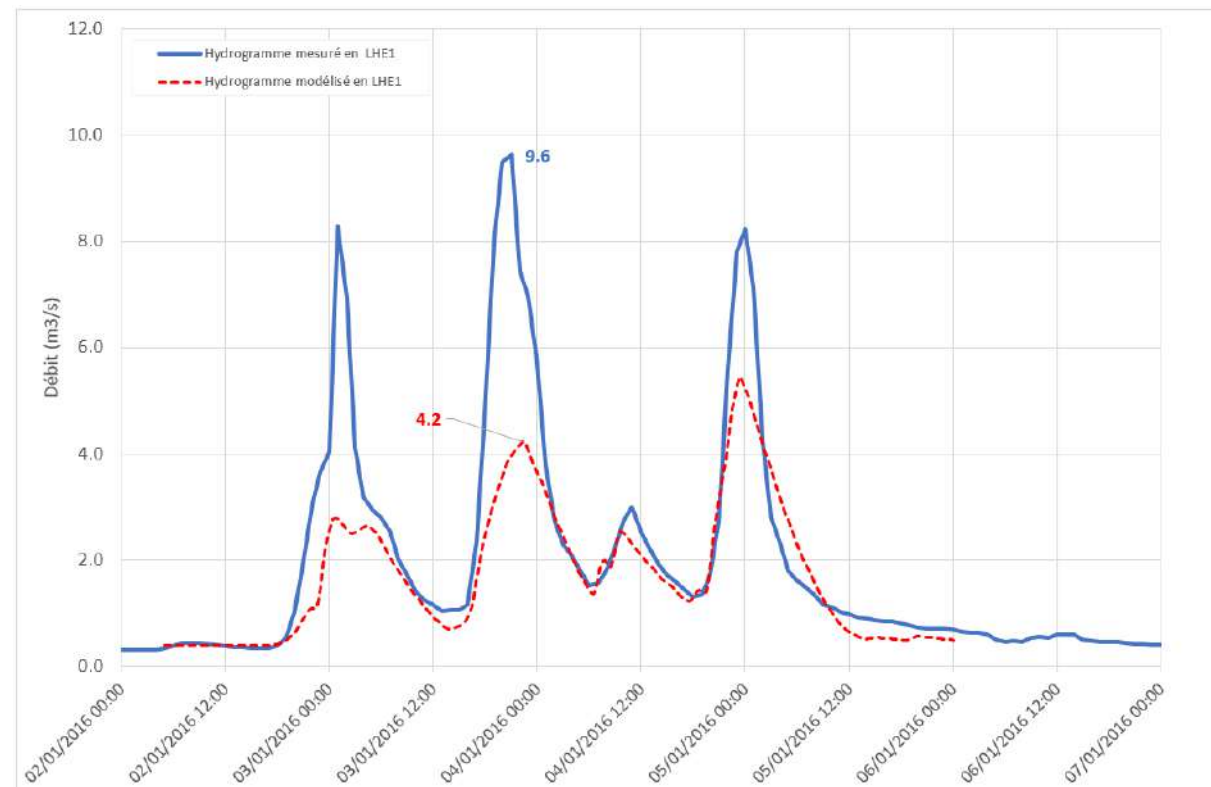


Figure 15 : Hydrogrammes mesuré et simulé en LHE1 (crue de janvier 2016)

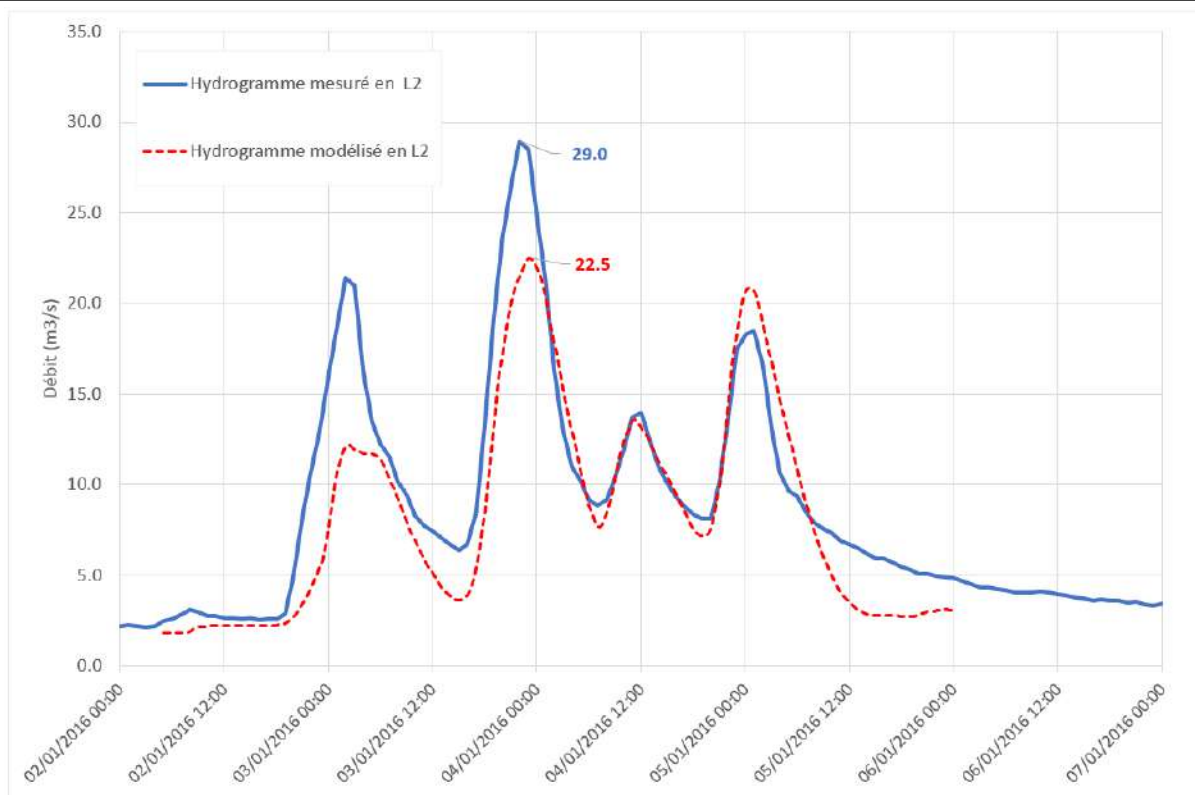


Figure 16 : Hydrogrammes mesuré et simulé en L2 (crue de janvier 2016)

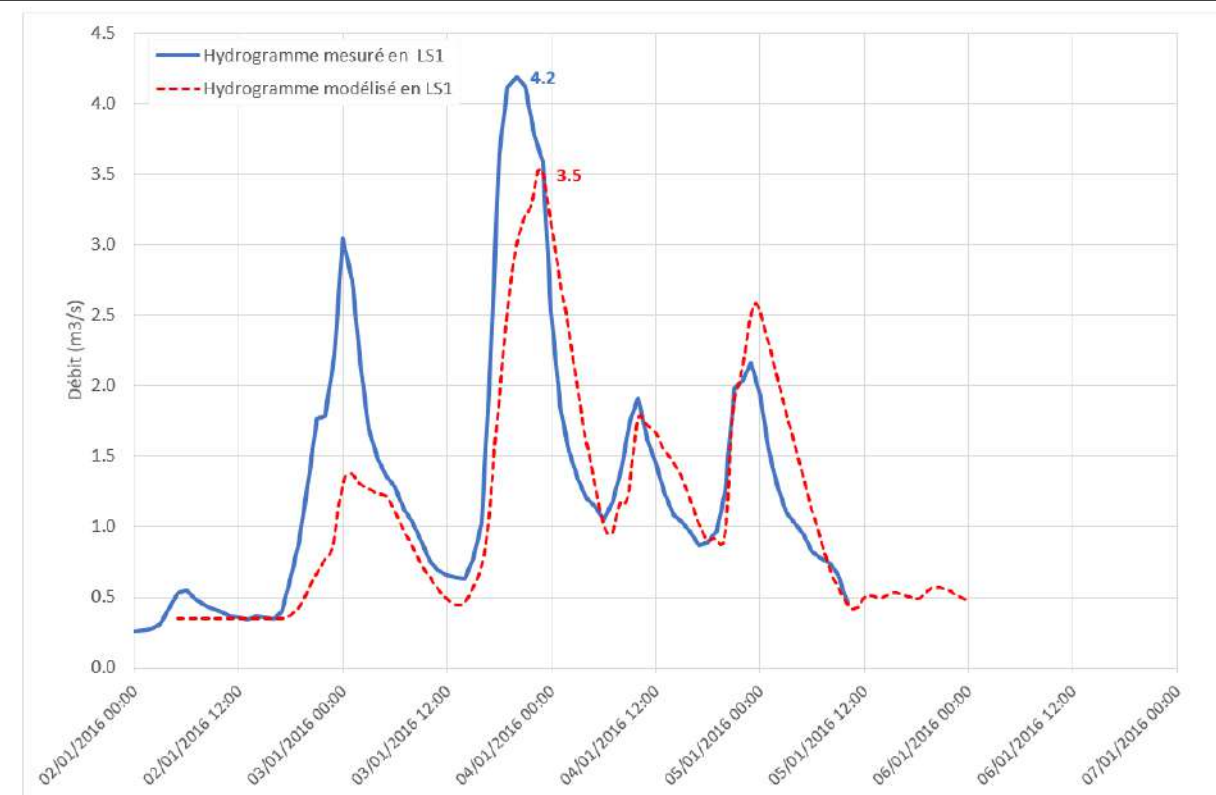


Figure 17 : Hydrogrammes mesuré et simulé en LS1 (crue de janvier 2016)

