





# Analyse coût-bénéfice des actions de lutte contre le ruissellement et l'érosion des sols sur le bassin de la Lézarde

Rapport final

BRGM/RP-69650-FR

Mai 2020

V. Landemaine, A. Soullignac, O. Cerdan

**Vérificateur :**

Nom : Grangeon Thomas

Fonction : Chercheur

Date : 07/05/2020

GRANGEON  
Thomas

**Approbateur :**

Nom : Gourdier Sébastien

Fonction : Responsable d'Unité  
DRP/RIG

Date : 07/05/2020

Gourdier  
Sébastien

Le système de management de la qualité et de l'environnement  
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : [qualite@brgm.fr](mailto:qualite@brgm.fr)



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Mots-clés** : Analyse coût-bénéfice, Ruissellement, Érosion, WaterSed, Hydraulique douce, Lézarde, Haute-Normandie

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Landemaine V., Soullignac A., Cerdan O., (2020)** – Analyse coût-bénéfice des actions de lutte contre le ruissellement et l'érosion des sols sur le bassin de la Lézarde. Rapport final. BRGM/RP-69650-FR, 133 p., 63 fig., 34 tab., 3 ann.

## Sommaire

<b>1. Introduction générale</b> .....	<b>13</b>
1.1. CONTEXTE .....	13
1.2. PROBLÉMATIQUE ET ENJEUX.....	13
1.3. OBJECTIFS .....	14
<b>PARTIE 1 - Cartographie de l'aléa inondation par ruissellement et coulée de boue</b>	
<b>1. Introduction</b> .....	<b>19</b>
<b>2. Construction du modèle hydraulique</b> .....	<b>21</b>
2.1. LE MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN .....	21
2.2. LE RÉSEAU D'AXE DE RUISSELLEMENT .....	21
2.3. LES AMÉNAGEMENTS EXISTANTS .....	23
<b>3. Construction du modèle WaterSed</b> .....	<b>25</b>
3.1. L'OCCUPATION DES SOLS.....	25
3.2. LES SOLS .....	29
3.3. PARAMÉTRISATION DU MODÈLE .....	31
<b>4. Calibration et validation du modèle</b> .....	<b>39</b>
4.1. CALIBRATION .....	39
4.2. VALIDATION.....	43
4.3. BILAN .....	45
<b>5. Cartographie de l'aléa inondation par ruissellement</b> .....	<b>47</b>
5.1. PRINCIPE.....	47
5.2. GEOMÉTRIE DES TALWEGS.....	48
5.3. RELATION SECTION-HAUTEUR PAR PROFIL EN TRAVERS.....	48
5.4. CARTOGRAPHIE DES HAUTEURS D'EAU .....	51
<b>6. Aléa inondation et coulée de boue par scénario</b> .....	<b>53</b>
6.1. DÉFINITION DES SCÉNARIOS.....	53
6.2. PLUIES DE PROJET .....	60
6.3. MESURE DE L'IMPACT DES SCÉNARIOS .....	60
6.4. IMPACT DES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS .....	61
6.5. EFFET LOCAL ET EFFET GLOBAL DES AMÉNAGEMENTS.....	65
6.6. CARTOGRAPHIE DES ALÉAS.....	72
<b>7. Conclusion</b> .....	<b>77</b>

