

Table des matières

Préambule.....	4
Partie - 1 Volet hydrologique.....	6
1.1 Caractérisation du régime des pluies et des crues.....	7
1.1.1 Présentation des données utilisées.....	7
1.1.2 Analyse des principaux événements et principaux enseignements.....	11
1.1.3 Sélection des événements de référence.....	12
1.2 Approche pluie-débit pour la plaine des Wateringues.....	13
1.2.1 Choix de la fonction de production.....	13
1.2.2 Choix de la fonction de transfert.....	15
1.2.3 Mise en œuvre opérationnelle de l'approche pluie-débit.....	17
1.3 Transformation pluie-ruissellement pour les coteaux.....	18
1.4 Calage hydrologique.....	21
Partie - 2 Modélisation des écoulements.....	22
2.1 Modélisation de la plaine des Wateringues.....	23
2.1.1 Modélisation des canaux principaux.....	23
2.1.2 Modélisation du réseau secondaire et des stations de pompage des sections.....	25
2.1.3 Modélisation des ouvrages d'évacuation à la mer.....	25
2.1.4 Conditions aux limites.....	25
2.2 Modélisation des phénomènes de ruissellement.....	27
2.2.1 Modèle bi-dimensionnel (2D).....	27
2.2.2 Aménagements hydrauliques contre le ruissellement.....	29
2.2.3 Réseaux d'assainissement pluvial communaux.....	30
2.2.4 Conditions aux limites.....	30
2.3 Prise en compte du phénomène de remontée de nappe.....	30
2.4 Calage du modèle hydraulique.....	30
2.5 Tests de sensibilité.....	32
Partie - 3 Exploitations des résultats et rendus cartographiques.....	33
3.1 Définition des aléas.....	34
3.1.1 Aléa classique et aléa fonctionnel.....	34
3.1.2 Caractérisation des zones de production.....	38
3.2 Méthodologie d'élaboration des cartes.....	41
3.2.1 Création des contours de hauteurs et de vitesses.....	41
3.2.2 Filtrage des résultats de l'aléa ruissellement.....	43
3.2.3 Continuité entre carte d'aléa débordement de cours d'eau et carte d'aléa ruissellement.....	44
3.3 Format des rendus et exemples.....	45
Annexes.....	46

Index des illustrations

Figure 1 : Liste des stations pluviométriques utilisées.....	8
Figure 2 Localisation des stations pluviométriques dans et à proximité du territoire d'étude des pieds de coteaux.....	9
Figure 3 Représentation schématique de l'hydrogramme unitaire.....	15
Figure 4 Fonctionnement global de la transformation pluie-ruissellement.....	19
Figure 5 Modélisation hydraulique du bassin versant des pieds de coteaux.....	24
Figure 6 Possibilités de déplacement des personnes en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement (Source : DDT Vaucluse).....	35
Figure 7 Grille d'aléa proposée pour les phénomènes de débordement de cours d'eau et de ruissellement.....	35
Figure 8 Exemple de grille d'aléa fonctionnel (Source : PPRI NO Lille).....	36
Figure 9 Exemple de carte intégrant les zones de production hiérarchisées (Source : PPRI NO Lille).....	40
Figure 10 Mise en évidence des polygones filtrés (contours noirs) à Wervicq-sud (Source : PPRI NO Lille).....	44

Index des tables

Tableau 1 - Statistiques des cumuls journaliers aux stations de Bourthes, Fauquembergues et Saint-Omer (source Annuaire 2012 DREAL Nord-Pas-de-Calais).....	10
Tableau 2 Étapes de construction du maillage de calcul 2D.....	28
Tableau 3 Illustration de la plus-value de l'aléa fonctionnel en termes de compréhension des phénomènes de ruissellement (Source : PPRI NO Lille).....	37
Tableau 4 Illustration de la plus-value de l'aléa fonctionnel en termes de compréhension des phénomènes de débordement de cours d'eau (Source : PPRI de l'Ecaillon).....	37
Tableau 5 Procédure d'interpolation des vitesses d'écoulement (exemple tiré du PPRI de la Selle)	42

Préambule

L'objectif du présent livrable est de définir la méthodologie de caractérisation de l'aléa de référence qui sera mise en place lors de la phase 2 de la procédure PPRI.

Cette méthodologie se décline en trois volets :

- un volet **hydrologique** qui permettra de définir les régimes des pluies et des crues. Deux événements de référence, a minima centennaux, seront retenus (une crue de référence pour les débordements des canaux et de ses affluents et une pluie de référence pour la problématique ruissellement) en vue de la modélisation hydraulique ;
- un volet **hydraulique** qui consistera à modéliser les écoulements et les phénomènes de propagation des eaux dans les canaux et au niveau des sous-bassins versants ruissellement sur les coteaux afin d'estimer en tout point les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement, et ainsi par croisement de ces deux paramètres, l'aléa ;
- un volet **cartographique** qui exploitera les résultats des modélisations sous formes de cartographies synthétiques et opérationnelles, mettant l'accent sur l'intensité de l'inondation mais également sur les phénomènes observés (accumulation , écoulement, production). Les cartographies de l'aléa de référence débordement et de l'aléa de référence ruissellement seront superposées afin d'établir pour chaque commune du bassin versant une carte unique synthétisant l'ensemble des risques encourus.

Le présent document se décompose ainsi en trois parties :

- la première partie est consacrée à la description du volet hydrologique en distinguant l'analyse du régime hydrologique du bassin versant des pieds de coteaux, les modèles hydrologiques envisagées et la méthode de définition des événements de référence ;
- le second chapitre décrit les différentes méthodes de modélisation des écoulements, que ce soit suite à un débordement de cours d'eau, à des phénomènes de ruissellement ou à de la remontée de nappe ; les données d'entrées, les hypothèses méthodologiques et les principes de construction des modèles hydrauliques sont notamment présentés ainsi que l'étape de validation de ces modèles ;
- enfin, le dernier chapitre est consacré à l'exploitation et aux méthodes de restitution cartographique des résultats des modélisations. Est notamment définie la grille d'aléa qui permet de passer des résultats bruts du modèle à la cartographie de l'aléa de référence.

Partie - 1

Volet hydrologique

L'objectif principal de l'analyse hydrologique est d'étudier le régime hydrométrique et pluviométrique du bassin versant des pieds de coteaux afin d'identifier les deux événements de référence qui seront retenus pour caractériser l'aléa de référence par débordement de cours d'eau et l'aléa de référence par ruissellement, puis d'en calculer les apports, qui seront ensuite appliqués au modèle hydraulique.

Ces événements de référence devront être a minima centennaux. **Un événement de période de retour centennale est un événement qui a une chance sur 100 de se produire chaque année.** Il s'agit d'un événement qui se déroule en moyenne tous les 100 ans : en moyenne seulement, car la probabilité réelle d'observer un événement centennal sur une période de 100 ans est de 2/3. Il s'agit donc d'une crue ou d'une pluie d'une telle ampleur qu'elles sont très rarement voire jamais observées à l'échelle d'une vie humaine. Deux cas de figure peuvent dès lors se produire :

- l'analyse historique conduite en phase 1 a permis de retrouver la trace d'un épisode pluvieux bien documenté(e) dont la période de retour estimée est centennale ou supérieure : dans ce cas-là, cette pluie pourra être retenue comme événement de référence ;
- aucun épisode historique n'est compatible avec les critères d'un événement de référence et dans ce cas-là, une pluie de projet centennale sera construite sur la base des statistiques pluviométriques locales.

Les deux sous-chapitres qui suivent s'attachent à décrire les méthodes qui seront mises en place pour analyser le régime des pluies et des crues du bassin versant, sous l'angle du débordement des canaux d'une part, et sous l'angle des phénomènes de ruissellement d'autre part.

1.1 Caractérisation du régime des pluies et des crues

1.1.1 Présentation des données utilisées

Les données nécessaires à l'analyse du comportement hydrologique du bassin versant des pieds de coteaux et à la détermination des événements de référence sont de trois ordres :

- des données pluviométriques, collectées auprès de la DREAL Nord-Pas-de-Calais, de Météo-France, de l'Institution Interdépartementale des Wateringues (IIW) et du maire de Hames-Bougres, sur les postes pluviométriques du bassin versant et aux alentours ;
- des données RADAR (ANTILOPE, PANTHERE et COMEPHORE), collectées auprès de Météo-France via la DREAL Nord-Pas-de-Calais, consistant en des lames d'eau d'événements pluvieux importants sur l'ensemble du territoire d'étude ;
- des données hydrométriques (stations de pompage de Calais et des Pierrettes) et limnimétriques (canaux) collectées auprès de VNF et de l'IIW.

1.1.1.1 Les stations pluviométriques terrestres

Les données ont été ou seront récupérées sur les postes pluviométriques suivants (voir figure 2 pour la localisation) :

Station	Maître d'ouvrage
Calais-Marck	Météo France
Licques	
Polincove	
Saint Omer	DREAL
Bourthes	
Fauquembergues	
Tournehem	
Moulle	
Guînes	IIW / DREAL

Figure 1 : Liste des stations pluviométriques utilisées

Les données suivantes ont déjà été collectées :

- Cumuls journaliers des stations DREAL de Bourthes (1966-2015), Fauquembergues (1961-2015), Saint-Omer (1970-2015), Moulle (1972-2005), Tournehem (1966-2004), et de Guînes (1964-2006) ;
- Cumuls journaliers du pluviomètre du maire de Hames-Boucres (2001-2015) ;
- Cumuls au pas de temps 1 minute des stations de Bourthes (2001-2015), Fauquembergues (2003-2015) et Saint-Omer (2002-2015) ;

Il reste à récupérer auprès de Météo-France, via la DREAL Nord-Pas-de-Calais, les données (cumuls journaliers et horaires si possible) des stations de Calais-Marck, Licques et Polincove, et auprès de l'IIW, celles (cumuls journaliers et horaires si possible) de la station de Guînes, gérée jusqu'en 2006 par la DREAL Nord-Pas-de-Calais.

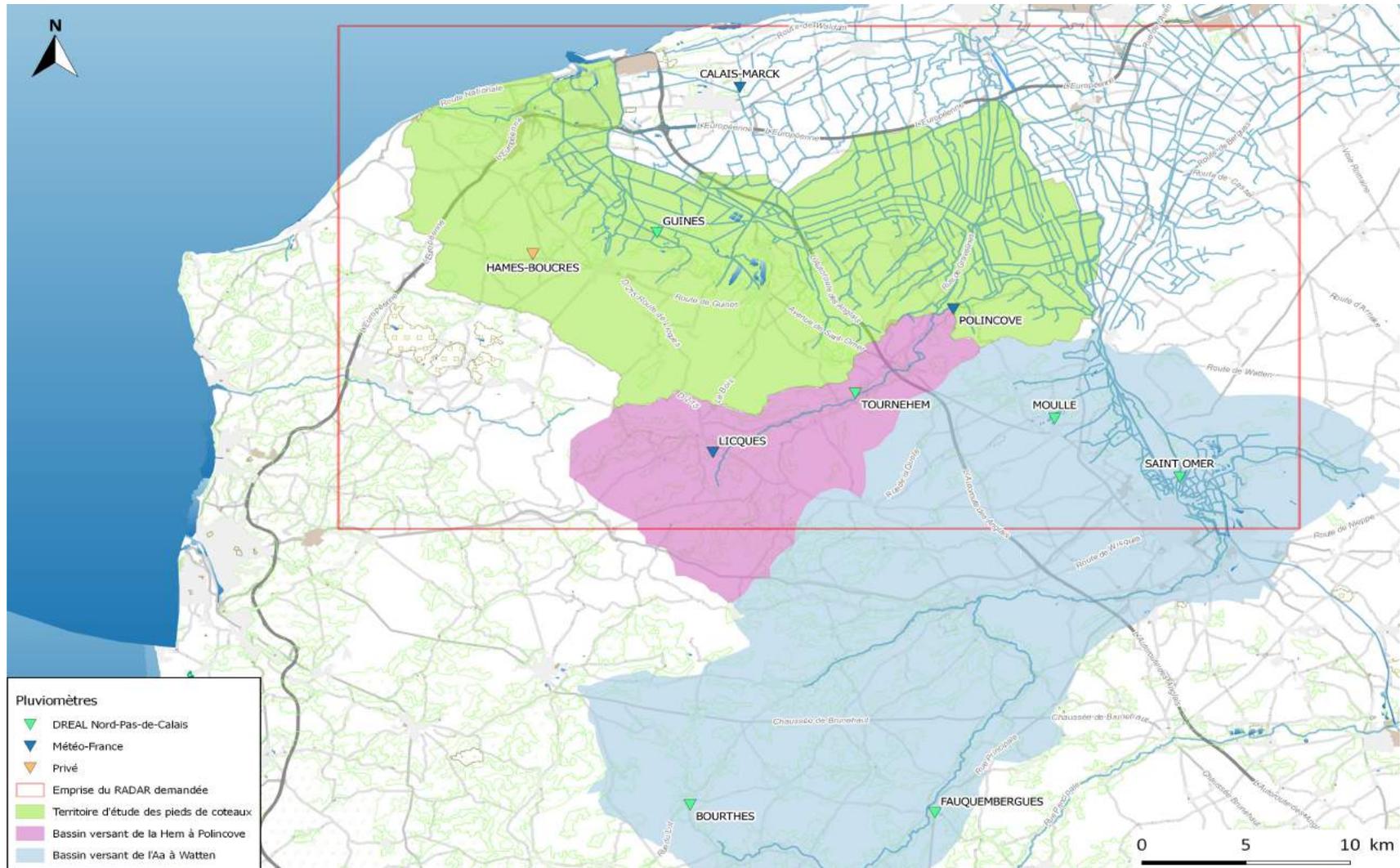


Figure 2 Localisation des stations pluviométriques dans et à proximité du territoire d'étude des pieds de coteaux

Les statistiques des précipitations des stations DREAL et Météo-France ont été demandées au pas de temps 6h, 12h, 1j, 2j, 4j et 8j. D'après l'annuaire de l'année 2012 de la DREAL Nord-Pas-de-Calais, les statistiques des cumuls journaliers pour les stations de Bourthes, Fauquembergues et Saint-Omer sont données dans le tableau ci-dessous.