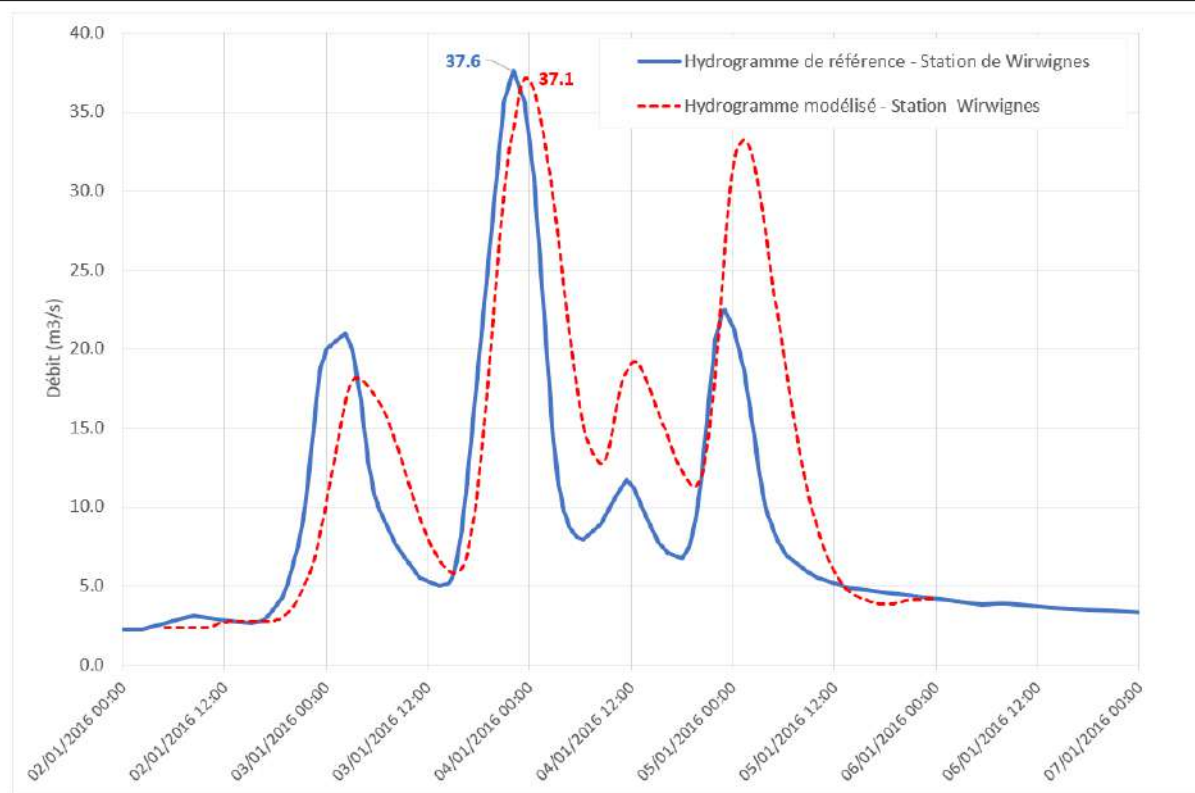


Figure 18 : Hydrogrammes mesuré et simulé à la station de Wirwignes (crue de janvier 2016)

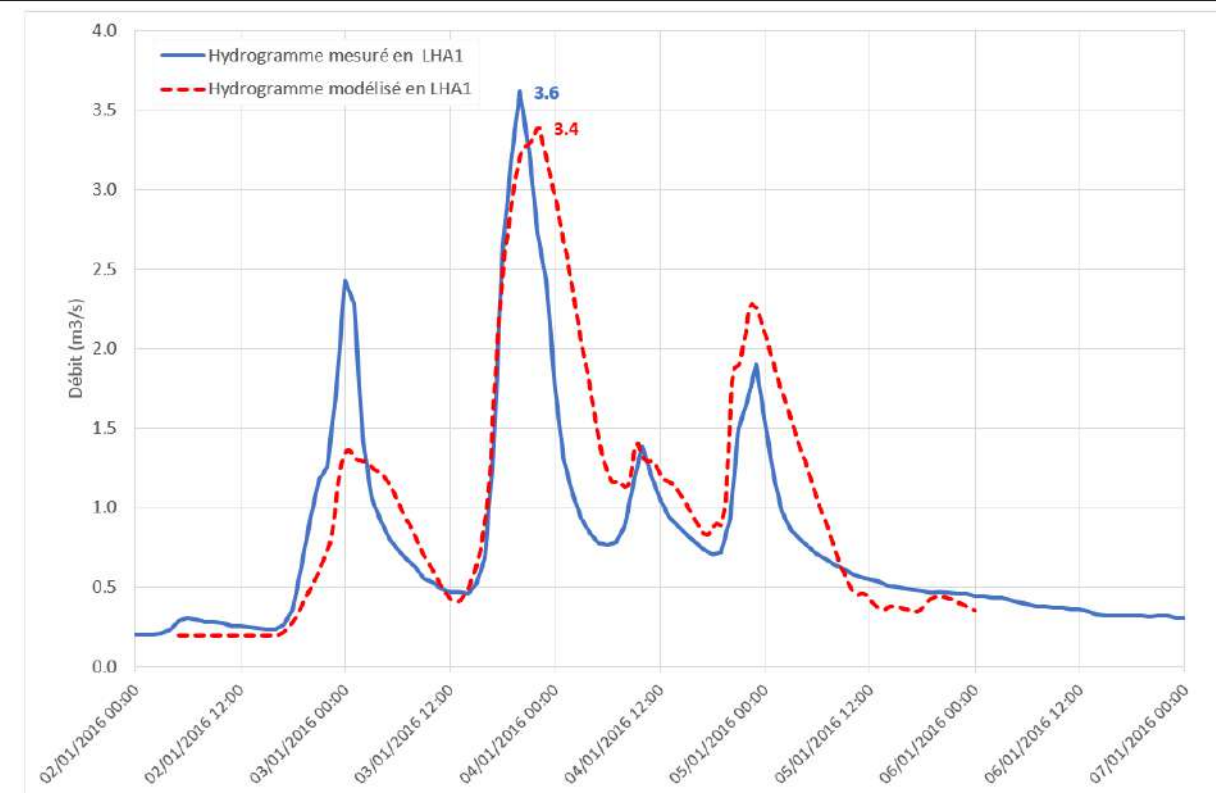


Figure 19 : Hydrogrammes mesuré et simulé en LHA1 (crue de janvier 2016)

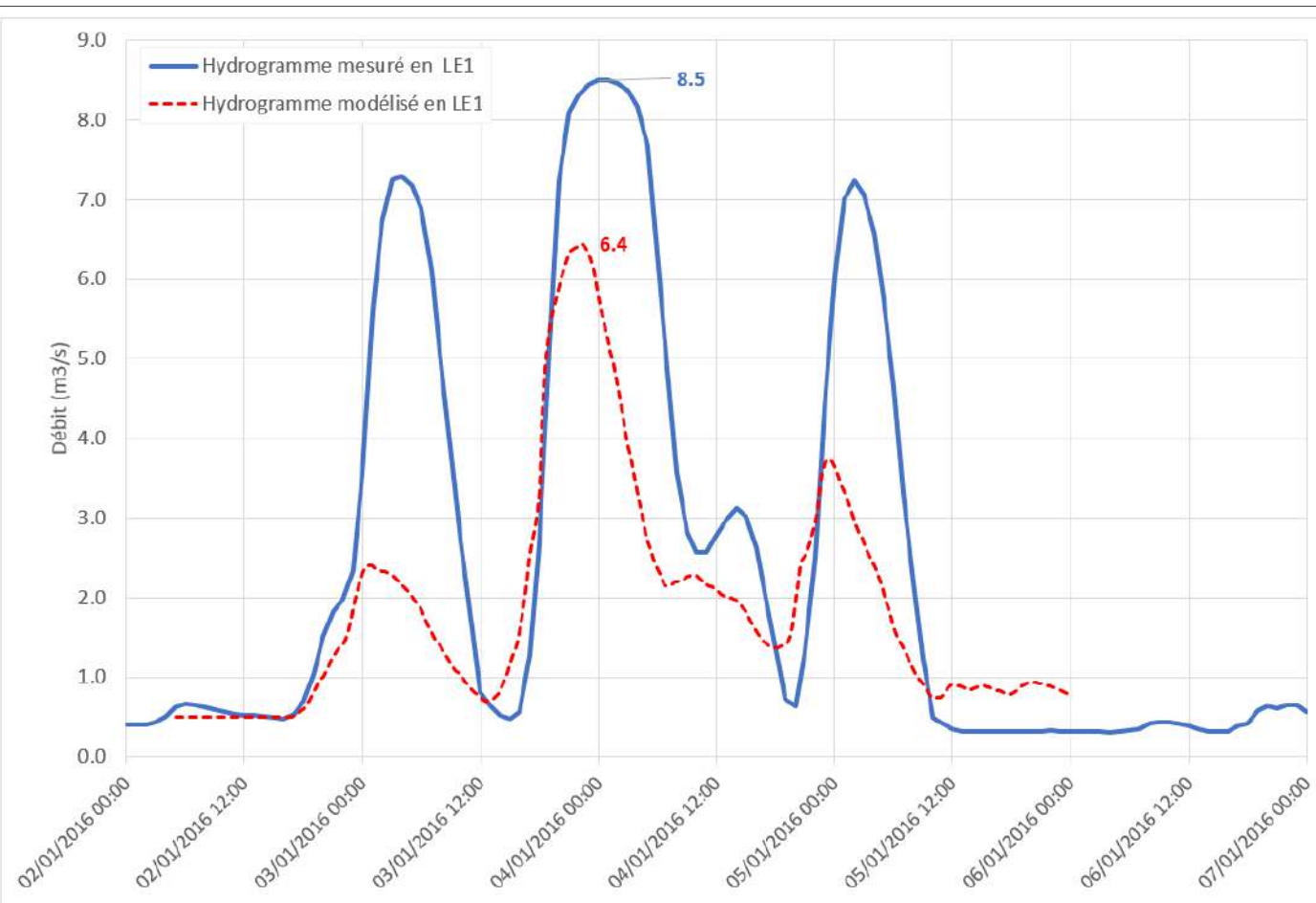


Figure 20 : Hydrogrammes mesuré et simulé en LE1 (crue de janvier 2016)