## **PARTIE 2 - Analyse coût-bénéfice**

<b>1. Introduction</b> .....	<b>81</b>
1.1. OBJECTIFS DE L'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE.....	81
1.2. PRINCIPE DE L'ANALYSE COÛT BÉNÉFICE .....	81
1.3. VUE D'ENSEMBLE DE LA DÉMARCHE .....	82
<b>2. Définition du périmètre d'analyse</b> .....	<b>85</b>
2.1. ECHELLE SPATIALE ET MODÈLES PHYSIQUES .....	85
2.2. HORIZON TEMPOREL ET ACTUALISATION .....	85
2.3. TYPES DE DOMMAGES CONSIDÉRÉS.....	86
<b>3. Détermination de l'exposition du territoire au risque</b> .....	<b>87</b>
3.1. MODÉLISATION DES ALÉAS ET SCÉNARIOS CONSIDÉRÉS.....	87
3.2. CARACTÉRISATION DES ENJEUX EXPOSÉS .....	89
<b>4. Évaluation des dommages</b> .....	<b>93</b>
4.1. PRINCIPES DES FONCTIONS DE DOMMAGE .....	93
4.2. DOMMAGES AUX LOGEMENTS .....	94
4.3. DOMMAGES AUX ÉTABLISSEMENTS ÉCONOMIQUES.....	94
4.4. DOMMAGES AUX ÉTABLISSEMENTS PUBLICS.....	97
4.5. COÛTS ET BÉNÉFICES NON PRIS EN COMPTE.....	98
<b>5. Évaluation des coûts des ouvrages</b> .....	<b>101</b>
5.1. OUVRAGES CONSIDÉRÉS .....	101
5.2. CONSTRUCTION DES COÛTS DES OUVRAGES .....	101
<b>6. Analyse cout bénéfice</b> .....	<b>107</b>
6.1. ACB DES SCÉNARIOS DE DÉBORDEMENT DE COURS D'EAU ET DE RUISSellement DANS LES TALWEGS PRINCIPAUX .....	107
6.2. ACB DES SCÉNARIOS DE COULÉES BOUEUSES .....	112
<b>7. Conclusion de l'analyse coût-bénéfice</b> .....	<b>115</b>
<b>8. Bibliographie</b> .....	<b>117</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Schéma général du déroulé de l'étude. ....	15
Figure 2 : Périmètre d'action du modèle MIKE 11 et du modèle WaterSed sur le bassin de la Lézarde. ....	19
Figure 3 : Cartographie finale des axes de ruissellement digitalisés. ....	22
Figure 4 : Exemple d'interconnexion entre les ouvrages recensés (points blancs numérotés de 1 à 5) et le réseau d'axe de ruissellement (trait jaune). ....	23
Figure 5 : Cartographie des ouvrages de gestion des eaux de ruissellement intégrés au modèle hydraulique. ....	24
Figure 6 : Étapes de construction de la cartographie de l'occupation des sols à partir des cartographies OSCOM et RPG. ....	25
Figure 7 : (Gauche) Cartographie de l'occupation des sols OSCOM 2016 ; (Droite) Cartographie de l'occupation des sols 2016 OSCOM + RPG. ....	28
Figure 8 : Statistiques de l'occupation des sols 2016 sur le bassin de la Lézarde. ....	29
Figure 9 : Cartographie simplifiée des textures de sol sur le bassin de la Lézarde, construite à partir du Référentiel Régional Pédologique de Haute-Normandie. ....	30
Figure 10 : Triangle des textures et niveau d'érodibilité de chacune des classes. ....	30
Figure 11 : Principe général de paramétrisation du modèle WaterSed. ....	31
Figure 12 : Méthode d'évaluation de l'état de surface du sol selon la couvert végétal, le faciès sédimentaire et la rugosité du sol. ....	32
Figure 13 : Cartographie des bétouilles sur le bassin de la Lézarde. ....	38
Figure 14 : Méthode de détermination des paramètres du modèle WaterSed par comparaison entre les volumes de ruissellement et les flux sédimentaires mesurés au droit de la station hydro-sédimentaire et ceux prédits par le modèle. ....	39
Figure 15 : Localisation de la station hydrométrique de Montivilliers, du poste Météo-France d'Octeville (Poste 1) et du poste Météo-France de Criquetot l'Esneval (Poste 2). ....	40
Figure 16 : Hyétogramme et hydrogramme de la crue de janvier 2018 de la Lézarde enregistrée au niveau de la station hydrométrique de Montivilliers. ....	41
Figure 17 : Hydrogramme de ruissellement observé et prédit à Montivilliers, à l'issue de l'étape de calibration du modèle WaterSed sur la crue de janvier 2018. ....	42
Figure 18 : Hyétogramme et hydrogramme de la crue de juin 2003 de la Lézarde enregistrée au niveau de la station hydrométrique de Montivilliers. ....	43
Figure 19 : Hydrogramme de ruissellement observé et prédit à Montivilliers, à l'issue de l'étape de calibration du modèle WaterSed sur la crue de juin 2003. ....	44
Figure 20 : Exemple de cartographie des débits de pointe en sortie du modèle WaterSed. ....	47
Figure 21 : Caractéristiques des profils en travers tracés pour extraire la géométrie des talwegs. ....	48
Figure 22 : (Gauche) Cas 1 : profil en travers parallèle à la direction du versant ; (Droite) Cas 2 : profil en travers recoupant deux talwegs. ....	49
Figure 23 : Artefact généré pour le Cas 1 (Gauche) et le Cas 2 (Droite) si l'ensemble du profil en travers est considéré pour le calcul de la hauteur d'eau. ....	49
Figure 24 : Délimitation de l'extrémité du profil en travers en rive droite et en rive gauche pour le Cas 1 (Gauche) et le Cas 2 (Droite). ....	49
Figure 25 : (Gauche) Méthode de calcul de la section mouillée pour chaque point du profil ; (Droite) Exemple de relation section mouillée – hauteur. ....	50