T	Bourthes	Fauquembergues	St-Omer
2 ans	39.9	35.3	32.5
5 ans	49.5	43.4	42.8
10 ans	57	49.8	51.3
15 ans	61.8	53.7	56.9
20 ans	65.4	56.7	61.1
25 ans	68.3	59.1	64.6
50 ans	78	67.2	76.6
100 ans	89.1	76.3	90.8

Tableau 1 - Statistiques des cumuls journaliers aux stations de Bourthes, Fauquembergues et Saint-Omer (source Annuaire 2012 DREAL Nord-Pas-de-Calais)

1.1.1.2 Les données RADAR

Trois formats d'image radar (Météo-France) peuvent être mobilisés afin de reconstituer les profils temporel et spatial des pluies :

- les lames d'eau Comephore depuis 1997 qui sont issues d'une réanalyse des réflectivités radar brutes avec un fichier par pixel et par heure ;
- les lames d'eau Panthère depuis mai 2005 et basées uniquement sur les mesures radar brutes avec un fichier par pixel et par heure ;
- les lames d'eau Antilope depuis mai 2005 qui consistent en un recalage des données radar brutes à partir des stations pluviométriques terrestres.

Ces données seront récupérées auprès de Météo-France, via la DREAL Nord-Pas-de-Calais, sur les événements retenus pour le calage du modèle (voir chapitre 2.4).

1.1.1.3 Les données hydrométriques et limnimétriques

Il n'existe pas de stations hydrométriques sur le bassin versant hormis quelques jaugeages anciens effectués par la DREAL sur les rivières d'Andres (1975-1979), de Hames (1969-1979) et de Nielles (1961-1993).

Les stations hydrométriques pouvant être intéressantes pour le PPRI des pieds de coteaux sont celles de :

- Tournehem-Guémy et Recques-sur-Hem pour la Hem, dont l'influence sera à étudier ;
- Wizernes pour l'Aa, située à l'amont du Marais Audomarois, une partie du territoire d'étude étant connectée à l'Aa canalisée (aval du partiteur de Holque-Watten).

De plus, l'IIW nous a fourni des estimations de débits par calcul hydraulique aux niveaux des stations de pompage de Calais et des Pierrettes. Des mesures de niveaux sur les canaux VNF (canal de Calais aux Attaques, Canal de Guînes à Guînes et écluse d'Hennuin) ont aussi été récupérées auprès de VNF.

1.1.2 Analyse des principaux événements et principaux enseignements

Suite à l'analyse des données historiques d'inondation récoltées en phase 1, plusieurs événements majeurs ont été retenus et décrits dans le livrable L3 sous l'angle historique.

Les événements suivants seront analysés du point de vue du contexte pluviométrique (cumuls de l'événement, conditions antécédentes, ...) et du contexte hydrométrique / limnimétrique (débits pompés à la mer, niveaux dans les canaux, ...) sur la base des données décrites dans les chapitres précédents :

- novembre 1991 ;
- novembre 2000 ;
- août 2006 ;
- décembre 2006 ;
- juin 2007 ;
- septembre 2007 ;
- novembre 2009 ;
- novembre 2012.

Cette analyse permettra de définir les caractéristiques des pluies qui provoquent des débordements des canaux de la plaine des Wateringues et des phénomènes de ruissellement sur les coteaux.

1.1.3 Sélection des événements de référence

Selon la doctrine PPRI, l'événement de référence est l'événement à minima centennal. Le bassin versant des pieds de coteaux ne possède pas de cours d'eau à proprement dit avec une station hydrométrique de référence, permettant une analyse statistique des débits. Il conviendra donc de définir la pluie centennale à retenir à l'échelle du bassin versant des pieds de coteaux, sauf si une pluie historique, identifiée lors de la phase 1, ne répond aux critères de l'événement de référence et soit ainsi retenu comme pluie de référence.

Les paramètres clés pour la détermination de la pluie de projet de référence (hyétochrome) seront les suivants :

- **la forme du hyétochrome ;**
- **la durée totale ;**
- **la durée intense ;**
- **la répartition spatiale des pluies.**

Il convient en règle générale de construire des pluies de projet qui présentent des paramètres cohérents avec la forme usuelle des pluies les plus intenses et les plus préjudiciables à l'échelle du bassin versant considéré.

A ce stade de l'analyse, il nous paraît pertinent d'exploiter la forme de pluies réelles, comme par exemple celles d'août 2006 pour le ruissellement et de novembre 2009 et 2012 pour les débordements des canaux, connues pour avoir généré des crues majeures et de construire une pluie de projet centennale sur cette forme, plutôt qu'une pluie de projet théorique. En effet, les stations pluviométriques et les chroniques disponibles sont relativement fournies sur le territoire d'étude.

La connaissance de la forme des précipitations et de leur répartition dans le temps sera donc primordiale et devra se baser sur des chroniques pluviométriques à pas de temps suffisamment fin (horaire ou infra-horaire) pour caractériser précisément les épisodes pluvieux.

De plus, l'exploitation des données RADAR sera très intéressante puisqu'elle permettra de reconstituer de manière très fine la dynamique spatio-temporelle des pluies et notamment le déplacement de l'onde orageuse. Néanmoins, pour être exploitées, il sera nécessaire de contrôler ces données sur la base des pluviomètres terrestres (Météo-France et DREAL) afin de vérifier que la dynamique, les intensités maximales et les cumuls sont cohérents entre les deux sources de données.

Suite à l'analyse hydrologique, deux pluies de référence distinctes devraient être retenues pour caractériser l'aléa débordement des canaux dans les Wateringues et l'aléa ruissellement sur les coteaux et en pieds de coteaux. La première sera a priori de type hivernal, impliquant des volumes importants et un cumul des apports conséquents tandis que la seconde devrait répondre d'une dynamique estivale, orageuse, très intense et d'une durée relativement courte.

1.2 Approche pluie-débit pour la plaine des Wateringues

L'approche numérique retenue consistera à modéliser **la transformation de la pluie en débit sur la plaine des Wateringues**, 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 des stations situées sur ou à proximité du bassin versant et d'utiliser les caractéristiques topographiques et surfaciques locales pour générer les hydrogrammes.

Globalement, la modélisation hydrologique de type pluie-débit permet de passer d'un hyétogramme 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.

Dans le cas de la plaine des Wateringues, les sous-bassins versants seront les casiers hydrauliques présentés sur la figure 5 en partie 2. Les hydrogrammes seront injectés dans les canaux drainant les casiers hydrauliques.

1.2.1 Choix de la fonction de production

En raison des caractéristiques de la plaine des Wateringues (occupation des sols principalement sauf au niveau de l'agglomération de Calais 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 (respectivement forte, moyenne, faible et très faible) ;
- 3 hypothèses de conditions pluvieuses antécédentes :
 - I : conditions sèches ;
 - II : conditions normales ;
 - III : conditions très humides

A priori, en se basant sur le profil géologique de son sous-sol, **la plaine des Wateringues peut être globalement caractérisé par des sols de type A ou B (sols perméables)**. Le calage des crues historiques permettra de valider ou non 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 :

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

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 (sols A ou B) 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**, 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 et Cp le coefficient de production.

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

Les pertes initiales P_i sont considérées comme dépendant de la pente du sous-bassin versant. Ainsi, une analyse de ces dernières permettra d'associer une valeur de perte initiale à chaque sous-bassin (typiquement comprise entre 0,5 mm et 2 mm).

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

$$H_r = C_r \times (H_p - P_i)$$

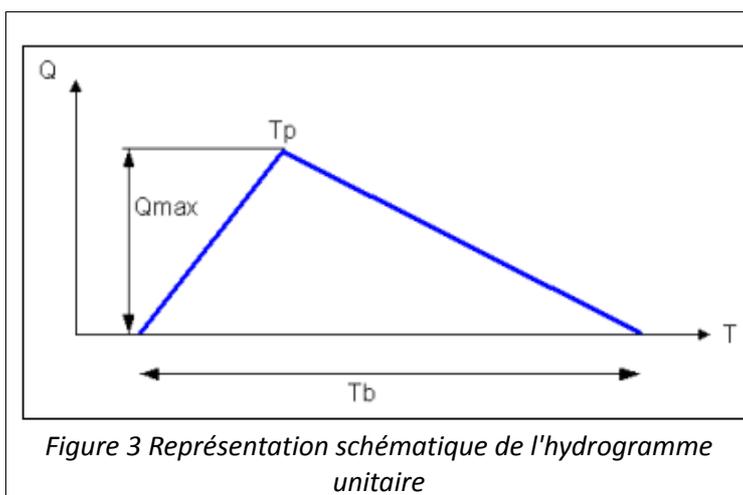
Ce modèle hydrologique est le plus classiquement utilisé en hydrologie urbaine et est adapté aux bassins versants fortement urbanisés de la partie aval du territoire d'étude.

L'imperméabilisation de chaque sous-bassin versant sera évaluée à partir de l'occupation des sols (un exemple de grille de correspondance est présenté en annexe 1). Les valeurs de ces coefficients seront ajustés sur la base du calage des épisodes de crues historiques.

1.2.2 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 de la plaine des Wateringues. Ce modèle se base sur trois paramètres :
 - le temps de montée au pic (**T_p**) ;
 - le temps de base de l'hydrogramme (**T_b**) ;
 - le débit de pointe de l'hydrogramme (**Q_{max}**).



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 (T_c) des sous-bassins versants est celle du SCS-RURAL, adaptée au caractère rural des sous-bassins, et qui définit T_c 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

Cette formulation donne des valeurs de temps de concentration plus importantes que les formulations classiques (Turazza, Giandotti, Passini, Ventura) couramment employées pour des bassins versants de type semi-ruraux.

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 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. 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):

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);

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

1.2.3.1 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. La phase 1 d'analyse historique a permis de mettre en évidence des événements passés (voir chapitres 1.4 et 2.4).

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

1.2.3.2 Détermination des sous-bassins d'apport

Les sous-bassins d'apport seront les casiers hydrauliques présentés sur la figure 5 en partie 2. Ils sont issus de l'étude Hydratec de 2010-2012. Ils pourront être redécoupés plus finement lors de la construction du modèle hydraulique (voir partie 2).

1.2.3.3 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, en un ou plusieurs points suivant la configuration des casiers, dans les canaux drainant les casiers hydrauliques.

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

1.3 Transformation pluie-ruissellement pour les coteaux

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.

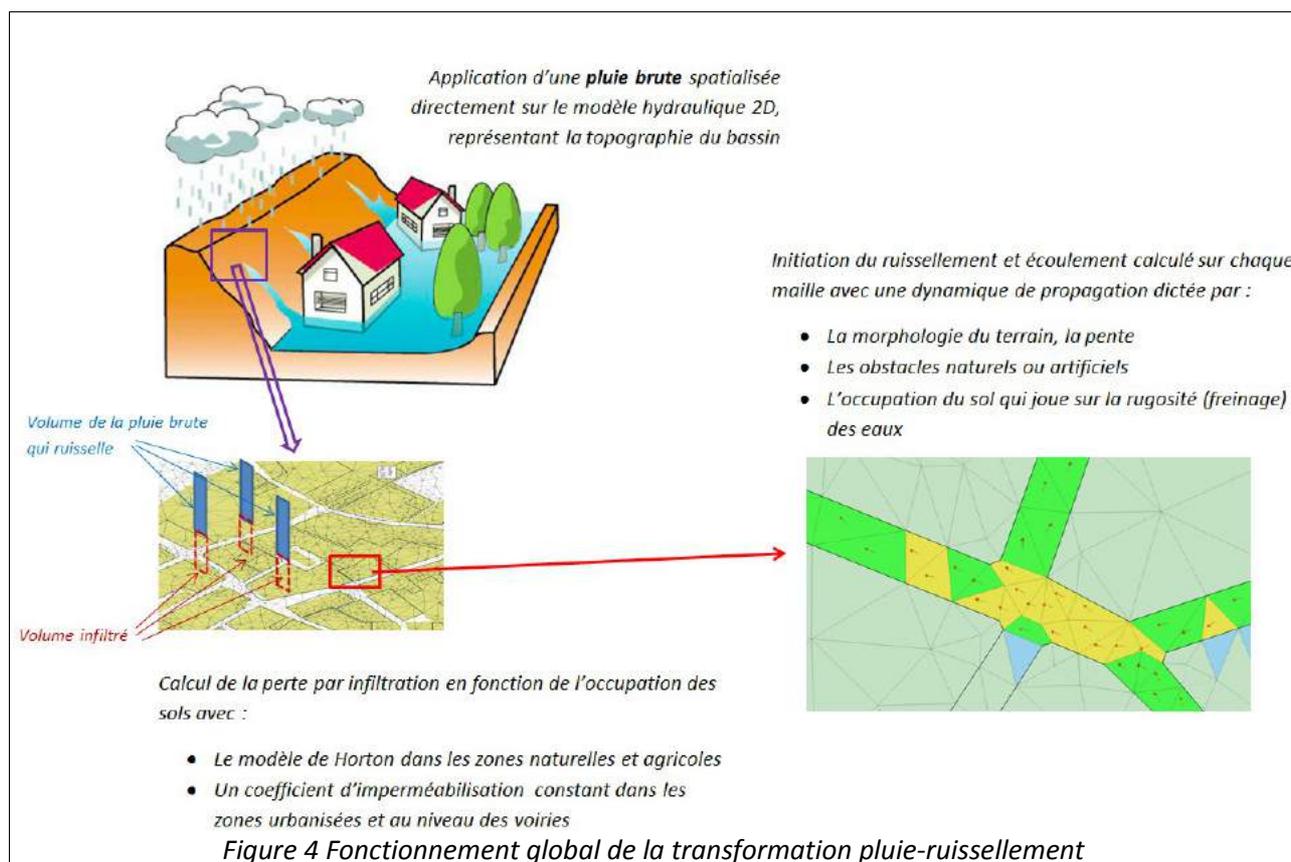
Ces phénomènes de ruissellement peuvent se produire en tout point d'un bassin versant et sont difficilement quantifiables, à l'opposée par exemple de la crue d'un cours d'eau, dont le débit peut être mesuré en un point précis du bassin-versant, à l'exutoire d'une zone de collecte.