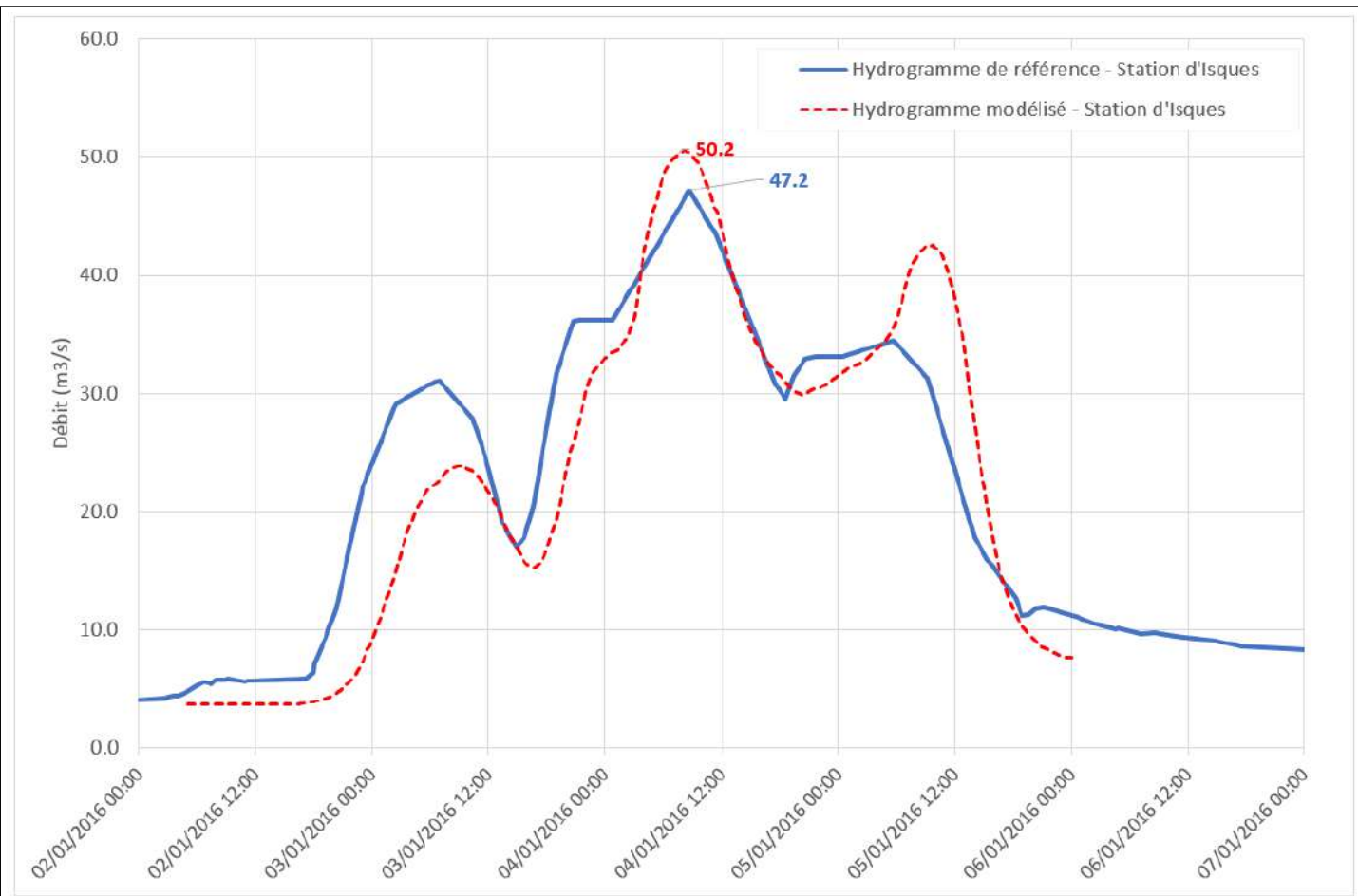


Figure 21 : Hydrogrammes mesuré et simulé à la station d'Isques (crue de janvier 2016)

Le tableau ci-dessous synthétise l'erreur relative entre le mesure et le débit de pointe modélisé pour l'ensemble des points de mesures.

Ce dernier permet de mettre en évidence, la **pertinence du calage sur l'ensemble du linéaire de la Liane**. En effet, les **écarts** calculés pour le point L1 et les stations hydrométriques de Wirwignes et d'Isques sont **inférieurs à 7,4 %**.

Le point de mesures L3-L4 ne sera pas comparé au débit modélisé. En effet, le débit mesuré semble plafonner anormalement à une valeur inférieure au débit de pointe enregistré à Wirwignes alors qu'aucune zone d'expansion de crue pouvant être à l'origine d'un tel écrêtement de l'onde de crue n'est à dénoter.

La représentation des apports des affluents est moins satisfaisante, les écarts pouvant aller jusqu'à 56,2 %. Une tendance à la sous-estimation de ces derniers est à dénoter.

Cependant, au regard des informations transmises par le SYMSAGEB quant à la pertinence des mesures réalisées lors de la campagne de l'hiver 2015-2016, l'incertitude oscille de 10 à 40 % pour les débits. Donc pour l'ensemble des points excepté au droit de LHE1 (en aval du ruisseau d'Henneveux), l'écart calculé reste dans cette fourchette, inférieur à 40%.

Le point permettant de quantifier les apports du ruisseau d'Henneveux sous-estime largement la mesure, alors que les images radar sont cohérentes avec les observations terrestres (pluviomètre d'Henneveux). Des phénomènes de résurgences karstiques ou des apports issus de la nappe de craie peuvent expliquer un tel écart.

Point de mesure	Qpointe mesuré (m ³ /s)	Qpointe modélisé (m ³ /s)	Erreur (%)
L1	7,1	6,9	2,8
LV1	5,4	4,1	22,0
LM1	3,9	2,4	38,4
LHE1	9,6	4,2	56,0
L2	29,0	22,5	22,4
LS1	4,2	3,5	16,5
Wirwignes (DREAL)	37,6	37,1	1,0
LHA1	3,6	3,4	5,5
LE1	8,5	6,4	24,7
Isques (DREAL)	47,2	50,7	7,4

Tableau 7 : Comparaison des débits de pointe modélisés et mesurés pour l'événement de janvier 2016

Calage hydraulique

Il convient maintenant d'analyser la réponse hydraulique du Wimereux en comparant les niveaux d'eau mesurés à ceux simulés aux points de mesures présentés précédemment.

Les résultats sont synthétisés au sein du tableau suivant :

	<i>Niveau max mesuré (m NGF)</i>	<i>Niveau max simulé (m NGF)</i>	<i>Différence (cm)</i>
L1	59,79	59,62	- 17
LV1	59,05	59,11	+ 6
LM1	49,33	49,33	0
LHE1	41,99	41,79	- 20
L2	36,50	37,05 (amont) 35,91 (aval)	
LS1	-	-	-
Wirwignes (DREAL)	24,96	25,14	+ 18
LHA1	33,84	Absence de levé topographique	-
L3-L4	17,44	17,36	- 8
LE1	16,22	16,31	+ 10
Isques (DREAL)	6,57	6,75	+ 28

Tableau 8 : Comparaison des niveaux max mesurés et modélisés pour l'événement de janvier 2016

L'écart entre la mesure et le niveau d'eau modélisé de l'ensemble des points de mesures excepté au droit de la station hydrométrique d'Isques est inférieur à 20 cm, témoignant ainsi de la pertinence du calage.

Au droit de la station d'Isques, le niveau d'eau modélisé surestime la mesure de 28 cm. Cependant le débit modélisé en ce même point est supérieur de 7,4 % et pour un même débit, d'après la courbe de tarage, l'écart ne serait plus que de 6 cm. Cet écart ne remet donc pas en cause la validité du calage.

3.1.3.2 Calage de la crue de novembre 2012

Rappel : Cette crue de novembre 2012 avait été modélisée lors de l'étude de 2014, réalisée par PROLOG Ingénierie pour la DDTM62. Certaines communes riveraines de la Liane avaient été consultées pour donner leur avis sur les emprises inondées. De plus, lors des rencontres avec les communes de juin et juillet 2016 durant la présente étude, les communes ont globalement donné un avis positif sur ces mêmes emprises modélisées.

Calage hydrologique

Pour cet événement on dispose d'une chronique de débit issue de la station hydrométrique située à Wirwignes, qui donne un débit de pointe pour l'épisode considéré de 56,5 m³/s. La modélisation de la crue de novembre 2012 permet de reconstituer un débit de pointe de 55,7 m³/s.

Ainsi, le modèle reproduit fidèlement la réponse du bassin versant en terme de débit de pointe, la surestimation étant inférieure à 1 %.

En terme de dynamique et de volume, la superposition de l'hydrogramme mesuré et de celui simulé par le modèle à Wirwignes permet de conclure quant à **la bonne représentativité hydrologique de l'approche mise en place pour la crue de novembre 2012.**

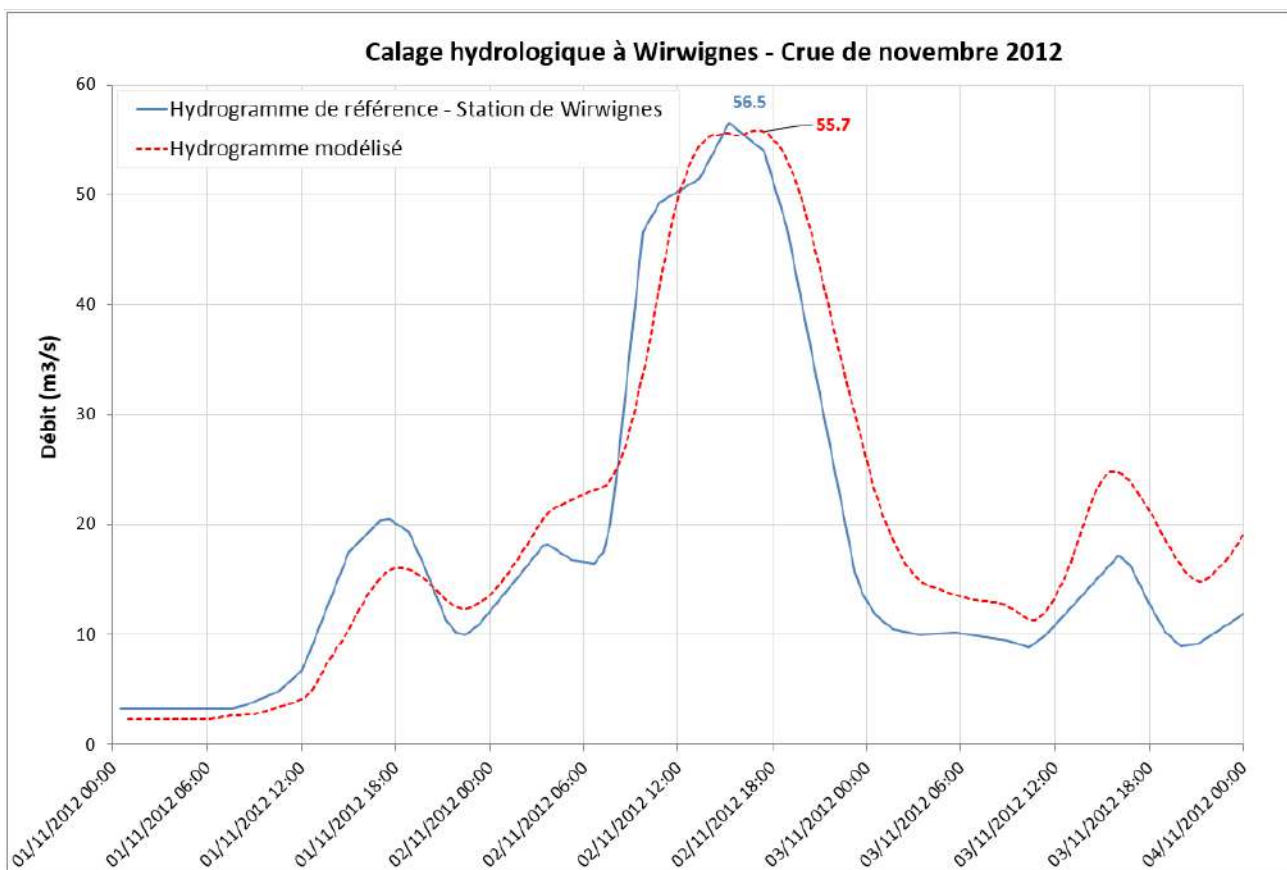


Figure 22 : Hydrogramme mesuré et simulé à la station de Wirwignes (crue de novembre 2012)

Calage hydraulique

Il convient également de s'assurer de **la bonne représentativité hydraulique du modèle**, et donc de s'assurer que la reproduction des niveaux d'eau historiques observés le long de la Liane est correcte.