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 comme cela sera le cas pour la détermination des apports hydrologiques de la plaine des Wateringues.

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



Le modèle de transformation pluie-ruissellement utilisé s'appuiera 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 phénomènes de ruissellement ;
- une fonction d'infiltration qui permet de définir sur chaque maille de calcul les pertes par infiltration (c'est à dire la part d'eau précipité perdue qui ne va donc pas ruisseler) en fonction de l'occupation des sols ;
- les conditions de saturation des sols au début de l'événement qui sont dictées par les conditions pluvieuses antécédentes.

Les différentes sources données pluviométriques disponibles sont décrites en détail au chapitre 1.1.1.

Dans la mesure où la modélisation proposée consiste à faire tomber la pluie directement sur la maillage numérique 2D, le calcul des pertes par infiltration (c'est à dire le passage de la pluie brute à la pluie nette) se fera directement au niveau de chaque maille, en fonction de l'occupation du sol majoritaire de la parcelle à laquelle appartient cette maille.

Le logiciel de modélisation utilisé permet de prendre en compte deux types de loi d'infiltration :

- **pour les secteurs urbanisés** : le modèle hydrologique utilisé est dit à coefficient de ruissellement constant égal à $C_p \times IMP$ où IMP est le taux d'imperméabilisation du bassin versant. Il s'agit du même modèle que celui présenté au chapitre 1.2.1).
- **pour les secteurs ruraux et naturels** : le logiciel utilisé permet d'appliquer un modèle de Horton, utilisé pour représenter le comportement d'un sol perméable. La capacité d'infiltration normale du sol f en mm/h est exprimée par la formule suivante :

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c).e^{-kt}$$

- f_0 : capacité d'infiltration maximum du sol en mm/h ;
- f_c : capacité d'infiltration du sol saturé en mm/h ;
- k : constante de temps positive en min^{-1}

Ce modèle fait l'hypothèse que la capacité d'infiltration décroît régulièrement pendant la pluie du fait de la saturation du sol.

Les coefficients d'ajustement du modèle de Horton sont basés sur le type de couverture des sols et les conditions pluvieuses antécédentes. Ces antécédents pluvieux seront déjà pris en compte au niveau de conditions initiales de saturation des sols (voir ci-après), seule l'occupation des sols sera donc considérée pour l'ajustement des paramètres.

Afin de tenir compte des conditions pluviométriques antécédentes aux différentes pluies modélisées, plusieurs hypothèses de saturation des sols pourront être prises comme conditions initiales sur le maillage 2D.

Ainsi :

- si les conditions antécédentes sont relativement sèches, une saturation initiale des sols de 25 % sera retenue ;
- si les conditions antécédentes sont normales, une saturation initiale des sols de 50 % sera retenue ;
- si les conditions antécédentes sont humides, une saturation initiale des sols de 75 % sera retenue.

1.4 Calage hydrologique

Le modèle hydrologique sera calé sur la base d'événements historiques identifiés en phase 1 (voir paragraphe 2.4). Comme dit précédemment, le bassin versant ne possède pas de station hydrométrique. Il conviendra de s'assurer que, pour une pluie historique connue (pluie hivernale principalement durant laquelle les volumes à évacuer sont importants), les débits évacués à la mer (stations de Calais et des Pierrettes) sont cohérents avec ceux estimés à ces stations. De plus, dans l'étude Hydratec « Étude hydraulique de caractérisation de l'aléa inondation par les eaux continentales dans le secteur des Wateringues », des estimations de débits ont été faites et des hydrogrammes ont été reconstitués à ces stations lors de l'épisode de novembre 2009. Ils serviront ainsi de points de comparaison sur cet épisode.

Partie - 2 Modélisation des écoulements

Le modèle hydraulique proposé se décompose en :

- **une modélisation 1D à casiers** de la plaine des Wateringues (en vert sur la figure de la page suivante) avec :
 - les canaux principaux modélisés en tronçons 1D à partir des profils en travers issus du modèle Hydratec, complétés du MNT ;
 - les casiers identifiés en phase 1 dans le livrable L4c « Analyse du fonctionnement hydraulique du bassin versant » comme faisant partie du périmètre d'étude ;
 - la prise en compte des ouvrages d'évacuation à la mer (stations de pompage de Calais, de la Batellerie et des Pierrettes, écluse 63bis à Gravelines) et les stations de pompage des sections des Wateringues rattachés aux casiers définis précédemment ;
- **une modélisation 2D ruissellement** sur les coteaux (en orange sur la figure de la page suivante), connectée en pieds de coteaux au modèle 1D à casiers aux niveaux des canaux principaux ou secondaires recueillant les eaux de ruissellement.

La figure de la page suivante présente le zonage proposé pour les deux approches.

Les chapitres qui suivent s'attachent à décrire la méthodologie globale de construction du modèle hydraulique.

2.1 Modélisation de la plaine des Wateringues

2.1.1 Modélisation des canaux principaux

Les canaux principaux, issus du réseau structurant des modèles Hydratec « Calais » et « Aa Grand Gabarit », seront **modélisés en 1D** à partir de profils en travers disponibles. Cela concerne :

- pour le modèle « Calais », le canal de Guînes, le canal d'Audruicq, le canal d'Ardres, le canal des Trois Cornets, le canal de Calais, le canal du Houlet, la rivière de Hames, la Rivière Neuve et le canal des Pierrettes, la Rivière 1777, le canal du Vinfil et le watergang du Vieux Vinfil, la rivière de Nielles , le watergang du Petit Drack, le watergang du Plein-Fossé et le watergang de l'Oudrecq ;
- pour le modèle « Aa Grand Gabarit », l'Aa canalisée à l'aval de Watten, le Tiret, la Liette, le Meulstroom et le canal du Mardyck.

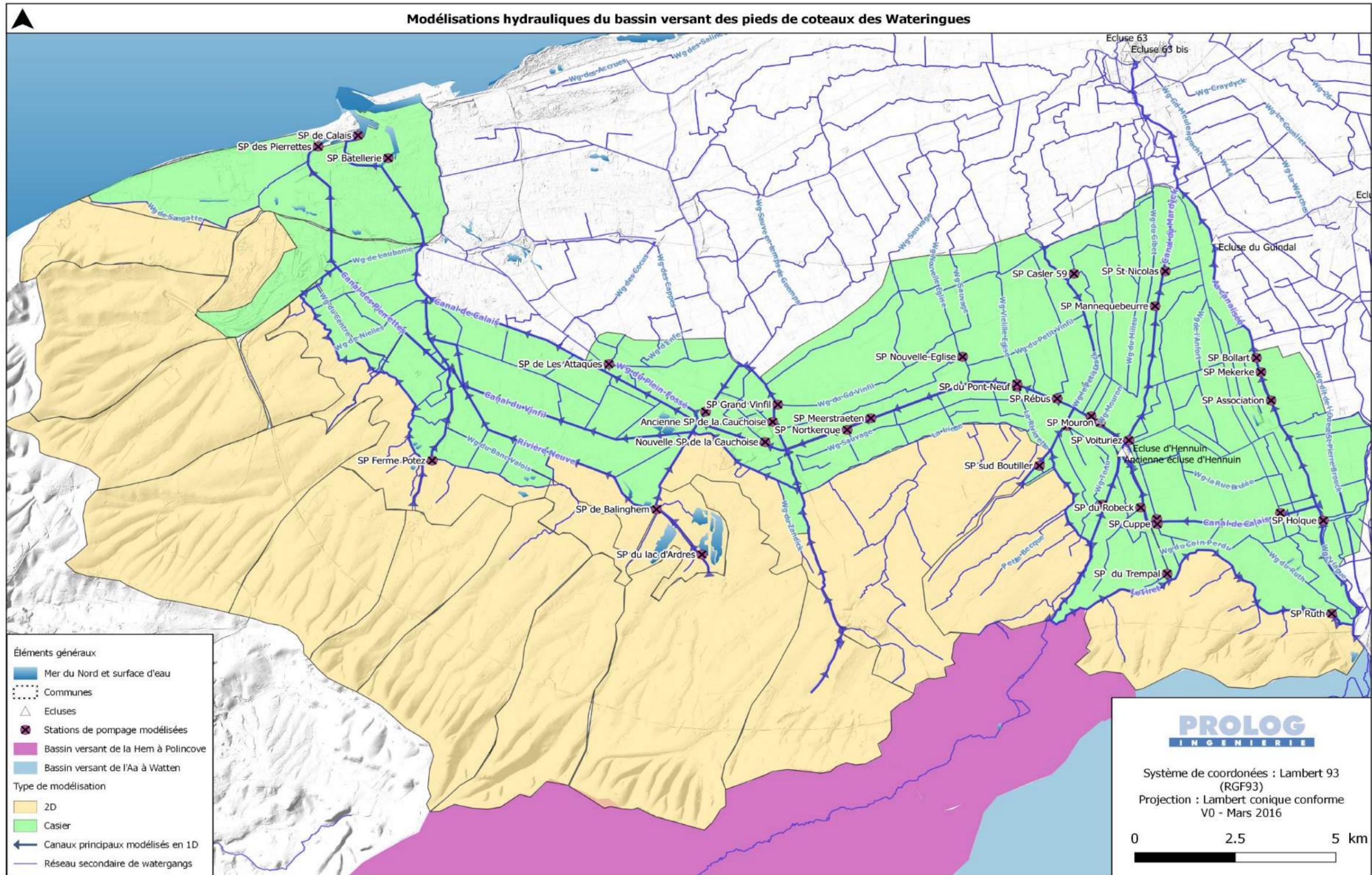


Figure 5 Modélisation hydraulique du bassin versant des pieds de coteaux

2.1.2 Modélisation du réseau secondaire et des stations de pompage des sections

Pour le réseau secondaire, les watergangs situés en pieds de coteaux et recueillant les eaux de ruissellement seront modélisés en 1D. Il s'agit des watergangs de Sangatte et du Zandick, de la Liette (ruissellement sur les communes de Nortkerque et Zutkerque) et de la rivière à Bouzats dans le Marais de Guînes (connectée à la station de pompage de la Ferm Potez).

D'autres watergangs seront modélisés, en particulier ceux amenant l'eau vers des stations de pompage. Ces choix de modélisation seront affinés lors de la construction du modèle hydraulique, en concertation avec la DDTM 62. Les watergangs finalement modélisés seront listés dans le livrable technique portant sur l'aléa de référence. Ils seront issus des modèles Hydratec « Calais » et « Aa Grand Gabarit ».

Le reste de la plaine sera modélisé sous forme de casiers hydrauliques, représentant la capacité de stockage de la plaine via des lois hauteur/surface tirées du MNT.

Les stations de pompage des sections de Wateringues seront modélisées suivant les régulations et les débits définis dans le modèle Hydratec utilisé dans le cadre du PAPI du Delta de l'Aa.

2.1.3 Modélisation des ouvrages d'évacuation à la mer

Les stations de pompage de Calais, de la Batellerie et des Pierrettes pour le secteur du Calaisis et l'écluse 63bis à Gravelines pour l'Aa canalisée seront modélisées suivant les régulations définis dans le modèle Hydratec utilisé dans le cadre du PAPI du Delta de l'Aa.

2.1.4 Conditions aux limites

Comme énoncé dans le paragraphe 1.2.3.3, les hydrogrammes calculés par la modélisation pluie-débit, seront injectés, en un ou plusieurs points suivant la configuration des casiers, dans les canaux drainant les casiers hydrauliques.