Pour cet événement, les données de calage sont :

- le limnigramme de la station hydrométrique de Wirwignes ;
- les repères de crue et témoignages issus de la phase historique ou transmis par la DDTM62 ;
- les Zones d'Inondation Constatées (ZIC) fournies par la DDTM62.

L'ensemble des données a été dûment comparé aux résultats de la simulation numérique par le biais de calcul de marge d'erreur, de cartes représentant les emprises inondables, etc.

Le tableau ci-dessous synthétise l'écart relatif entre la mesure et le niveau d'eau simulé au droit de la station hydrométrique de Wirwignes.

	Niveau max mesuré (m NGF)	Niveau max simulé (m NGF)	Différence (cm)
Wirwignes	25,95	25,86	- 9

Tableau 9 : Comparaison du niveau mesuré et modélisé au droit de la station hydrométrique de Wirwignes

Le tableau ci-dessous confronte les résultats du modèle avec les repères de crues et témoignages récoltés au cours de l'analyse historique ou transmis par la DDTM62. Des cartes ci-après permettent de localiser ces derniers.

Repère/Témoignage	Commune	Fiabilité	Observation	Résultat modèle	Différence (modèle/observation)
P_CAR_1_01_11_2012	Carly	2	Jusqu'à 10 cm d'eau ont été observés dans la maison	15 cm d'eau	< 20 cm
P_HESDIG_66_01_11_2012	Hesdigneul-lès-Boulogne	2	Phénomène de ruissellement, 25 cm d'eau relevés dans ce secteur	Environ 10 cm d'eau sur ce secteur	< 20 cm
P_SL_60_01_11_2012	Saint-Léonard	2	Environ 80 cm d'eau relevé sur le parking	1 m modélisé sur le parking	< 20 cm
P_SL_142_01_11_2012	Saint-Léonard	2	Environnement 15 cm d'eau sur la voirie	25 cm modélisé	< 20 cm
P_SAM_53_01_11_2012	Samer	3	Sur le chemin de l'Edre, le terrain est inondé autour de l'habitation	Terrain atteint par les eaux	Faible
P_SAM_54_01_11_2012	Samer	3	Environ 40 cm d'eau ont été constatés sur la rue Neufchâtel au droit de la station d'épuration	Vingtaine de centimètres d'eau sur ce secteur	Faible
P_SAM_55_01_11_2012	Samer	3	Les débordements du cours d'eau ont menacé une habitation, l'eau a atteint le seuil de la maison	Secteur atteint par les eaux	Faible

Tableau 10 : Comparaison des niveaux historiques et modélisés sur le bassin versant de la Liane pour la crue de novembre 2012

Aussi, l'ensemble des témoignages sont correctement reproduits par le modèle hydraulique réalisé.

Les cartes présentées ci-après permettent de comparer les emprises inondables modélisées issues du débordement des cours d'eau ainsi que des phénomènes de ruissellement avec les ZIC. Ont également été ajoutés, les repères de crues, les témoignages ainsi que les axes de communications atteints pas les eaux. La comparaison entre ces ZIC et les résultats du modèle montre globalement une bonne représentation des champs d'inondation historiques et des zones de désordres locales et ce sur l'ensemble du bassin versant de la Liane. Certaines zones peuvent toutefois présenter des différences en termes d'emprise entre observations historiques et résultats du modèle. Ces différences peuvent s'expliquer par :

- l'incertitude existante sur la précision des lignes de berges (berges précises à 10-20 cm), ce qui de ce fait, peut avoir un impact sur la mise en eau ou non d'une zone d'expansion historique ;
- la précision du MNT ;
- la précision des témoignages recensés et du tracé des ZIC.

A la vue de tous ces résultats, il est possible de conclure quant à la validité du calage du modèle pour la crue de novembre 2012, aussi bien en terme de réponse hydrologique que de comportement hydraulique.

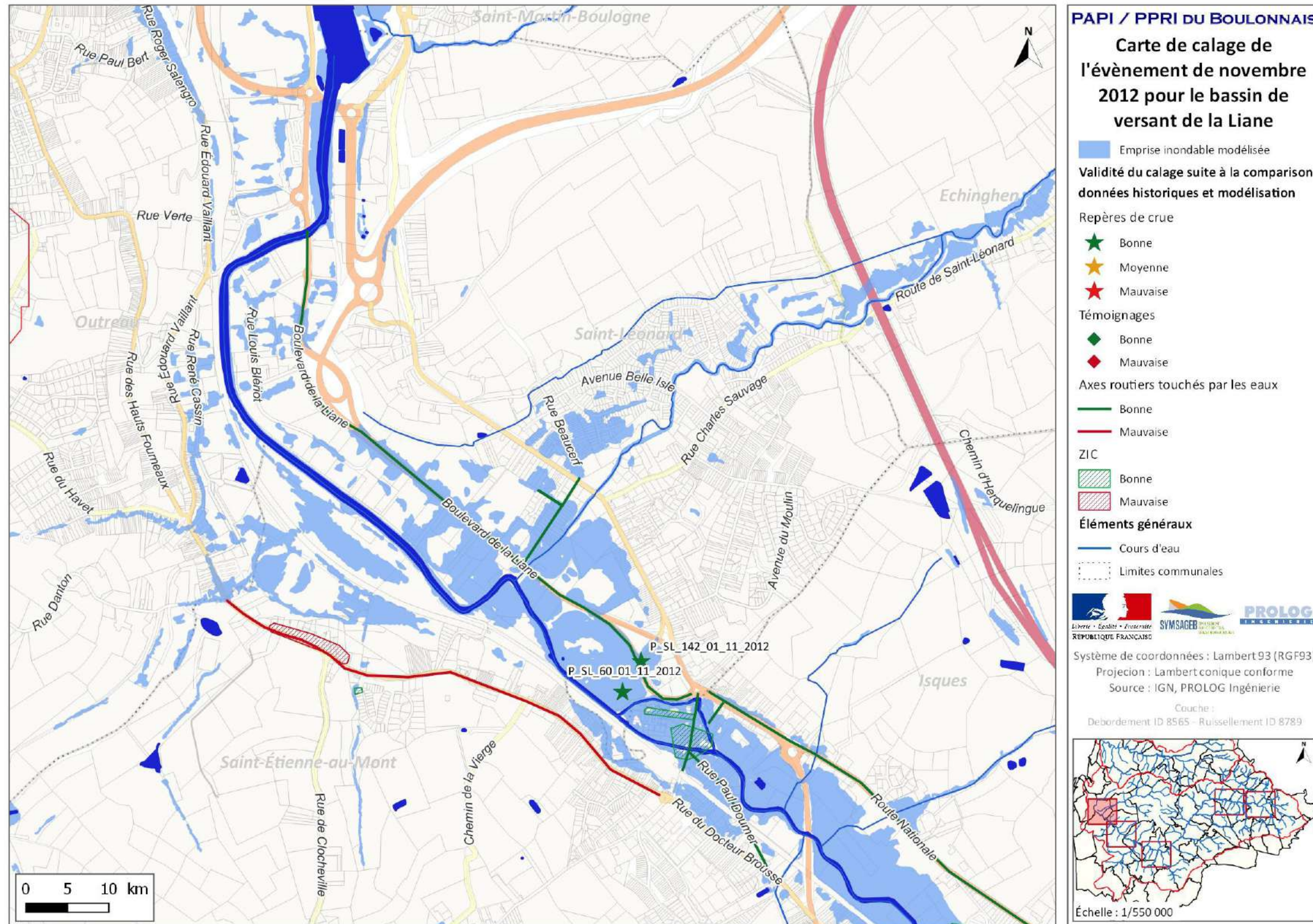


Figure 23 : Emprise inondable au niveau des communes de Saint-Léonard et de Saint-Etienne-au-Mont pour la crue de novembre 2012

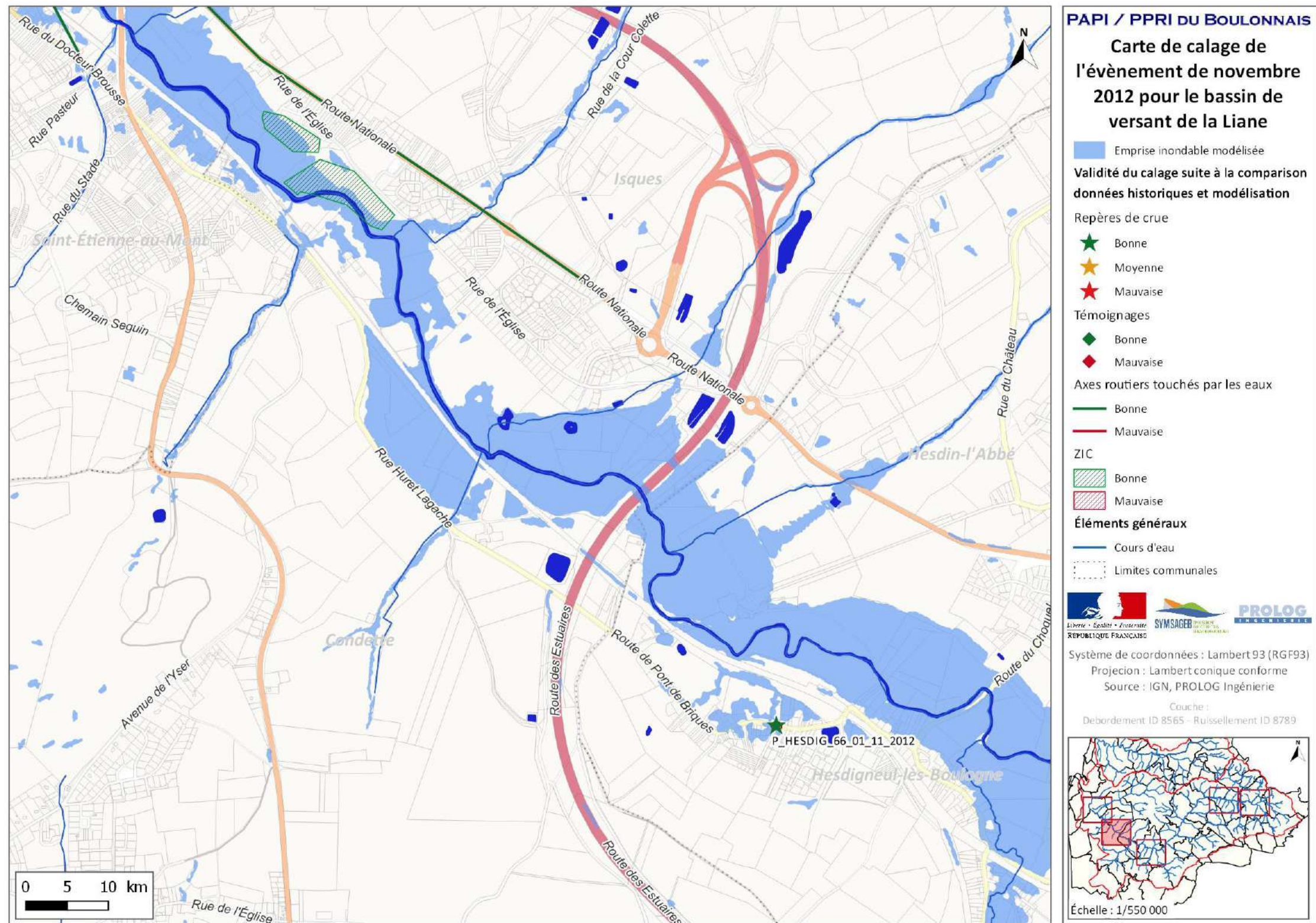


Figure 24 : Emprise inondable au niveau des communes d'Isques, d'Hesdin-l'Abbé et d'Hesdigneull-lès-Boulogne pour la crue de novembre 2012