De plus, **pour le secteur de l'Aa, deux injections de débit** seront faites :

- à Polincove pour la Hem (bassin versant en rose sur la figure précédente), à l'amont de la diffluence de la Hem entre le Meulstroom et le Tiret ; les débits injectés seront issus soit du modèle de la Hem construit dans le cadre du PAPI du Delta de l'Aa (calage et aléa de référence) soit des stations hydrométriques de Recques-sur-Hem ou Tournehem-Guémy si les événements retenus pour le calage ne sont pas les mêmes que ceux retenus pour le PAPI ;

- à Watten pour l'Aa (bassin versant en bleu sur la figure précédente), à l'amont du partiteur d'Holque-Watten ; les débits injectés seront issus soit du modèle « Aa Saint-Omer » (prenant en compte l'écrêtement de l'Aa dans le Marais Audomarois) utilisé dans le cadre du PAPI du Delta de l'Aa (calage et aléa de référence) soit du modèle qui sera construit pour le PPRI Audomarois, si le planning le permet; si les événements retenus pour le calage ne sont pas les mêmes, la station hydrométrique de Wizernes sur l'Aa (amont du Marais Audomarois) sera exploitée avec une estimation de l'écrêtement dans le Marais Audomarois à partir des épisodes déjà modélisés (mars 2002, décembre 2006, novembre 2009) .

Remarque : Ce dernier cas se produirait a priori pour l'événement de novembre 2012, non retenu par le PAPI et le PPRI Audomarois, et qui pourrait être étudié dans le PPRI des pieds de coteaux. Cet événement est assez proche de celui de novembre 2009 (38 m³/s en 2009 contre 37 m³/s en 2012).

A l'aval, la condition limite sera un marégramme à Calais, pour le canal de Calais et le canal des Pierrettes, **et à Gravelines** pour l'Aa canalisée.

De plus, **le débit dévié vers Dunkerque, au niveau du partiteur d'Holque-Watten, sera un hydrogramme sortant** issu soit du modèle « Aa Grand Gabarit » utilisé dans le cadre du PAPI du Delta de l'Aa (calage et aléa de référence) soit du modèle qui sera construit pour le PPRI Audomarois, si le planning le permet. Si les événements retenus pour le calage ne sont pas les mêmes, le débit dérivé sera issu des régulations définies dans le modèle « Aa Grand Gabarit » et par analogie avec la crue de novembre 2009.

2.2 Modélisation des phénomènes de ruissellement

2.2.1 Modèle bi-dimensionnel (2D)

Le modèle hydraulique qui sera mis en place pour simuler les phénomènes de ruissellement sur l'ensemble des coteaux est un modèle bi-dimensionnel (2D) représenté par un maillage de calcul. Par définition, l'approche pluie-ruissellement est axée sur **les processus d'écoulement des eaux** au sein du maillage de calcul bi-dimensionnel (représentant la topographie du bassin versant)¹.

Le calcul mathématique se fera suivant les équations de Saint-Venant, basées sur l'hypothèse d'un écoulement principalement horizontal. La variation verticale de la vitesse est ainsi négligée, ce qui est une hypothèse acceptable vu les phénomènes étudiés.

La turbulence n'est pas modélisée mais son effet est pris en compte dans les pertes de charge dues aux frottements (coefficient de Strickler). L'utilisation d'un maillage 2D et d'un schéma numérique de type volumes finis permet la modélisation d'écoulements rapidement variés, ce qui est le cas lors d'inondations en milieu urbanisée où les écoulements sont perturbés par de nombreux obstacles.

Remarque : Les parties terminales des axes de ruissellement, en pieds de coteaux, peuvent être sur certains secteurs en bas de coteaux des becques ou cours d'eau. Les plus importantes seront représentés par une succession de profils en travers et où le calcul s'effectue selon un schéma dit 1D, faisant l'hypothèse que les écoulements dans ces ouvrages sont perpendiculaires aux sections.

Le tableau page suivante présente les différentes étapes proposées pour la construction du maillage de calcul bi-dimensionnel.

1 A la différence de l'approche pluie-débit axée sur la propagation des eaux dans le lit mineur des cours d'eau

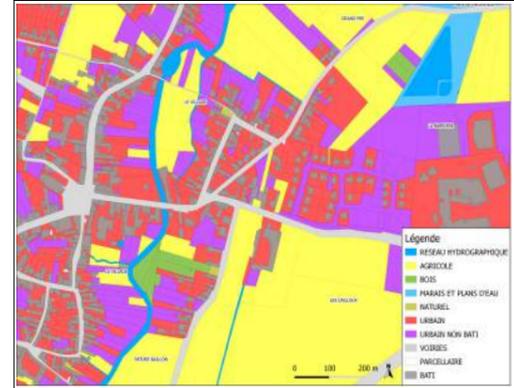
Étape	Objectifs	Détail et commentaires	Illustrations (tirées du PPRI de l'Ecaillon)
1	Prise en compte de l'effet de freinage/accélération des différentes couvertures de sol	Il s'agit ici de sectoriser le périmètre d'étude en différentes zones d'écoulement dont les coefficients de rugosité seront adaptés 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.	
2	Prendre en compte l'effet de blocage des bâtiments dans les zones urbanisées Affiner le maillage de calcul dans les zones à enjeux	Utilisation des limites de parcelles bâties (le premier blocage se produit souvent en zone urbaine en bordure de parcelles soit par le bâtiment lui-même, soit par une haie ou un mur d'enceinte) comme éléments de forçage du maillage et comme murs poreux (représentation de l'effet de blocage sans toutefois le surestimer en permettant à un faible pourcentage du débit de s'infiltrer à l'intérieur de la parcelle)	
3	Prise en compte de l'effet de blocage des bâtiments de grande taille (> 1000 m²)	Intégration des limites de ces grands bâtiments (et non des limites de parcelles) comme murs poreux pour bien représenter leurs impacts hydrauliques. Pour ces bâtiments à surfaces étendues (centres commerciaux, usines, hôpitaux), l'hypothèse que le premier blocage a lieu en bordure de parcelle n'est plus valable	
4	Adapter le maillage aux variations topographiques du terrain naturel et identifier les surverses	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. 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.	
5	Prise en compte des ouvrages de décharge sous remblai	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	

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 des pieds de coteaux des Wateringues, deux MNT seront utilisés, comme décrit dans le livrable L4a de la phase 1 :

- un levé LIDAR (aérien) avec un pas d'espace (taille de cellule carrée) de 1 m sur la plaine des Wateringues et le bas des coteaux ;
- un levé LIDAR (aérien) avec un pas d'espace (taille de cellule carrée) de 0.5 m sur les coteaux, nommé MNT Coteaux dans la suite du livrable.

Les conclusions de ce livrable sur la fiabilité des MNT étaient les suivantes :

- une bonne fiabilité des deux MNT par intercomparaison sur leur zone de recouvrement ;
- un bon filtrage de la végétation et des parcelles cultivées ;
- des « trous » dans le MNT Wateringues au niveau des bâtiments et des plans d'eau, comblés par interpolation avec les points avoisinants.

La fiabilité des MNT pourra être complétée dans cette phase , en comparant les cotes du MNT aux cotes des levés géométriques terrestres (des profils en travers complémentaires légèrement étendus ont été demandés en phase 1) ou à des éléments intangibles comme les cotes tampons des regards des réseaux d'assainissement communaux (Cap Calais par exemple) si elles nous sont fournies au format SIG. Cette comparaison permettra d'estimer l'erreur altimétrique médiane du MNT et d'apporter d'éventuelles corrections.

2.2.2 Aménagements hydrauliques contre le ruissellement

Comme décrit dans le livrable L4b de la phase 1, on note la présence de nombreux bassins de rétention appartenant à différentes organismes (Eurotunnel, SNCF, EPCI, ...). Ces bassins devront être caractérisés (période de retour de dimensionnement, retour d'expérience lors de fortes pluies) afin d'estimer l'opportunité de les inclure ou non dans le modèle hydraulique.

Les aménagements de lutte contre le ruissellement mis en place par les EPCI (CCSOC et Trois Pays) seront modélisés sous forme de murs poreux s'ils existent sous format SIG.

2.2.3 Réseaux d'assainissement pluvial communaux

Les réseaux d'assainissement pluvial, les plus importants et se rejetant dans les canaux VNF, seront modélisés s'ils existent sous format SIG et si les dimensions et les fils d'eau des conduites ainsi que les cotes tampons des regards sont disponibles. Ils concernent les communes de :

- Guînes pour le canal de Guînes ;
- Ardres et Brêmes pour le canal d'Ardres ;
- Audruicq pour le canal d'Audruicq ;
- l'agglomération de Cap Calais.

2.2.4 Conditions aux limites

Comme énoncé dans le paragraphe 1.3, l'objectif de l'approche pluie-ruissellement est d'utiliser le profil des précipitations pour simuler les écoulements dans le modèle. Les pluies réelles ou théoriques seront donc appliquées directement sur la maillage de calcul 2D.

A l'aval, le modèle 2D ruissellement sera connectée en pieds de coteaux au modèle 1D à casiers aux niveaux des canaux principaux ou secondaires recueillant les eaux de ruissellement.

2.3 Prise en compte du phénomène de remontée de nappe

Le livrable L4c « Analyse du fonctionnement hydraulique du bassin versant » a identifié des zones de sensibilité à la remontée de nappe. Cette sensibilité sera prise en compte, sur toutes ces zones, comme phénomène aggravant dans la modélisation pluie-débit, avec une condition initiale de saturation des sols élevée, comprise entre 75 % et 100 %. Cette valeur sera précisée lors du calage du modèle.

2.4 Calage du modèle hydraulique

Une fois que le modèle hydraulique sera construit, il sera nécessaire de procéder à sa validation en analysant sa réponse à des événements pluvieux réels ayant touché le bassin versant et en la confrontant aux données historiques (repères de crues) et quantitatives.

On distingue deux types de témoignages historiques :

- les témoignages ponctuels ou surfaciques (voirie ou lotissement 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 une fiabilité plus ou moins représentative) que l'on appelle « repères de crue ».

Ce calage se basera 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 canaux serviront aussi de points de comparaison.

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

Compte tenu de la re-modélisation de la plaine des Wateringues pour le PPRI des pieds de coteaux, il est à noter que le calage du modèle ne se fera pas sur les résultats des modélisations hydrauliques réalisées dans le cadre du PAPI du Delta de l'Aa.

Au vue des données historiques récoltées et des données pluviométriques, hydrométriques et limnimétriques disponibles, nous proposons de retenir les événements suivants :

- août 2006 (estival) ;
- décembre 2006 (hivernal) ;
- juin 2007 (estival) ;
- septembre 2007 (hivernal) ;
- novembre 2009 (hivernal) ;
- novembre 2012 (hivernal).

Remarque : Certains événements pourront être rajoutés ou retirés suite à l'analyse hydrologique.

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

2.5 Tests de sensibilité

Des tests de sensibilité du modèle seront réalisés sur l'aléa de référence et sur les paramètres suivants :

- sur l'influence d'une crue de la Hem (cas d'une crue faible et d'une crue forte sur la Hem) ;
- sur le dysfonctionnement des stations de pompage identifiées comme prioritaires lors du PAPI du Delta de l'Aa, à savoir celles de Balinghem et du Lac d'Ardes ;
- sur le niveau marin ;
- sur les aménagements d'hydraulique douce de lutte contre le ruissellement (haies, fascines, ...) s'ils ont pu être récupérés au format SIG.

Suite aux conclusions de ces tests de sensibilité, il sera décidé les hypothèses retenues pour l'aléa de référence.

Cependant, concernant le niveau marin, l'étude Hydratec « Étude hydraulique de caractérisation de l'aléa inondation par les eaux continentales dans le secteur des Wateringues » a fait, pour l'aléa de référence, une analyse de probabilité très complète sur la marée prédite, la surcote et le vent. Il a ainsi été retenu une marée prédite moyenne avec une surcote moyenne. Pour être cohérent avec le PAPI du Delta de l'Aa, il nous semble préférable de partir sur les mêmes hypothèses pour la définition de l'aléa de référence du PPRI des pieds de coteaux.