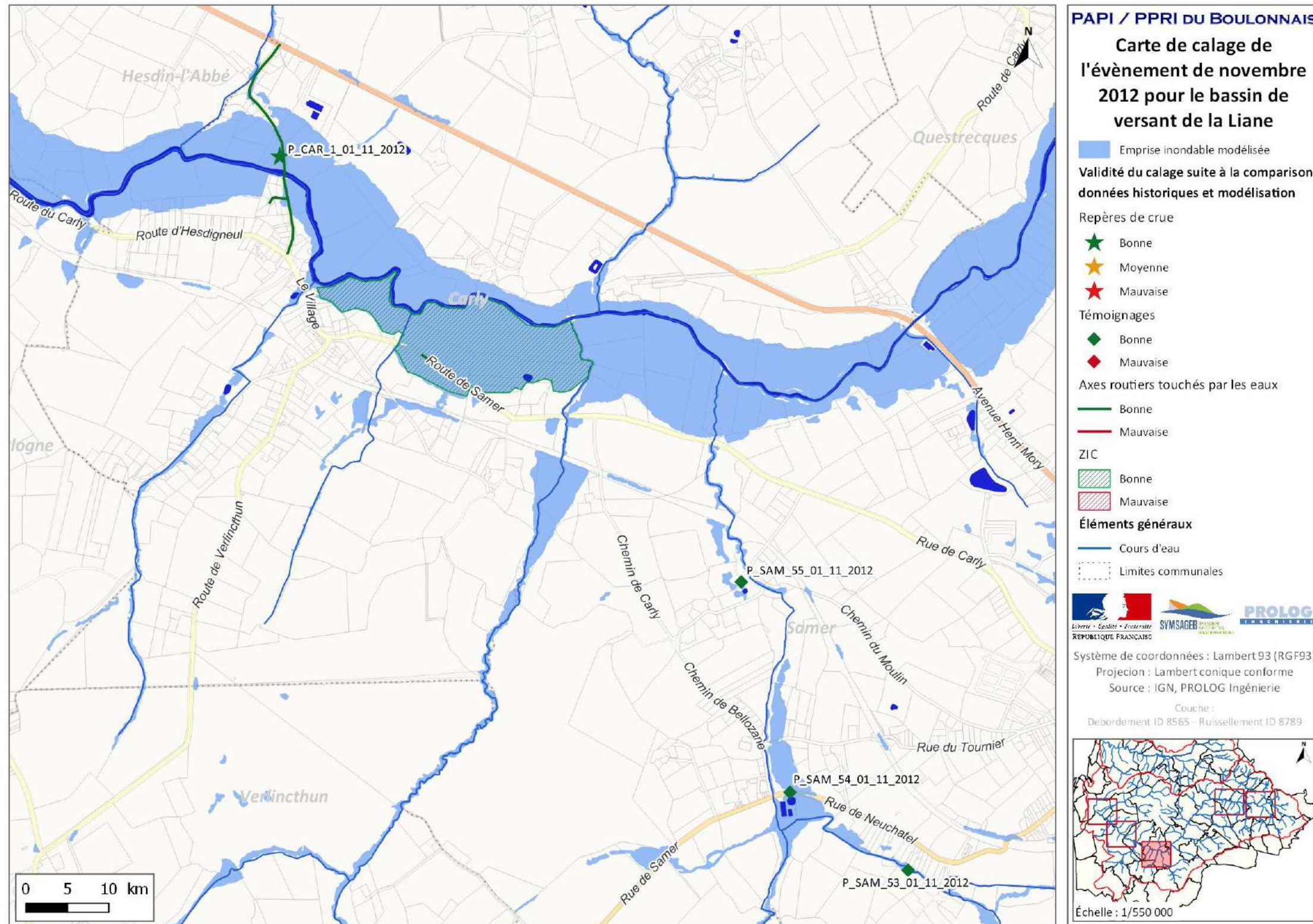


Figure 25 : Emprise inondable au niveau de la commune de Samer pour la crue de novembre 2012

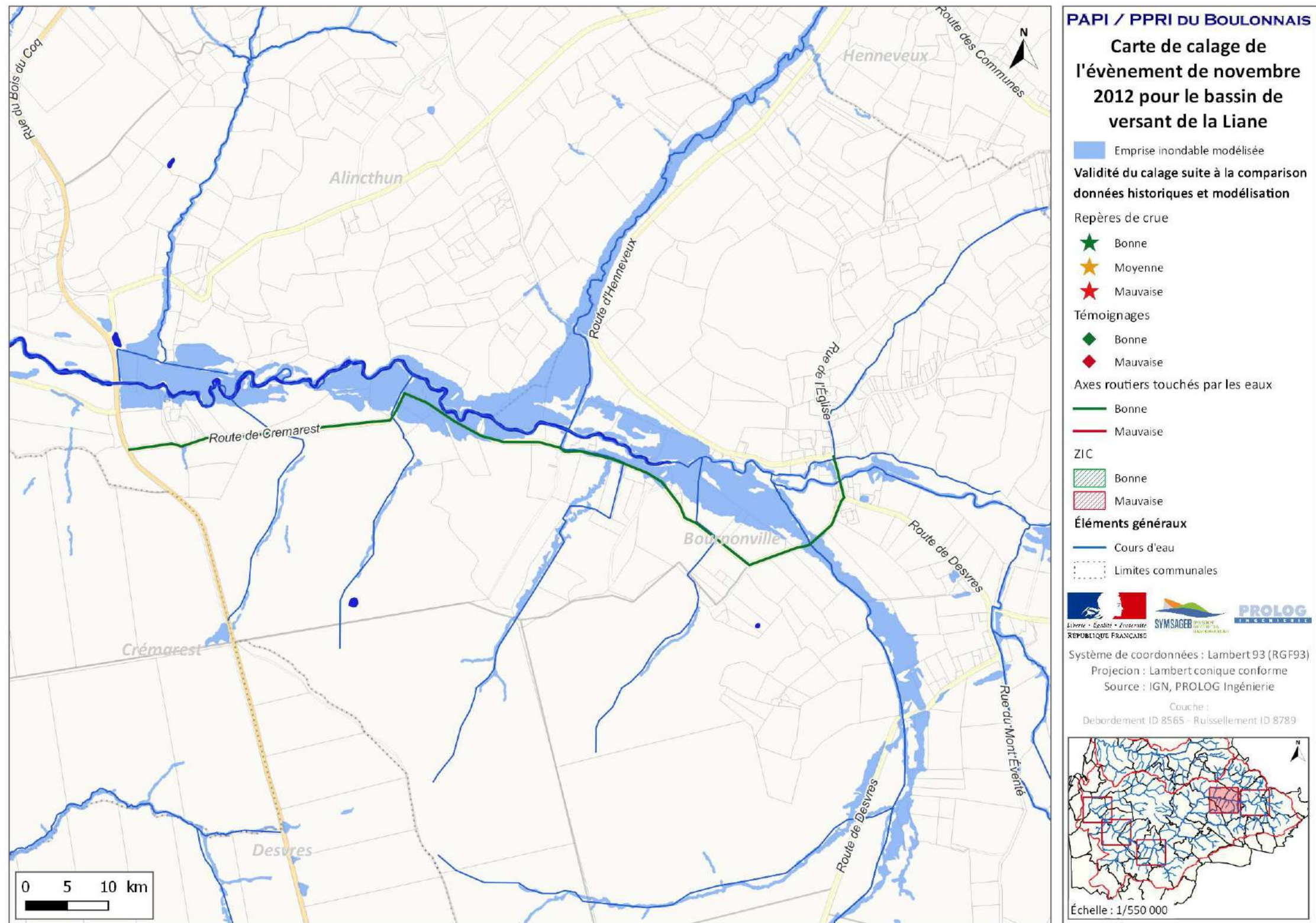


Figure 26 : Emprise inondable au niveau de la commune de Bournonville pour la crue de novembre 2012

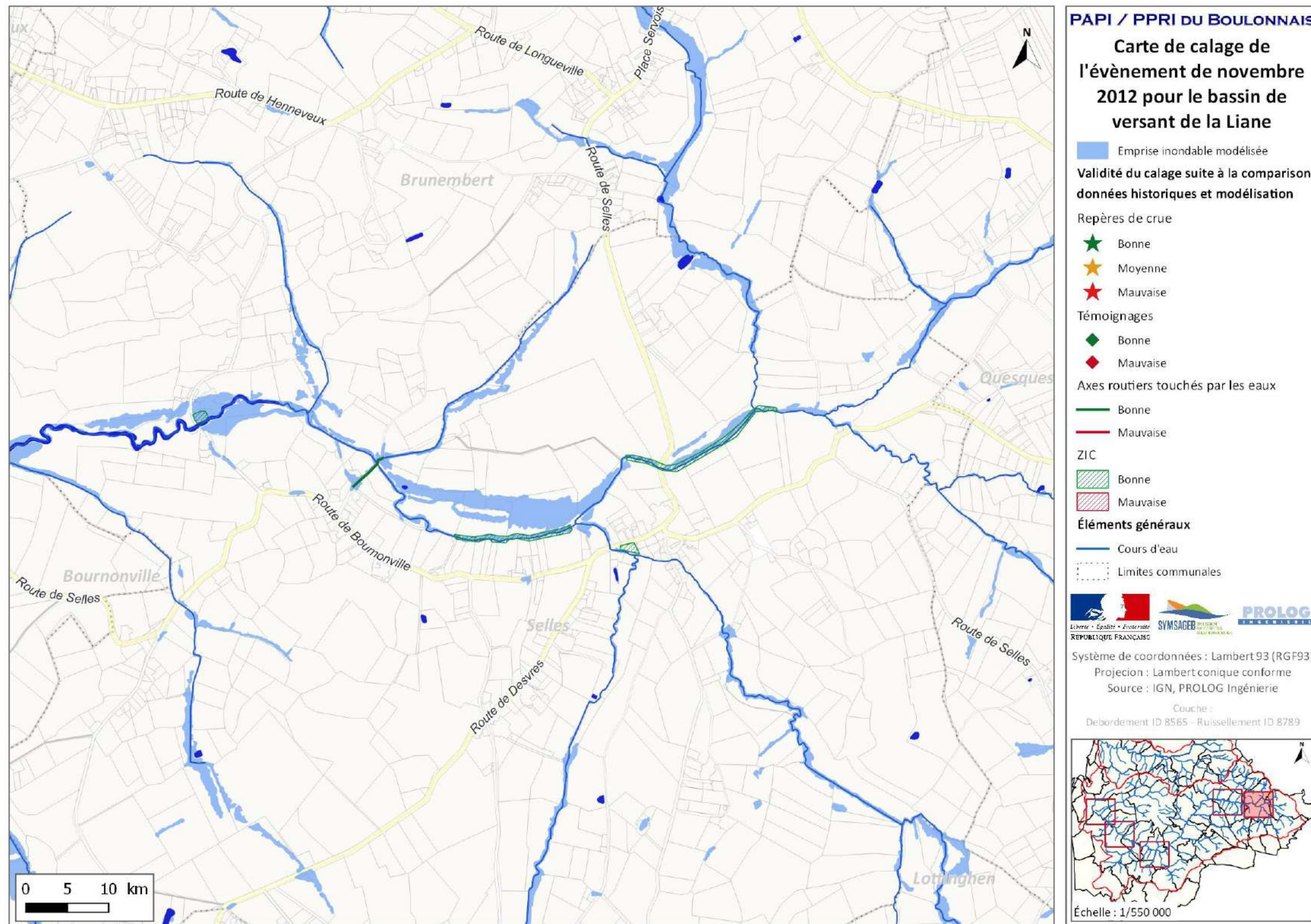


Figure 27 : Emprise inondable au niveau de la commune de Selles pour la crue de novembre 2012

3.1.3.3 Calage de la crue de novembre 2009

Rappel : Cette crue de novembre 2009 avait été modélisée lors de l'étude de 2014, réalisée par PROLOG Ingénierie pour la DDTM62. Certaines communes riveraines de la Liane avaient été consultées pour donner leur avis sur les emprises inondées. De plus, lors des rencontres avec les communes de juin et juillet 2016 durant la présente étude, les communes ont globalement donné un avis positif sur ces mêmes emprises modélisées.

Calage hydrologique

Pour cet événement, la chronique de débit de la station hydrométrique de Wirwignes permet de juger de la pertinence du calage hydrologique.

Le débit de pointe mesuré pour cet événement est de 46,7 m³/s alors que celui modélisé atteint les 50,7 m³/s (surestimation de 8,5 %).

Le graphique ci-dessous souligne le bon calage du modèle construit pour l'épisode de novembre 2009.

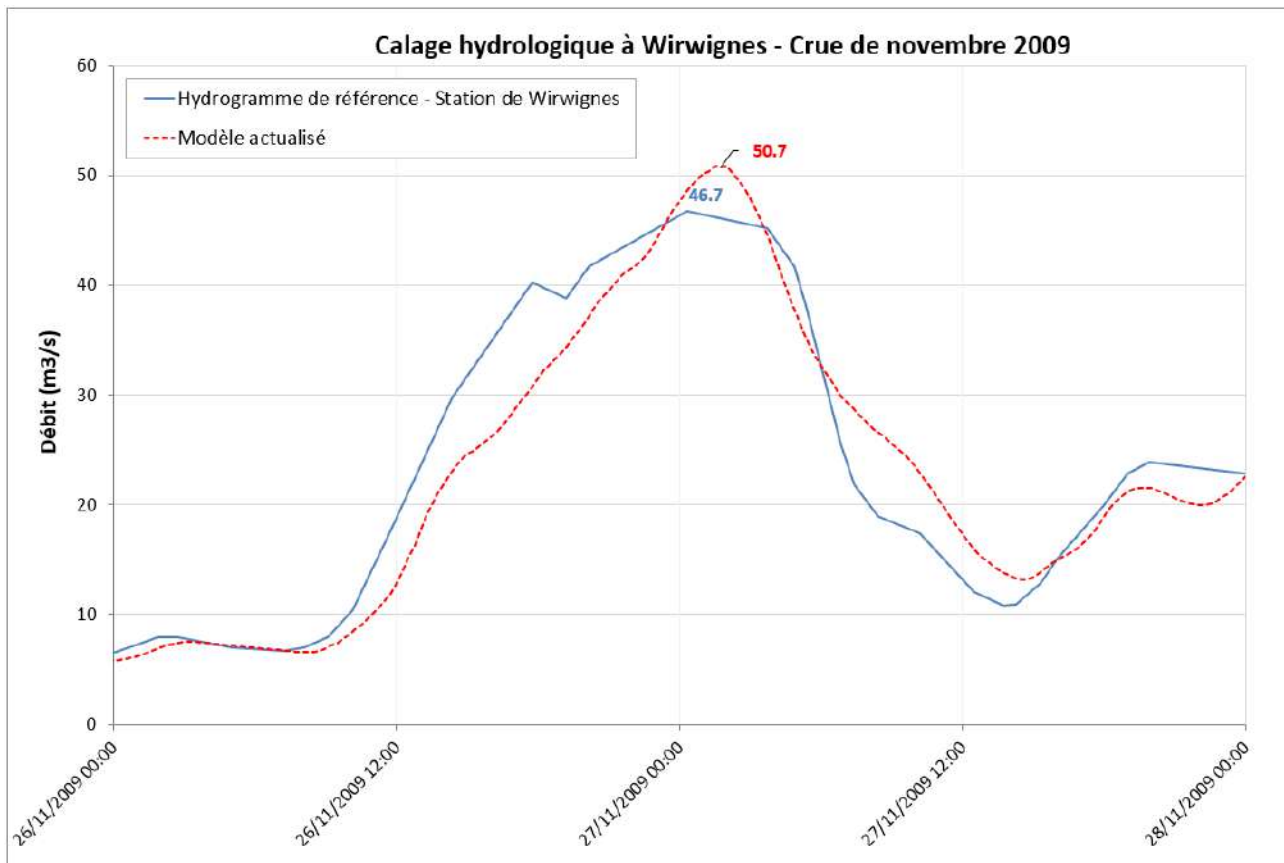


Figure 28 : Hydrogrammes mesuré et simulés à la station de Wirwignes

Suite à la bonne représentation de ce dernier événement, il est ainsi possible de valider la pertinence du jeu de paramètres retenu pour la modélisation hydrologique du bassin versant de la Liane.

Calage hydraulique

L'analyse de la cohérence entre les repères de crues historiques et les niveaux simulés permettent de juger de la pertinence du modèle. Pour cet épisode de hautes eaux, de nombreuses données ont été mises à notre disposition, tel que :

- les niveaux d'eau de la Liane au niveau des stations limnimétriques du SYMSAGEB à Samer et Hesdin l'Abbé, et de la station hydrométrique de Wirwignes ;
- des repères de crues dans le lit majeur fournis par la DDTM62 et allant du pont de la RD 901 à Samer à l'aval de Pont-de-Bricques ;
- des repères de crues ainsi que des témoignages récoltés lors de la phase historique de la présente étude ;
- les Zones d'Inondation Constatées (ZIC) fournies par la DDTM62 ;
- des photographies aériennes d'Etienfort à l'exutoire de la Liane prise au lendemain de l'événement soit en décrue.

Le tableau suivant présente les résultats du calage au niveau des stations limnimétriques.

	Niveau max mesuré (m NGF)	Niveau max simulé (m NGF)	Différence (cm)
Wirwignes DREAL	25,47	25,70	+ 23
Samer SYMSAGEB	17,57	17,71	+ 14
Hesdin l'Abbé SYMSAGEB	11,98	11,81	- 17

Tableau 11 : Comparaison du niveau mesuré et modélisé au droit de la station hydrométrique de Wimille

L'écart entre la mesure et le niveau modélisé au droit de la station de Wirwignes est supérieur à 20 cm. Cependant, le débit de pointe est surestimé de 8,5%, et pour un même débit, d'après la courbe de tarage, l'écart ne serait plus que de 3 cm. Cet écart ne remet donc pas en cause la validité du calage.

Pour les deux autres points de contrôles, cet écart est inférieur à 20 cm.

Le tableau ci-dessous conforte les résultats du modèle avec les témoignages récoltés au cours de l'analyse historique. Cette comparaison s'effectue donc pour les débordements maximaux obtenus au cours de la crue.

<i>Témoignage</i>	<i>Commune</i>	<i>Fiabilité</i>	<i>Observation</i>	<i>Résultat modèle</i>	<i>Différence (modèle/observation)</i>
P_BAI_94_26_11_2009	Baincthun	3	Pont de la route de Desvres atteint par les eaux	Pont submergé	Faible
P_BAI_102_26_11_2009	Baincthun	3	Pont de la rue du Courgain atteint par les eaux	Pont submergé	Faible

L'ensemble des repères de crues transmis par la DDTM62 a été levé lors de la décrue, le 27/11/2009 de 12h30 à 15h30, le tableau ci-dessous compare les hauteurs d'eau mesurées avec celles modélisées.

<i>Repère</i>	<i>Commune</i>	<i>Fiabilité</i>	<i>Observation</i>	<i>Résultat modèle</i>	<i>Différence (modèle/observation)</i>
PHE-Z01-62775	Saint-Léonard	3	82 cm d'eau	64 cm d'eau	- 18
PHE-Z02-62746	Saint-Etienne-au-Mont	3	75 cm d'eau	68 cm d'eau	- 4
PHE-Z03-62474	Isques	3	50 cm d'eau	68 cm d'eau	+ 18
PHE-Z04-62448	Hesdin-l'Abbé	3	80 cm d'eau	60 cm d'eau	- 20
PHE-Z05-62446	Hesdigneul-lès-Boulogne	3	20 cm d'eau	34 cm d'eau	+ 14
PHE-Z06-62446	Hesdigneul-lès-Boulogne	3	45 cm d'eau	55 cm d'eau	+ 10
PHE-Z07-62446	Hesdigneul-lès-Boulogne	3	37 cm d'eau	54 cm d'eau	+ 17
PHE-Z08-62214	Carly	3	10 cm d'eau	12 cm d'eau	+ 2
PHE-Z10-62773	Samer	3	Limite de débordement	Limite de débordement	

Le modèle reproduit donc de manière très satisfaisante les témoignages et repères de crue. Seul un repère de crue au niveau de la commune d'Hesdin-l'Abbé présente une hauteur modélisée plus faible que celle relevée lors de la crue. Il demeure cependant important de préciser que les débordement en lit majeur sont représenté par un maillage bi-dimensionnel qui moyenne l'altimétrie de l'élément de calcul en fonction du terrain naturel. Aussi, il ne peut représenter un point bas sur une voirie par exemple pouvant dès lors expliquer cette différence.