Partie - 3 Exploitations des résultats et rendus cartographiques

3.1 Définition des aléas

3.1.1 Aléa classique et aléa fonctionnel

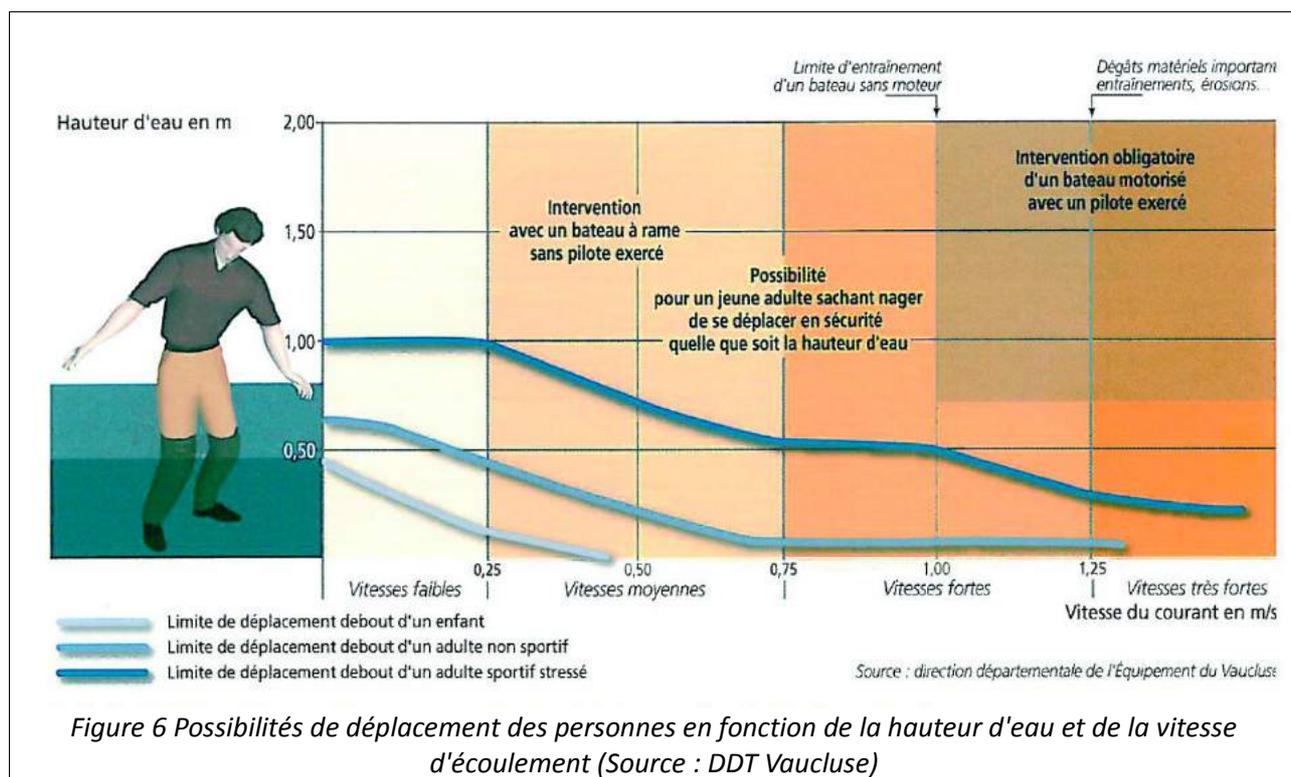
La modélisation des événements de référence, débordement de cours d'eau et ruissellement, permettra d'accéder aux hauteurs de submersion maximales et aux vitesses maximales d'écoulement, sauf sur les casiers pour les vitesses. Dans ce cas, il sera choisi la classe la plus faible des vitesses d'écoulement, à savoir inférieures à 0,2 m/s, les vitesses étant faibles dans les casiers de la plaine.

Des cartes informatives sur la durée de submersion seront produites.

L'aléa de référence reposera donc sur un croisement entre :

- **les hauteurs de submersion**, divisées en 5 classes :
 - inférieures à 20 cm, hauteurs d'eau très faibles ;
 - comprises entre 20 cm et 50 cm, hauteurs d'eau faibles ;
 - comprises entre 50 cm et 1 m, hauteurs d'eau moyennes ;
 - comprises entre 1 m et 1,5 m, fortes hauteurs d'eau,
 - supérieures à 1,5 m, très fortes hauteurs d'eau.
- **les vitesses d'écoulements**, divisées en 4 classes :
 - inférieures à 0,2 m/s, faibles vitesses d'écoulement ;
 - comprises entre 0,2 et 0,5 m/s, vitesses d'écoulement moyennes ;
 - comprises entre 0,5 et 1m/s, fortes vitesses d'écoulement ;
 - supérieures à 1 m/s, très fortes vitesses d'écoulement.

C'est bien le croisement entre ces deux paramètres qui conditionnera le risque sur une zone donnée. En effet, le même niveau d'aléa pourra être induit par de fortes hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulements faibles et par de faibles hauteurs d'eau mais des vitesses d'écoulements élevées. La figure ci-dessous illustre l'impact du couplage de ces deux paramètres sur les possibilités de déplacement des personnes en fonction de leur âge.



La grille d'aléa proposée à la fois pour l'aléa débordement de cours d'eau et pour l'aléa ruissellement est présentée ci-dessous.

Hauteur de submersion	Supérieure à 1.5 m	Très Fort	Très Fort	Très Fort	Très Fort
	Comprise entre 1 m et 1.5 m	Fort	Fort	Très Fort	Très Fort
	Comprise entre 50 cm et 1 m	Moyen	Moyen	Fort	Très Fort
	Comprise entre 20 cm et 50 cm	Faible	Moyen	Fort	Très Fort
	Inférieure à 20 cm	Faible	Faible	Fort	Très Fort
	Vitesse d'écoulement	Inférieure à 0.2 m/s	Comprise entre 0.2 m/s et 0.5 m/s	Comprise entre 0.5 m/s et 1 m/s	Supérieure à 1 m/s

Figure 7 Grille d'aléa proposée pour les phénomènes de débordement de cours d'eau et de ruissellement

Cette grille d'aléa permettra de caractériser le risque débordement de cours d'eau et ruissellement en tout point du territoire et de le cartographier. C'est le croisement de ces cartes d'aléas et des cartes d'enjeux PPR (définies dans le livrable L2 de la phase 1) qui permettra de construire la cartographie du zonage réglementaire.

Néanmoins, il nous paraîtrait intéressant d'introduire une seconde grille d'aléa (en conservant les mêmes classes de hauteurs et de vitesses) qui ne qualifierait plus le risque en termes de gravité (faible, moyen ou fort) mais plutôt en termes de fonctionnement et qui zonerait le territoire en fonction des phénomènes prépondérants entre l'écoulement, l'accumulation voire les deux en même temps.

Cet aléa dit fonctionnel, inspiré par la problématique ruissellement, pourra aussi être appliqué à la thématique débordement de cours d'eau. En effet, notre retour d'expérience sur les procédures PPRI montre que les élus ou la population ont souvent tendance à penser qu'aléa fort signifie de fortes hauteurs de submersion. Or le facteur déterminant peut être la vitesse et dans ce cas là une carte d'aléa fonctionnelle mettant en évidence une zone d'écoulement aiderait à la compréhension globale et à la lecture des cartes d'aléa dites classiques.

L'illustration ci-dessous présente un exemple de grille de définition de l'aléa fonctionnel (qui est construit à partir des mêmes classes de hauteurs et de vitesses que l'aléa classique). Cette grille pourra être ajustée en cours de phase 2 en fonction des résultats de modélisation.

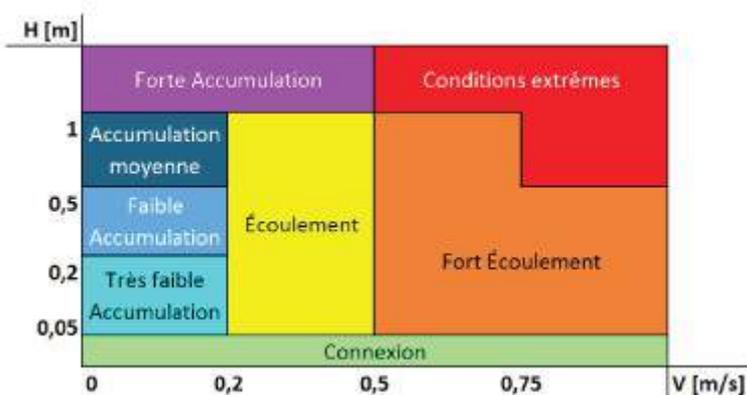


Figure 8 Exemple de grille d'aléa fonctionnel (Source : PPRI NO Lille)

Remarque : Dans les secteurs à casiers hydrauliques, comme pour la grille d'aléa classique, la vitesse sera considérée, négligeable et classée dans l'intervalle inférieur à 0,2 m/s. Seul un phénomène d'accumulation sera ainsi défini avec une intensité dépendante de la hauteur d'eau (de très faible à forte accumulation d'après la figure ci-dessous).

Les exemples pages suivantes illustrent la plus-value de l'introduction d'un aléa fonctionnel aussi bien en termes de ruissellement que de débordement de cours d'eau.

Tableau 3 Illustration de la plus-value de l'aléa fonctionnel en termes de compréhension des phénomènes de ruissellement (Source : PPRI NO Lille)

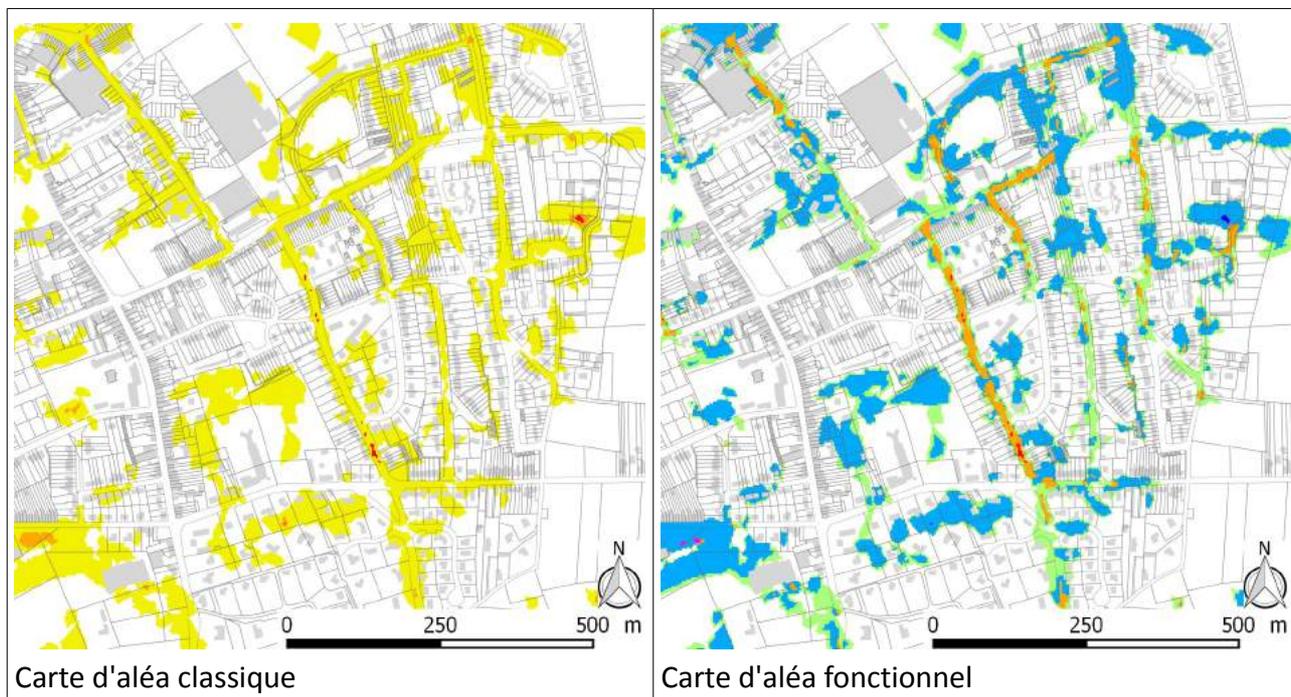
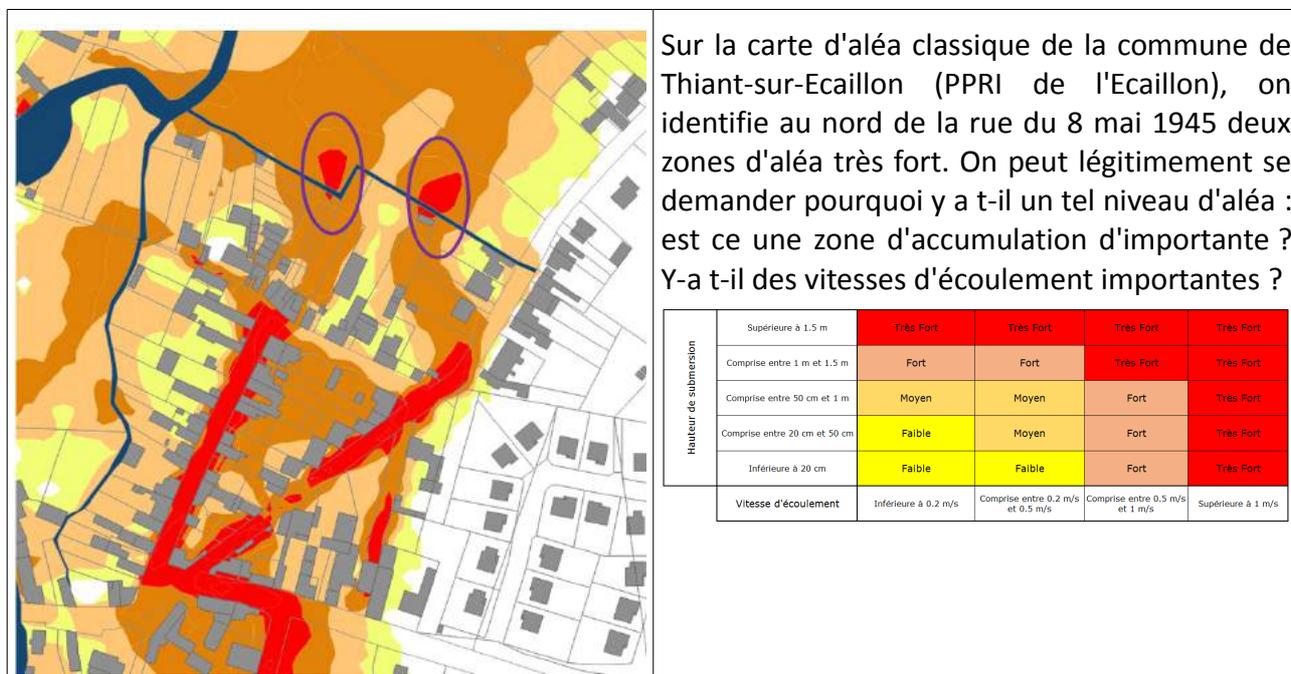
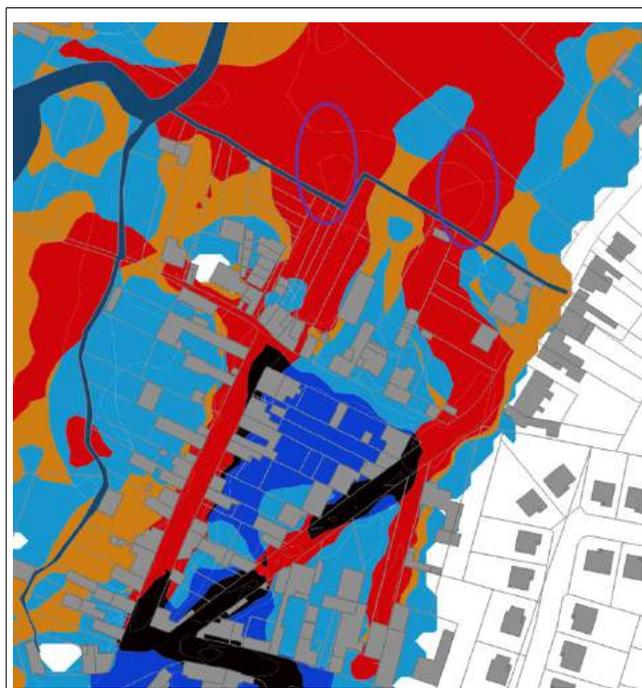