Les cartes ci-dessous permettent de visualiser l'ensemble des témoignages et repères de crue présents sur le bassin versant de la Liane. Elles autorisent également la comparaison des ZIC recensées lors des entretiens avec les communes et celles transmises par la DDTM62 avec les emprises inondables modélisées. Il est important de préciser que le modèle hydraulique réalisé ne peut retranscrire parfaitement toutes les zones inondées et qu'il peut y avoir des écarts. Ces écarts peuvent être dus à la précision du MNT, de ZIC issues de photographies aériennes, des témoignages, etc. sans pour autant altérer la validité du calage. En effet, un calage sur 80 % des points de comparaison est considéré comme bon.

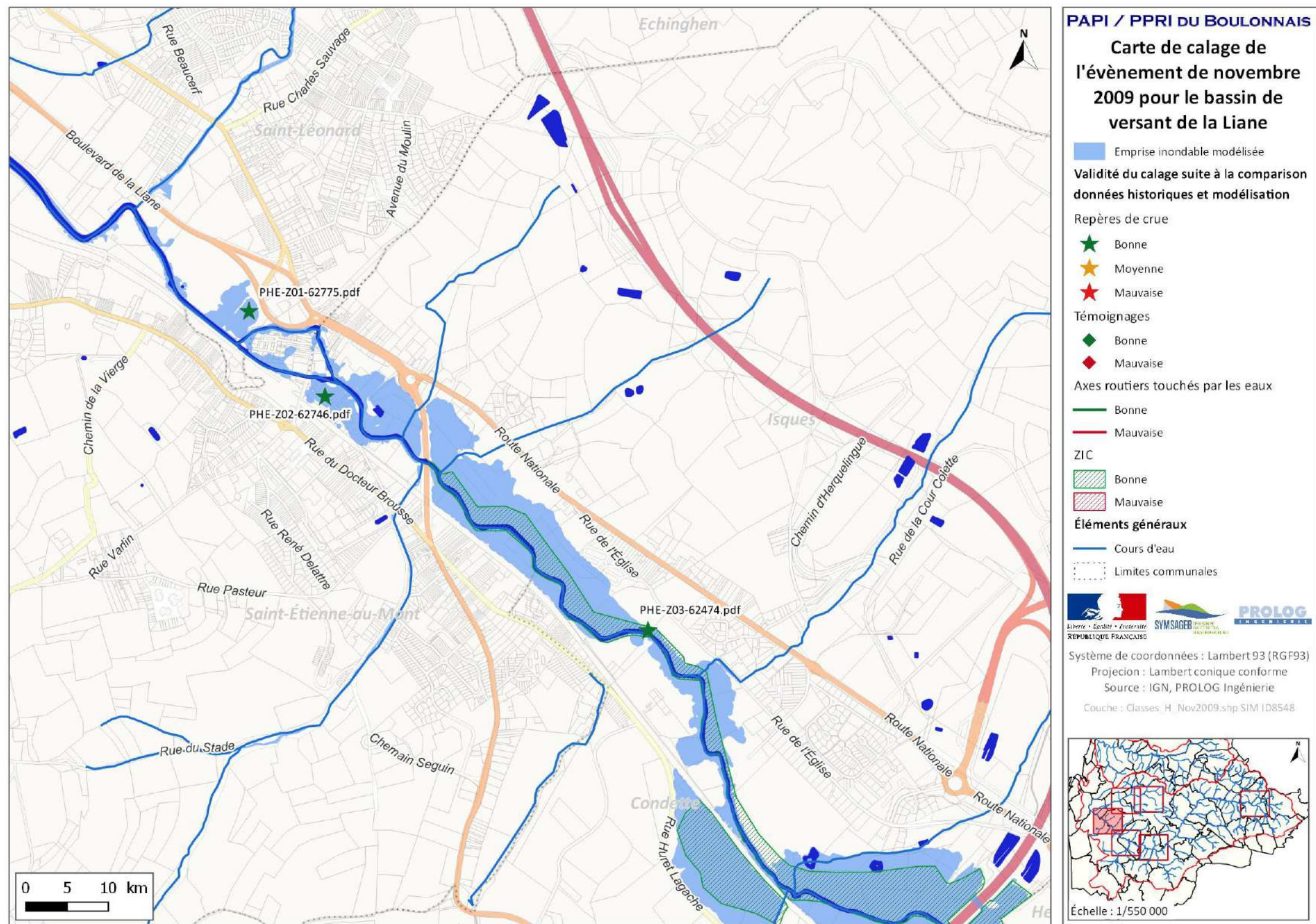


Figure 29 : Emprise inondable maximale au sein des communes de Saint-Etienne-au-Mont et de Saint-Léonard pour la crue de novembre 2009

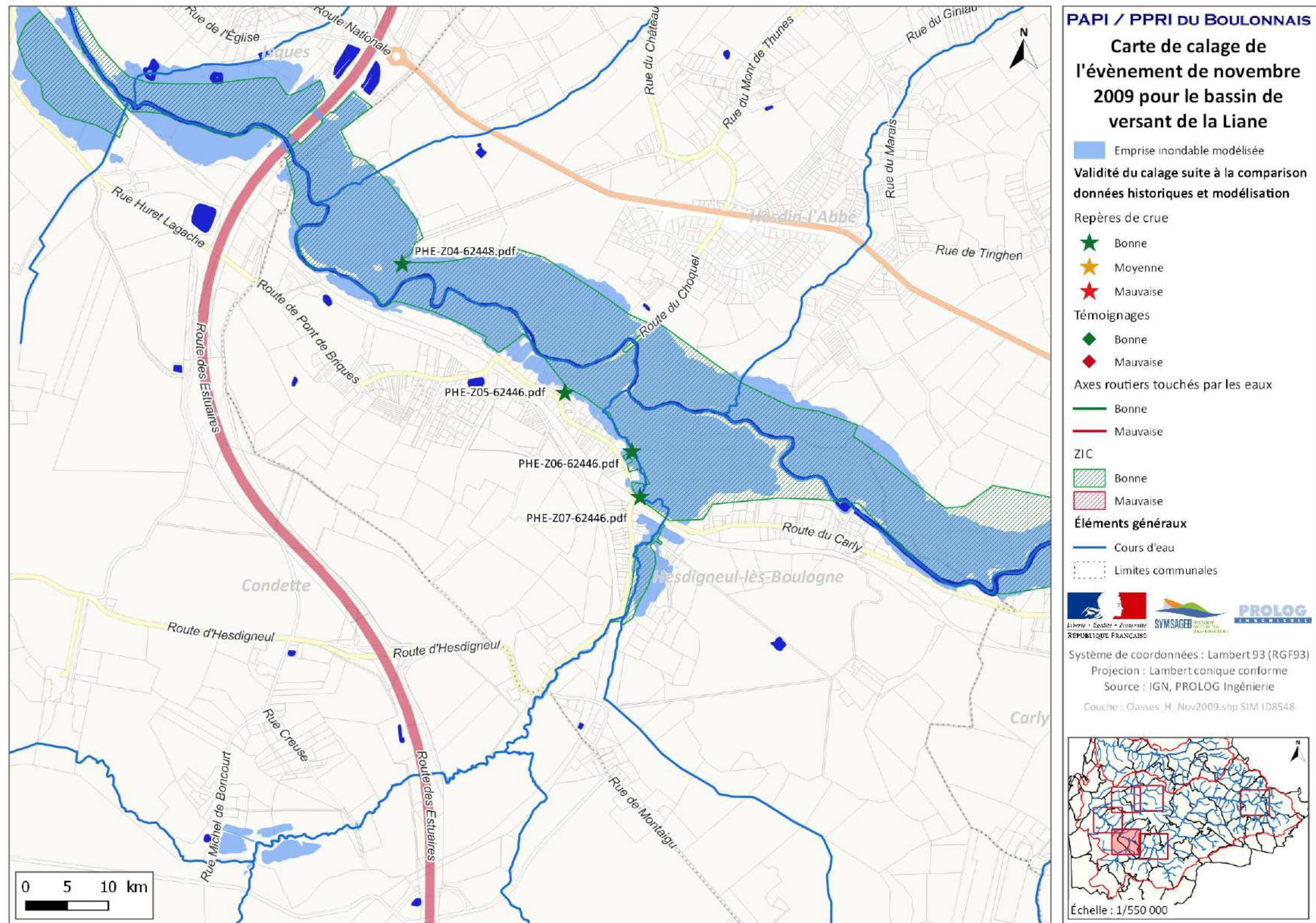


Figure 30 : Emprise inondable maximale au sein des communes d'Hesdin-l'Abbé et d'Hesdigneul-lès-Boulogne pour la crue de novembre 2009