Tableau 4 Illustration de la plus-value de l'aléa fonctionnel en termes de compréhension des phénomènes de débordement de cours d'eau (Source : PPRI de l'Ecaillon)





La mise en œuvre d'une carte d'aléa fonctionnel en parallèle de la carte d'aléa classique permet d'identifier instantanément qu'il s'agit d'une zone de fort écoulement et que c'est donc le paramètre vitesse qui induit un niveau d'aléa très fort.

Hauteur de submersion	Supérieure à 1.5 m	Forte accumulation		Conditions extrêmes	
	Comprise entre 1 m et 1.5 m	Forte accumulation		Conditions extrêmes	
	Comprise entre 50 cm et 1 m	Accumulation	Écoulement	Fort écoulement	
	Comprise entre 20 cm et 50 cm			Fort écoulement	
	Comprise entre 5 cm et 20 cm	Connexion			
Inférieure à 5 cm	Connexion				
Vitesse d'écoulement	Inférieure à 0.2 m/s	Comprise entre 0.2 m/s et 0.5 m/s	Comprise entre 0.5 m/s et 1 m/s	Supérieure à 1 m/s	

La grille d'aléa fonctionnel permettra donc d'individualiser de manière homogène à l'échelle du périmètre d'étude dans son entier :

- **les zones de connexion** qui sont les secteurs où les hauteurs d'eau sont comprises entre 1 et 5 cm. Il est important de préciser qu'il ne s'agit pas de zones à risques et qu'ainsi elle ne seront pas concernées par les prescriptions du futur règlement du PPRi mais elles aident néanmoins à la compréhension globale de la dynamique des écoulement sur la cartographie de l'aléa de référence (initiation du ruissellement sur les versants, connexion entre plusieurs zones d'accumulation, etc) ;
- **les zones d'accumulation** déclinées en zones de très faible à forte accumulation ;
- **les zones d'écoulement** modéré et de fort écoulement ;
- **une zone de conditions extrêmes** où à la fois les hauteurs de submersion et les vitesses d'écoulement sont très importantes.

3.1.2 Caractérisation des zones de production

La délimitation des zones de production est propre à la thématique ruissellement et constitue une étape supplémentaire qui viendra compléter la carte d'aléa fonctionnel sur les sous-bassins versants ruissellement des coteaux.

Par définition, l'ensemble du territoire du bassin versant qui n'est ni une zone d'accumulation, ni une zone d'écoulement, ni une zone de conditions extrêmes est une zone de production. Ces zones correspondent aux sous-bassins versants topographiques du territoire aux niveaux desquels le ruissellement va commencer à se former puis va se propager :

- soit vers des points bas ou cuvettes formant ainsi une accumulation d'eau ;
- soit en accélérant le long des talwegs naturels ou au sein des rues dans les secteurs urbanisés créant ainsi des axes d'écoulement à fortes vitesses.

Ainsi, si la zone de production n'est pas directement exposée au risque d'inondation, elle peut alimenter en aval des secteurs qui eux seront touchés par les inondations. C'est pourquoi la gestion de ces zones, notamment en termes d'urbanisation future, est très importante et ce d'autant plus qu'un des principaux objectifs du PPRI est de ne pas aggraver la vulnérabilité des biens déjà soumis au risque inondation.

La méthodologie proposée de caractérisation des zones de production est la suivante et suit plusieurs étapes :

- 1ère étape : délimitation des principaux sous-bassins versants du territoire d'étude ;
- 2ème étape : classification de ces sous-bassins versants en zones de production prioritaires ou non prioritaires (priorité relative au risque d'aggraver les inondations par ruissellement dans des secteurs à enjeux dans le futur) en fonction :
 - des enjeux présents au niveau de l'exutoire du sous-bassin et de leur sensibilité au risque inondation ;
 - de l'état d'urbanisation actuel du sous-bassin versant ;
 - de la localisation des zones à enjeux sur le sous-bassin versant ;
 - de l'occupation des sols et de la pente du sous-bassin versant.

Cette priorisation des enjeux présente un double intérêt :

- faciliter la compréhension de la dynamique de génération des phénomènes de ruissellement de surface et bien se représenter toute la zone alimentant un secteur à enjeux ;
- du point de vue du futur règlement du PPRI, la déclinaison de deux types de zones de production permettra de définir des réponses adaptées (en termes de stratégies de rétention des eaux de pluie et de limitation des débits de fuite vers l'aval) à la nature réel du risque sans être trop pénalisant sur des secteurs qui ne sont pas réellement problématiques.

Un exemple de carte d'aléa fonctionnel, issu du PPRI NO Lille et intégrant les zones d'écoulement, les zones d'accumulation et les zones de production hiérarchisées, est présenté page suivante.

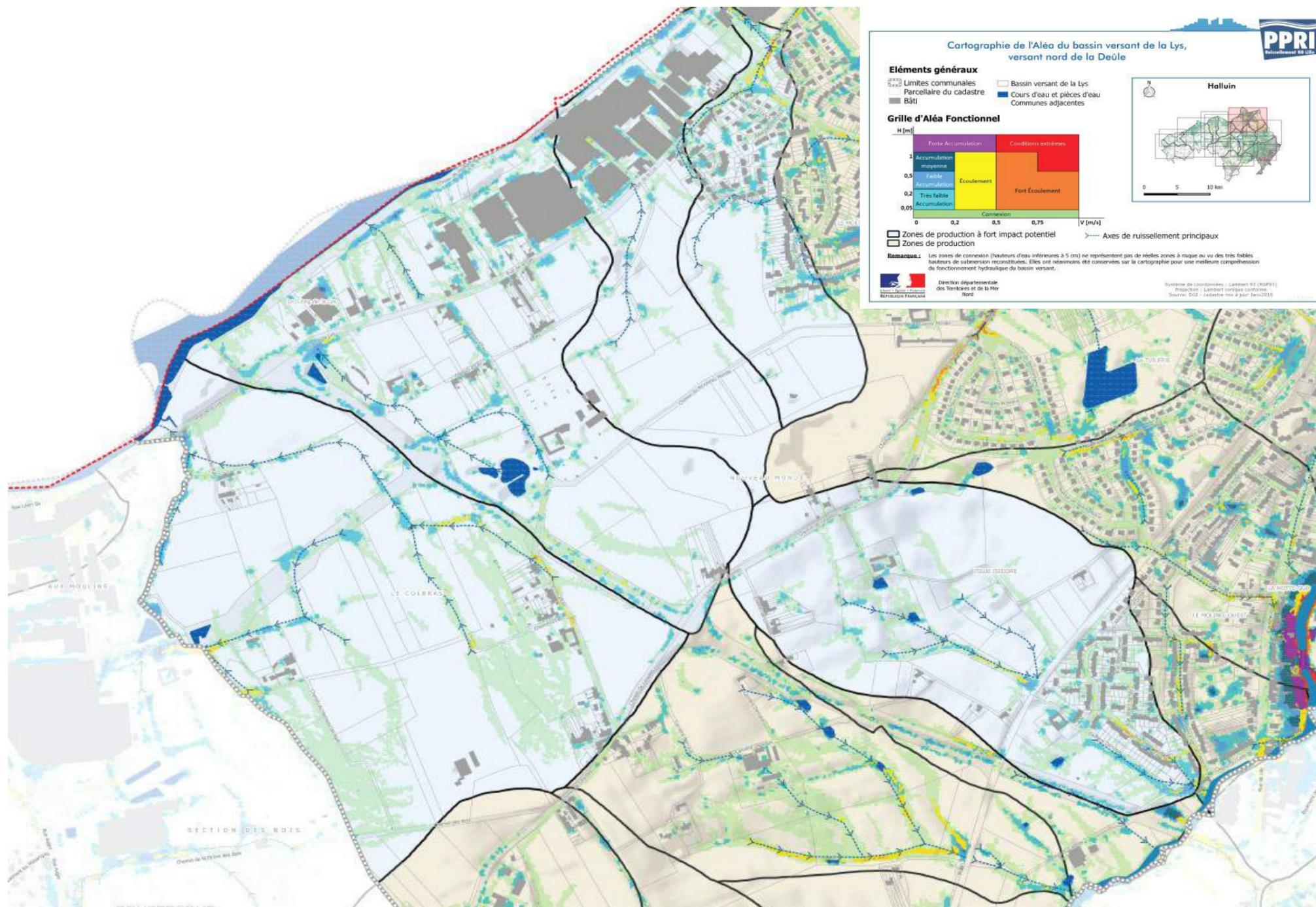


Figure 9 Exemple de carte intégrant les zones de production hiérarchisées (Source : PPRI NO Lille)

3.2 Méthodologie d'élaboration des cartes

3.2.1 Création des contours de hauteurs et de vitesses

La cartographie de l'aléa, objet de la phase 2 de l'étude, fera partie d'un document réglementaire dont les implications sont très fortes en termes d'urbanisme, et qui conditionnera directement l'élaboration du futur zonage réglementaire.

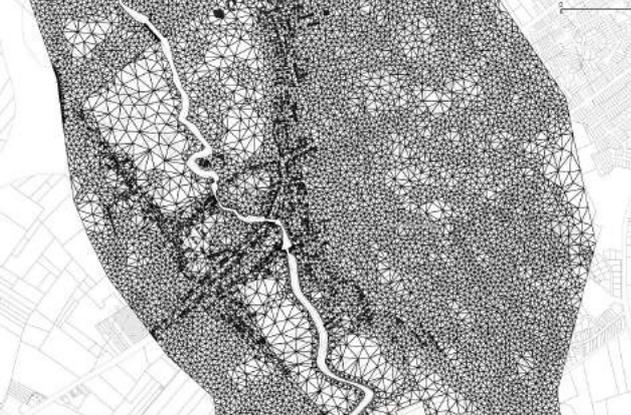
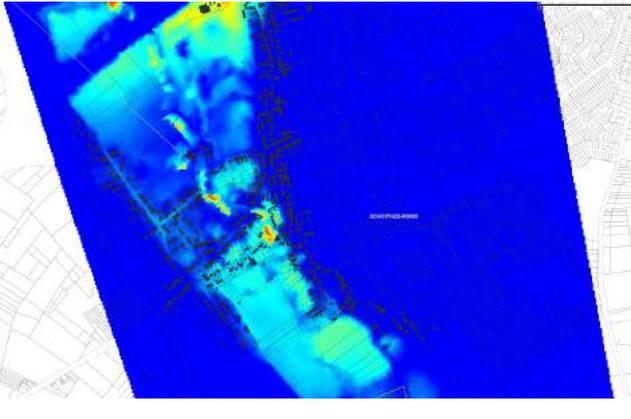
Il est donc indispensable que la carte d'aléa soit la plus précise possible et représente finement la réalité physique du terrain.

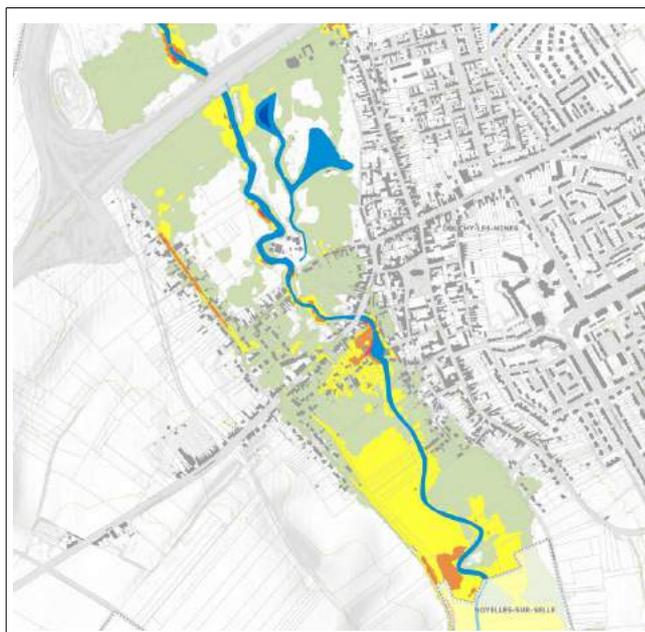
Le logiciel de modélisation hydraulique utilisé (ICM) possède un module de cartographie automatique (« Flood Mapping ») qui exploite les résultats du modèle au niveau de chaque maille (niveaux maximums d'inondation en m NGF) pour, en les croisant directement avec le Modèle Numérique de Terrain (MNT), obtenir une grille couvrant toute la zone d'étude (avec un pas d'espace égal à celui du MNT soit 1 m), avec sur chaque pixel l'information en termes de hauteurs de submersion. **C'est en toute rigueur la méthode de cartographie la plus précise.**

Les contours de hauteurs de submersion générés à partir du Flood Mapping d'ICM peuvent présenter visuellement un aspect pixelisé (les hauteurs étant reconstituées sur chaque pixel du MNT), notamment en bordure de la zone inondable, suivant la taille des cellules du MNT et l'échelle de rendu. La taille des cellules du MNT utilisé pour le PPRI des pieds de coteaux étant de 1 m, ces pixels ne pas seront visibles sur les cartes au 1/5000^e (1 m = 0,2 mm sur la carte).

Cependant cette méthode ne s'applique qu'aux hauteurs de submersion. La délimitation des classes de vitesses d'écoulement se base elle sur une exploitation directe des informations contenues dans les mailles de résultats du modèle selon la méthodologie présentée page suivante.

Tableau 5 Procédure d'interpolation des vitesses d'écoulement (exemple tiré du PPRI de la Selle)

	<p>Extraction des mailles du modèle, contenant chacune la vitesse d'écoulement maximale simulée</p>
	<p>Extraction du centroïde de chaque maille qui garde les informations en termes de vitesses</p>
	<p>Interpolation des centroïdes précédemment créés afin de créer une surface de vitesse (« grid »)</p>



Création de contours à partir du « grid » précédent respectant les classes de vitesses réglementaires

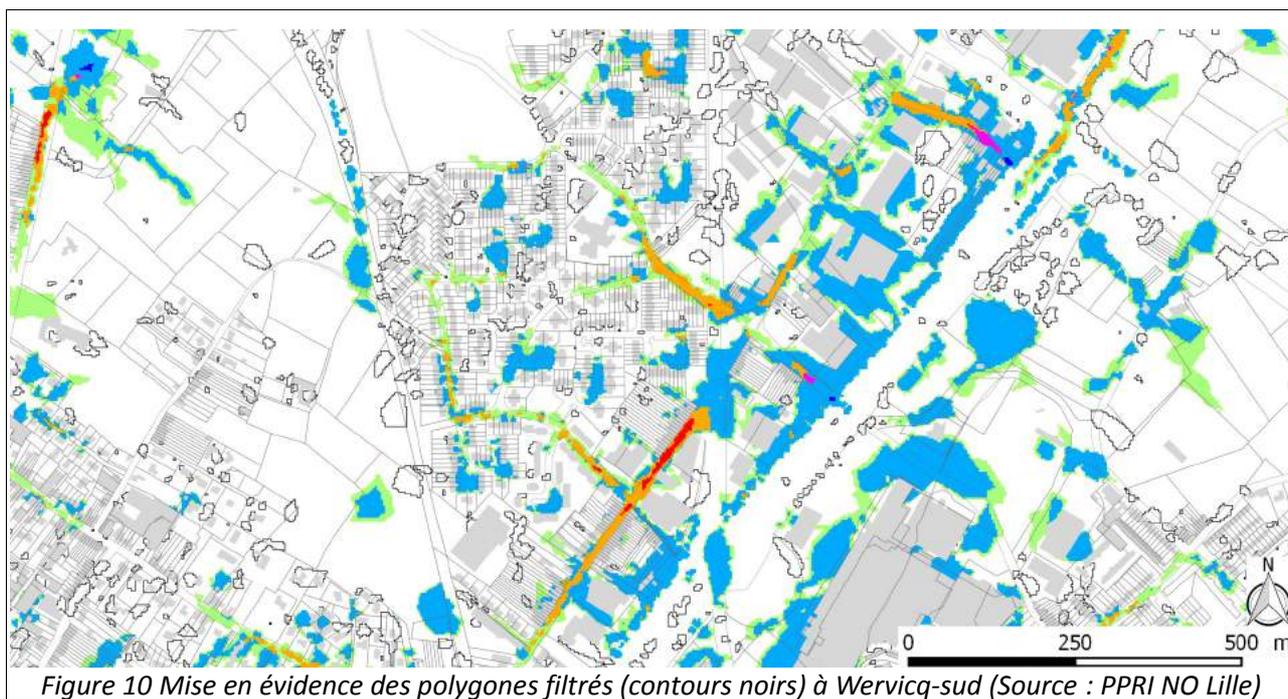
Les contours de hauteurs (créés à partir du module de cartographie automatique d'ICM) et les classes de vitesses (créées à partir de la méthodologie décrite ci-dessus) sont ensuite croisés pour construire les contours de l'aléa de référence.

3.2.2 Filtrage des résultats de l'aléa ruissellement

Par définition, pour la problématique ruissellement, la pluie est appliquée sur tout le territoire. En termes de cartographie, cela se manifeste par la création de multiples zones inondées de petite taille (cuvettes) qui nuisent à la lecture globale de la carte et qui ne représentent pas réellement un risque à l'échelle du territoire. Cette problématique, rencontrée dans le cadre de l'élaboration du PPRI ruissellement de NO Lille, a conduit à définir plusieurs critères de filtrage des résultats de modélisation :

- un critère de hauteur d'eau minimum pour filtrer les zones non significatives (à titre d'exemple, 1 cm retenu pour le PPRI NO Lille);
- un critère de surface inondée minimum pour filtrer les zones de connexion ou d'accumulation de petite taille, isolées et présentant de faibles hauteurs d'eau (à titre d'exemple, 500 m² retenu pour le PPRI NO Lille);

Différents tests seront faits sur ces deux critères afin de les affiner et d'avoir une bonne représentativité globale de la carte d'aléa ruissellement. Les critères retenus seront choisis en concertation avec la DDTM62.



3.2.3 Continuité entre carte d'aléa débordement de cours d'eau et carte d'aléa ruissellement

L'objectif du présent PPRI est d'élaborer, par commune, une carte d'aléa de référence unique qui synthétise à la fois les phénomènes de débordement des canaux et les phénomènes de ruissellement. Le principe général sera de retenir l'aléa le plus pénalisant (événement hivernal ou estival) sur les secteurs touchés à la fois par des débordements et par des phénomènes de ruissellement (secteur des pieds de coteaux).

Pour ne pas avoir des résultats trop tranchés d'un point de vue cartographique au niveau des zones de transition, la cartographie de l'aléa de référence sera affinée sur ces secteurs, en concertation avec la DDTM62, afin d'assurer une transition douce et lissée entre les secteurs de ruissellement pur et les zones de débordements.

3.3 Format des rendus et exemples

Deux formats de rendu seront proposés pour l'ensemble des cartographies produites durant la phase 3 :

- au 1/5000^e, à l'échelle communale, sur fond cadastral. Les communes n'ayant pas toute la même emprise, le format des cartes sera adapté (A0, A1, A2, A3 ou A4) pour que l'échelle de rendu soit respectée ;
- au 1/25000^e, à l'échelle du bassin versant, sur fond SCAN 25.

Les cartographies suivantes seront produites (à la fois pour les problématiques débordement de cours d'eau et ruissellement sachant que pour les communes impactées par les deux phénomènes, elles seront représentées sur une seule et même carte) :

- la cartographie des hauteurs de submersion maximales ;
- la cartographie des vitesses maximales d'écoulement ;
- la cartographie de l'aléa de référence classique sur laquelle figureront :
 - les points singuliers ;
 - les isocotes de crue centennale, soit la ligne de même altitude atteinte par l'inondation. Ces isocotes seront espacées de 200 m au maximum avec un dénivelé entre deux isocotes de 20 cm de préférence et de 50 cm au maximum ;
- la cartographie de l'aléa de référence fonctionnel (qui intégrera les zones de production pour la partie ruissellement).

Des exemples de chacune de ces cartes sont présentés en annexe 2.

De plus :

- les synthèses communales (réalisées en phase 1) seront complétées pour y ajouter la cartographie des aléas (classique et fonctionnel) ;
- une fois validées par la DDTM62, les couches d'aléas seront diffusées sur la plateforme cartographique en ligne. Les acteurs techniques et locaux pourront ainsi les visualiser et émettre des commentaires ou des observations sur des zones potentiellement litigieuses.

Annexes

Annexe 1

Coefficient d'imperméabilisation en fonction de l'occupation des sols

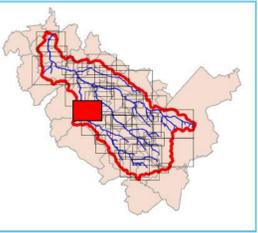
numéro de poste	poste d'occupation du sol	coefficient d'imperméabilisation
1	Bois ou forêts	0.05
2	Coupes ou clairières en forêts	0.05
3	Peupleraies	0.1
4	Terres labourées	0.1
5	Surfaces en herbe à caractère agricole	0.1
6	Vergers, pépinières	0.2
7	Maraîchage, horticulture	0.2
8	Cultures intensives sous serres	0.25
9	Eau	0
10	Surfaces en herbe non agricoles	0.1
11	Carrières, sablières	0.1
12	Décharges	0.1
13	Vacant rural	0.1
14	Parcs ou jardins	0.1
15	Jardins familiaux	0.1
16	Jardins de l'habitat	0.1
17	Terrains de sport en plein air	0.15
18	Équipements sportifs de grande surface	0.1
19	Camping, caravaning	0.1
20	Parcs liés aux activités de loisirs	0.1
21	Terrains vacants	0.4
22	Habitat individuel	0.3
23	Ensembles d'habitat individuel identique	0.4
24	Habitat rural	0.15
25	Habitat continu bas	0.7
26	Habitat collectif continu haut	0.8
27	Habitat collectif discontinu	0.6
28	Habitat autre	0.5
29	Équipements pour eau, assainissement, énergie	0.5
30	Zones ou espaces affectés aux activités	0.7
31	Entrepôts logistiques	0.9
32	Commerces	0.9
33	Bureaux	0.8
34	Bâtiments ou installations de sport	0.8
35	Équipements d'enseignement	0.6
36	Équipements de santé	0.5
37	Cimetières	0.2
38	Grands centres de congrès et d'exposition	0.6

numéro de poste	poste d'occupation du sol	coefficient d'imperméabilisation
39	Equipements culturels et de loisirs	0.6
40	Administrations, organismes officiels	0.6
41	Autres equipements accueillant du public	0.6
42	Emprises de transport ferre	0.2
43	Emprises routieres	0.9
44	Parcs de stationnement	0.9
45	Gares routieres, dépôts	0.8
46	Installations aeroportuaires	0.8
47	Chantiers	0.5

Annexe 2

Exemples de cartographies

VERTAIN



Éléments généraux

- Limites communales
- Limite du bassin versant de l'Ecaillon
- Lit mineur de l'Ecaillon et de ses affluents et de l'Escaut
- Courbes de niveau en mNGF (10 m)
- Isocotes en m NGF (0,25 m)