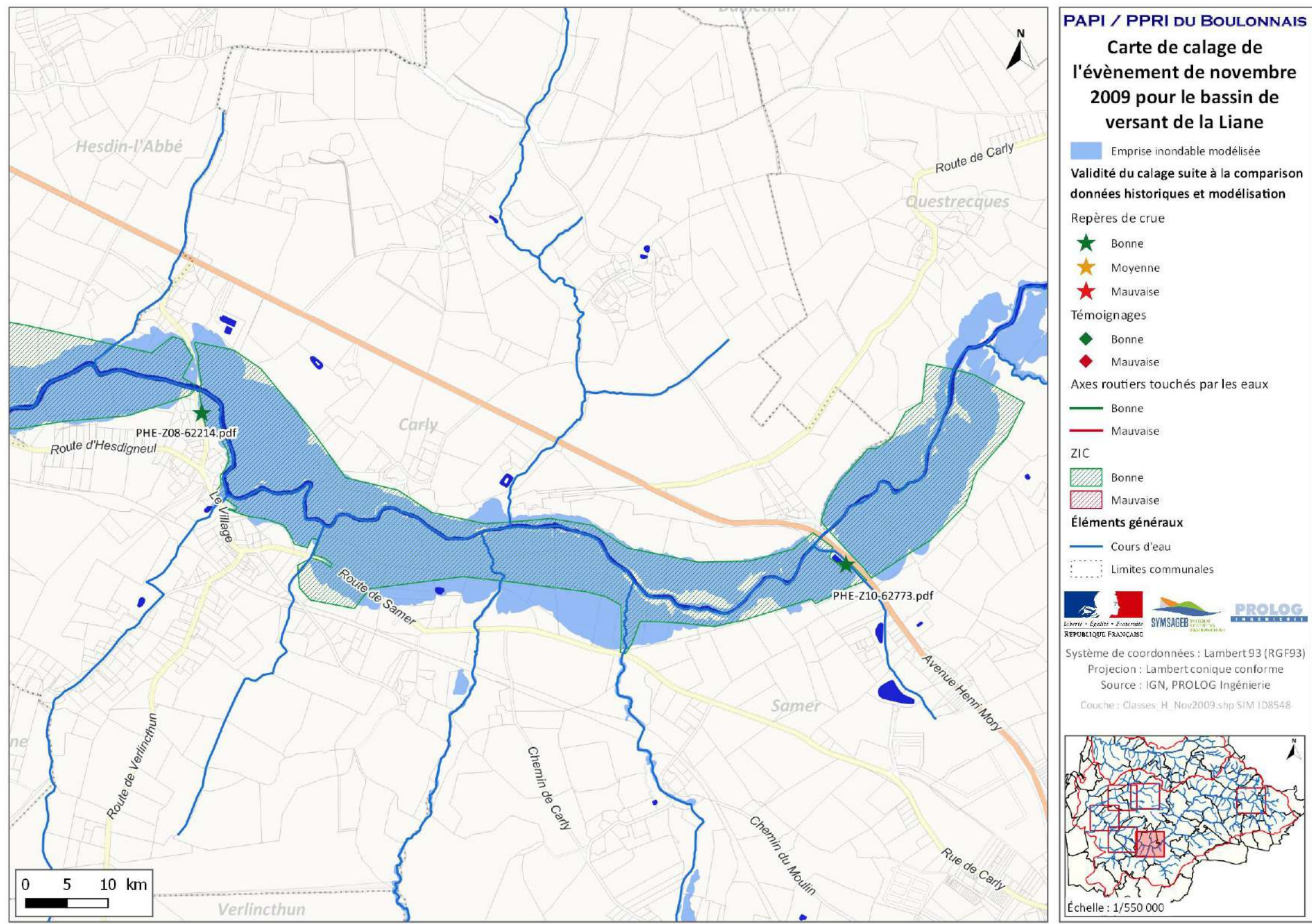


Figure 31 : Emprise inondable maximale au sein des communes de Carly et de Samer pour la crue de novembre 2009

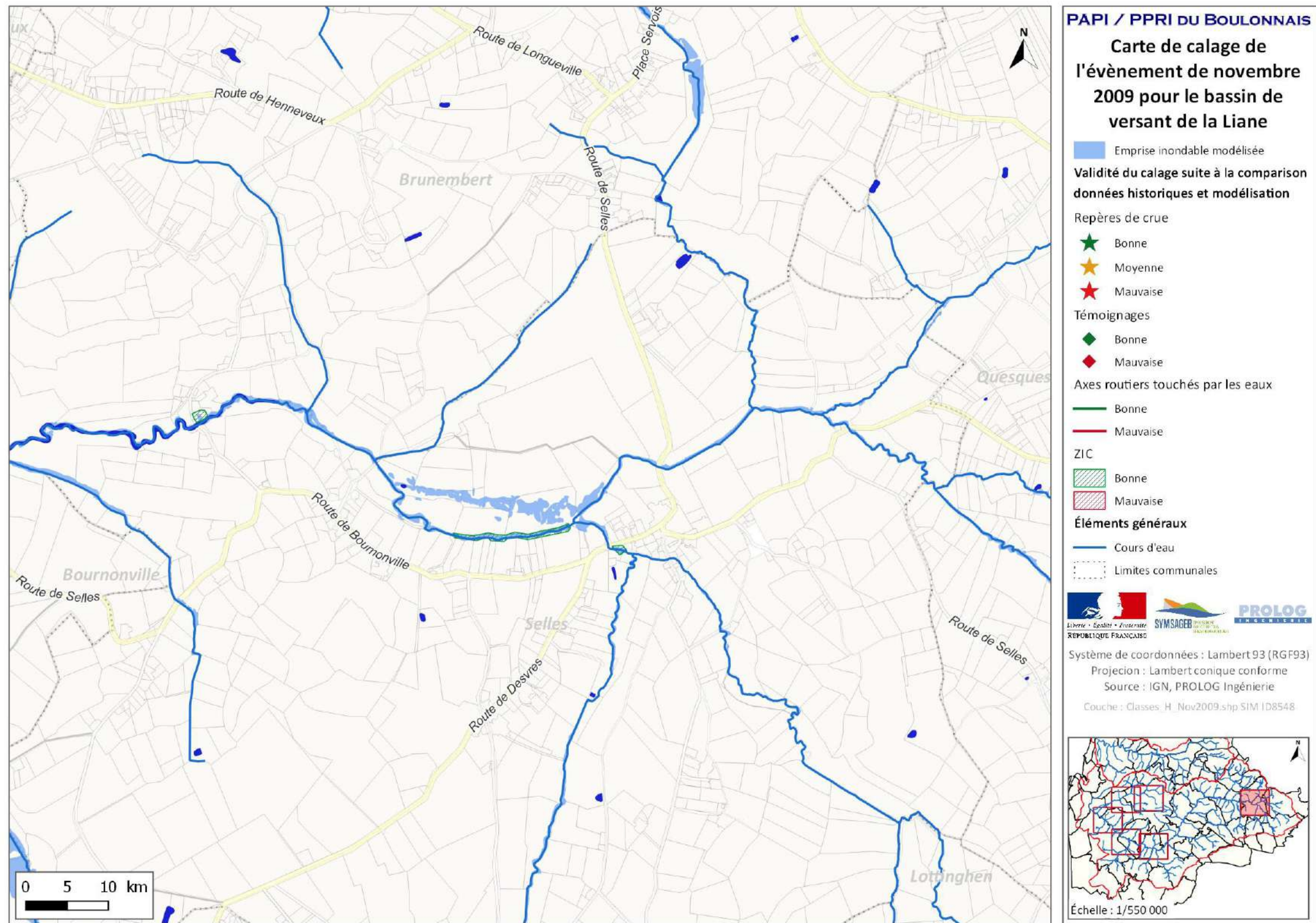


Figure 32 : Emprise inondable maximale au sein de la commune de Selles pour la crue de novembre 2009

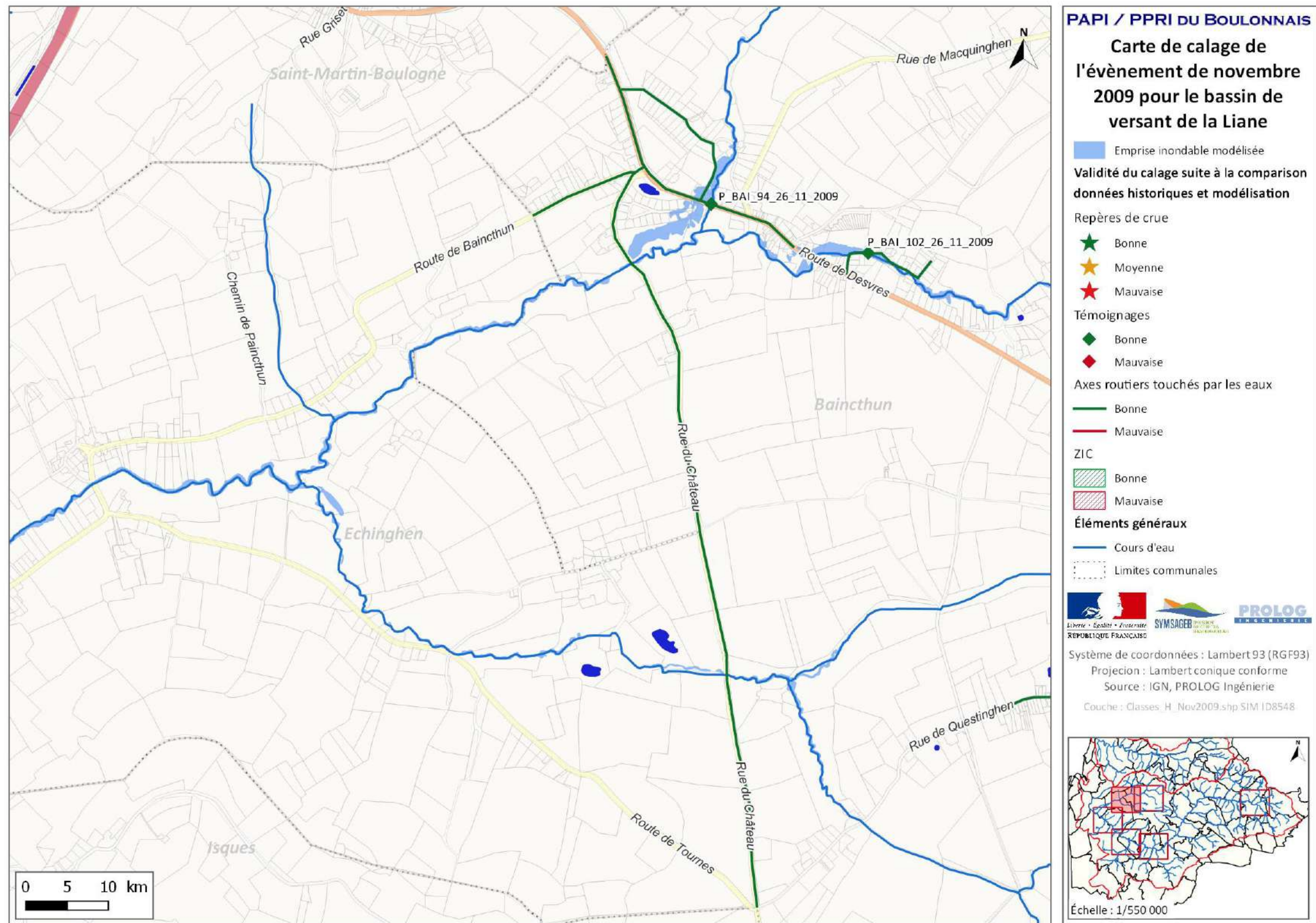


Figure 33 : Emprise inondable maximale au sein de la commune de Baincthun pour la crue de novembre 2009

Aussi, le modèle construit est donc calé de manière satisfaisante que ce soit dans sa capacité à reproduire les hydrogrammes et débits de pointes mesurés historiquement ou dans son fonctionnement hydraulique qui s'ajuste bien aux témoignages historiques.

3.1.4 Conclusion sur le calage

Le modèle hydrologique et hydraulique du bassin versant de la Liane est calé en toute rigueur sur deux événements historiques majeurs (novembre 2009 et novembre 2012), ainsi que sur un épisode de hautes eaux en date de janvier 2016.