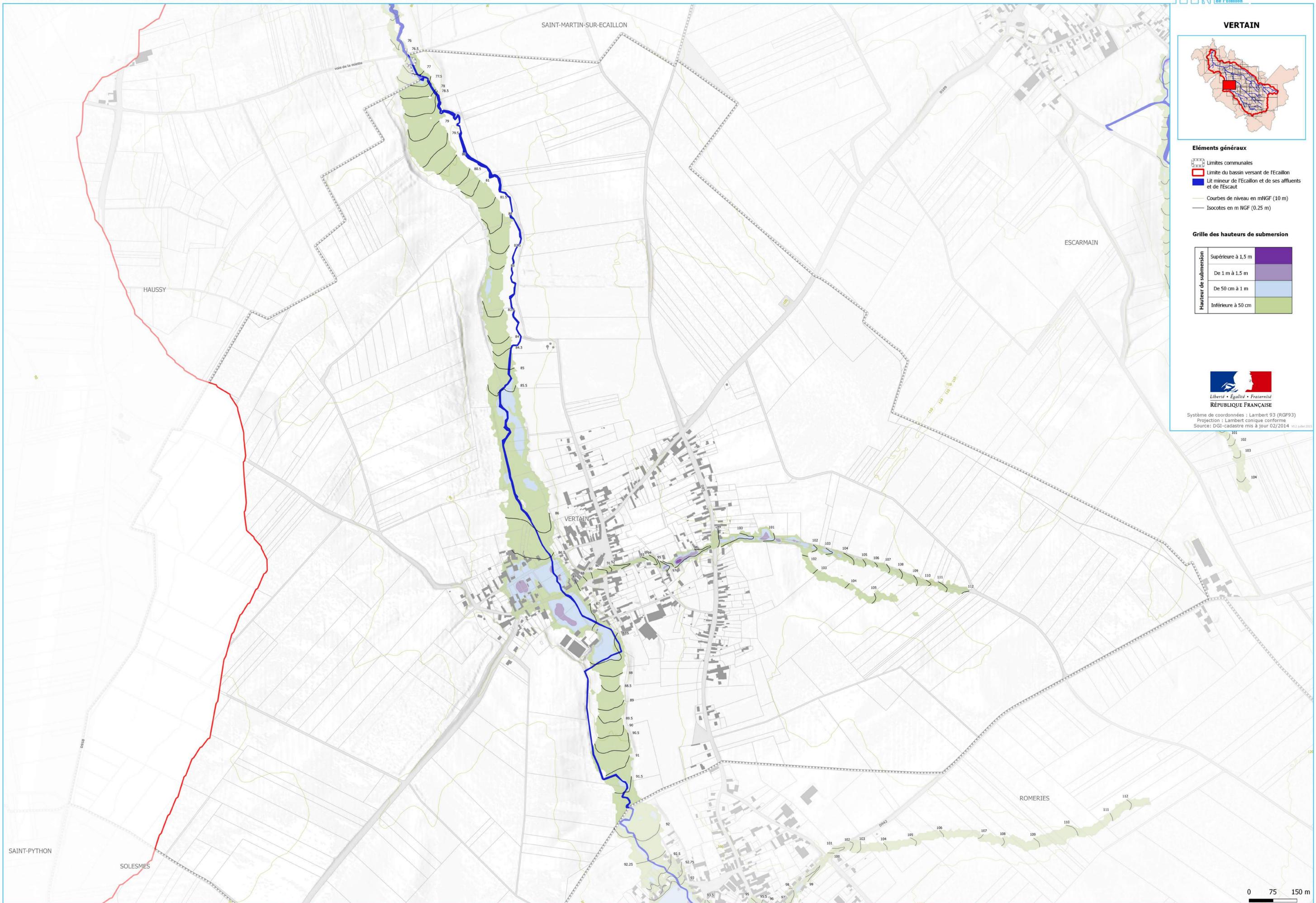
Grille des hauteurs de submersion

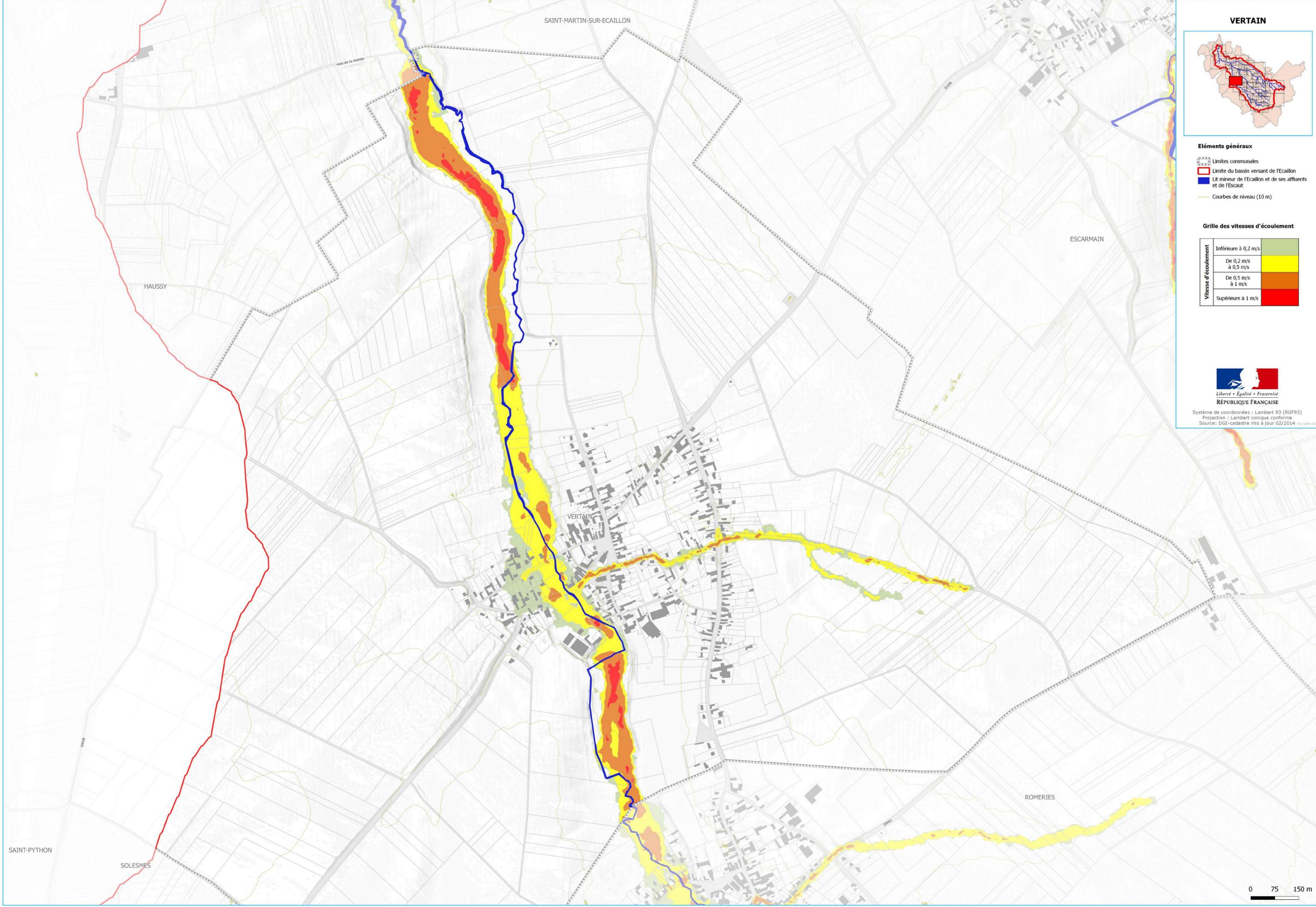
Hauteur de submersion	Supérieure à 1,5 m	
	De 1 m à 1,5 m	
	De 50 cm à 1 m	
	Inférieure à 50 cm	



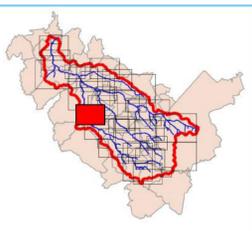
Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Système de coordonnées : Lambert 93 (RGF93)
Projection : Lambert conique conforme
Source : DGI-cadastre mis à jour 02/2014





VERTAIN



Eléments généraux

- Limites communales
- Limite du bassin versant de l'Ecaillon et de ses affluents et de l'Escaut
- Courbes de niveau (10 m)

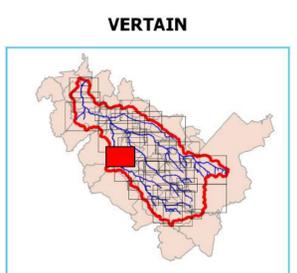
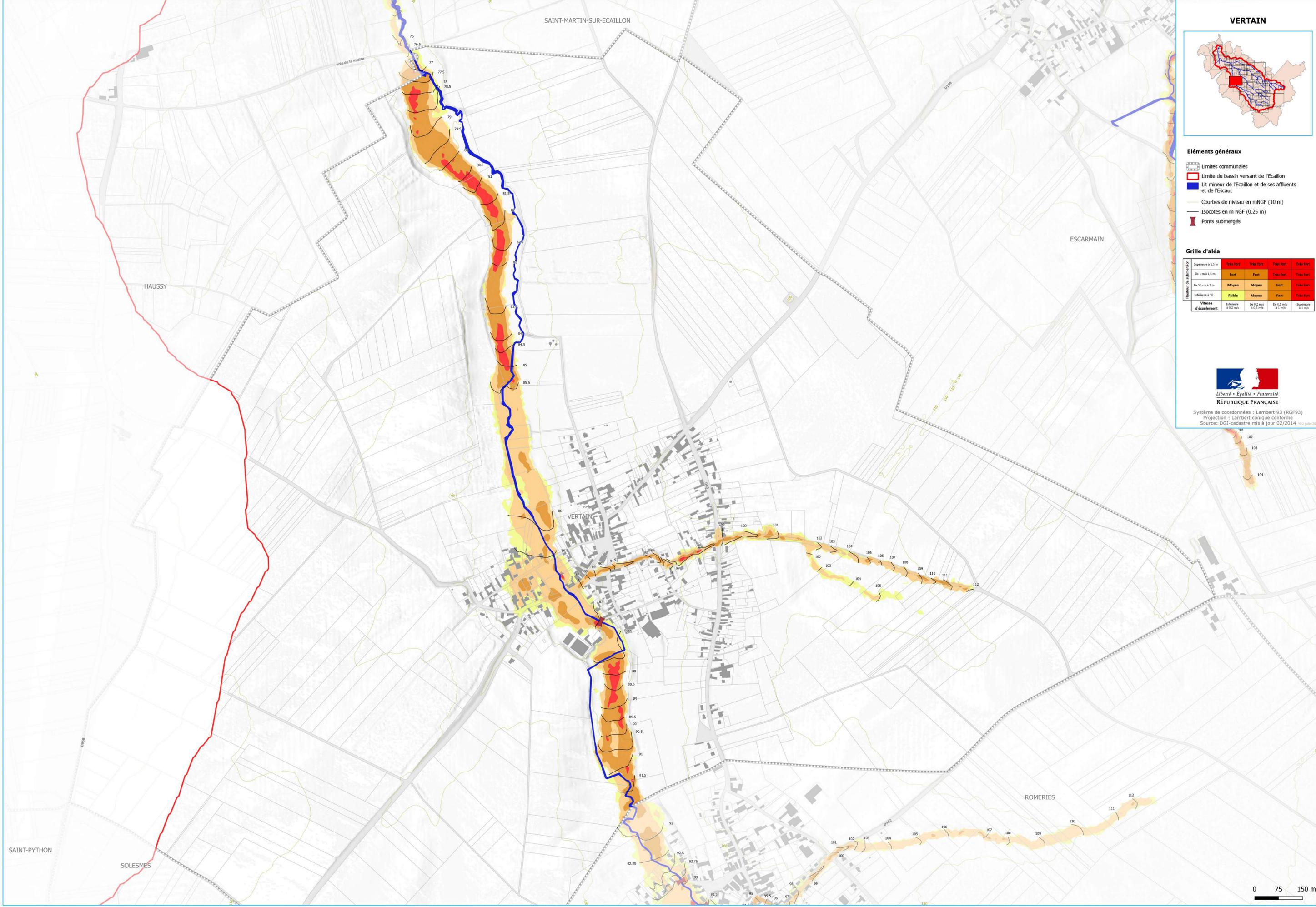
Grille des vitesses d'écoulement

Vitesse d'écoulement	Inférieure à 0,2 m/s	
	De 0,2 m/s à 0,5 m/s	
	De 0,5 m/s à 1 m/s	
	Supérieure à 1 m/s	



Système de coordonnées : Lambert 93 (RGF93)
 Projection : Lambert conique conforme
 Source : DGI-cadastre mis à jour 02/2014





VERTAIN

- Éléments généraux**
- Limites communales
 - Limite du bassin versant de l'Ecaillon et de l'Escaut
 - Lit mineur de l'Ecaillon et de ses affluents et de l'Escaut
 - Courbes de niveau en mNGF (10 m)
 - Isocotes en m NGF (0.25 m)
 - Ponts submergés

Grille d'aléa

Hauteur de submersion	Vitesse d'écoulement			
	Inférieure à 0,2 m/s	De 0,2 m/s à 0,5 m/s	De 0,5 m/s à 1 m/s	Supérieure à 1 m/s
Supérieure à 1,5 m	Très fort	Très fort	Très fort	Très fort
De 1 m à 1,5 m	Fort	Fort	Très fort	Très fort
De 50 cm à 1 m	Moyen	Moyen	Fort	Très fort
Inférieure à 50 cm	Faible	Moyen	Fort	Très fort



Système de coordonnées : Lambert 93 (RGF93)
 Projection : Lambert conique conforme
 Source : DGI-cadastre mis à jour 02/2014



Cartographie de l'Aléa du bassin versant de la Lys, versant nord de la Deûle

Eléments généraux

- Limites communales
- Parcelle du cadastre
- Bâti
- Bassin versant de la Lys
- Cours d'eau et pièces d'eau
- Communes adjacentes

Grille d'Aléa de référence

H [m]	Fort Accumulation	Conditions extrêmes
1	Accumulation moyenne	Fort Écoulement
0,5	Faible Accumulation	
0,2	Très faible Accumulation	Écoulement
0,05		
	0	0,2 0,5 0,75
		V [m/s]

Zones de production à fort impact potentiel
 Zones de production

Direction départementale des Territoires et de la Mer Nord
 Système de coordonnées : Lambert 93 (RGF93)
 Projection : Lambert conique conforme
 Source : DDE - cadastre mis à jour Janv.2016