Figure 26 : Représentation sur un profil en travers des deux points délimitant la largeur de l'inondation et du point représentant l'altitude de la ligne d'eau au droit de l'axe de ruissellement. ....	50
Figure 27 : Représentation d'un profil en travers après traitement. Chaque profil se résume à trois points : un point pour le centre du profil (avec comme attribut l'altitude de l'inondation) et deux points en rive droite et en rive gauche délimitant la largeur d'inondation. ....	51
Figure 28 : Procédure de calcul de la cartographie des hauteurs d'eau. ....	52
Figure 29 : Cartographie du programme d'aménagement d'hydraulique douce du Syndicat SMBV Pointe de Caux Étretat, actualisé en 2019. ....	55
Figure 30 : Superficie cumulée des prairies permanentes sur le bassin de la Lézarde, classée suivant la pente maximale de chaque parcelle de prairie. ....	56
Figure 31 : Statistiques de l'occupation des sols du scénario « herb » sur le bassin de la Lézarde. ...	56
Figure 32 : Cartographie de l'occupation des sols 2016 (Gauche) et cartographie de l'occupation des sols du scénario « herb » (Droite) sur le bassin de la Lézarde. ....	57
Figure 33 : Ratio médian entre le ruissellement annuel avec mesure et sans mesure (gauche) et ratio entre le flux sédimentaire annuel avec et sans mesure (droite) pour différentes mesures de conservation des sols - Maetens et al., (2012). ....	59
Figure 34 : Statistiques de l'occupation des sols du scénario « agr » sur le bassin de la Lézarde. ....	60
Figure 35 : Volume de ruissellement à Montivilliers pour les cinq scénarios et pour les trois pluies de projet. ....	61
Figure 36 : Débit de pointe à Montivilliers pour les cinq scénarios et pour les trois pluies de projet. ...	61
Figure 37 : Flux sédimentaire à Montivilliers pour les cinq scénarios et pour les trois pluies de projet. ....	62
Figure 38 : Fonction de dépôt de sédiments des fascines et des haies dans le modèle WaterSed. ....	65
Figure 39 : Taux de dépôt de sédiment des aménagements sur le bassin de la Lézarde pour les trois pluies de projet et pour le scénario « act » ; les taux de dépôt ont été classés de manière décroissante et exprimés en pourcentage du nombre d'aménagement total. Les pointillés correspondent aux bornes 5 % et 95 %. ....	66
Figure 40 : Taux de dépôt de sédiment des aménagements sur le bassin de la Lézarde pour les trois pluies de projet et pour le scénario « amb » ; les taux de dépôt ont été classés de manière décroissante et exprimés en pourcentage du nombre d'aménagement total. Les pointillés correspondent aux bornes 5 % et 95 %. ....	67
Figure 41 : Cas synthétique illustrant la diminution de l'impact d'une fascine avec l'augmentation de l'échelle spatiale. Les cartographies des flux sédimentaires présentées pour le scénario « ref1 » et « act » sont celles de la pluie de période de retour 10 ans. ....	69
Figure 42 : Cas synthétique illustrant le principe d'aménagement en cascade permettant de maintenir un abattement élevé aux différentes échelles spatiales. ....	70
Figure 43 : Cas synthétique illustrant l'impact bénéfique de l'amélioration des pratiques culturales aux différentes échelles spatiales. ....	71
Figure 44 : Extrait de la cartographie des hauteurs d'eau pour le scénario « ref1 » et pour la pluie de période de retour 10 ans. ....	72
Figure 45 : Extrait de la cartographie des flux sédimentaires pour le scénario « ref1 » et pour la pluie de période de retour 10 ans. ....	72
Figure 46 : Emprise de l'inondation pour chaque scénario et pour chaque pluie de projet sur le bassin de la Lézarde. ....	73
Figure 47 : Masse totale de sédiment piégée par l'ensemble des ouvrages du bassin de la Lézarde pour chaque scénario et chaque pluie de projet. ....	75
Figure 48 : Synoptique des grandes étapes de l'ACB, adapté de (Cepri, 2011). ....	83

Figure 49 : Zoom sur une zone exposée à l'inondation par débordement d'occurrence centennale et identification des enjeux exposés. ....	90
Figure 50 : Répartition géographique des bâtiments exposés aux aléas d'occurrence centennale. ....	91
Figure 51 : Exemple de fonctions de dommage utilisées extraites du guide du CGDD de 2018. ....	94
Figure 52 : Extrait du site internet du centre commercial de la Lézarde- <a href="https://www.lezarde.fr/boutiques/">https://www.lezarde.fr/boutiques/</a> .....	95
Figure 53 : Statistiques utilisées pour la construction des deux fonctions de dommage spécifiques au centre commercial de la Lézarde.....	96
Figure 54 : Fonction de dommage au bâtiment du centre commercial de la Lézarde.....	96
Figure 55 : Courbes d'endommagement aux bâtis et équipements des établissements publics. ....	98
Figure 56 : Indice du coût de production des travaux publics (base 100 année 2000). ....	102
Figure 57 : Construction des fonctions de coût d'investissement pour les ouvrages d'HS (€ 2 000). ....	102
Figure 58 : Courbes fréquence-dommage pour l'aléas débordement de cours d'eau dans les scénarios sans changement climatique. ....	108
Figure 59 : Évolution des DEMA des ouvrages d'HS dans les scénarios sans et avec évolution des pratiques agricoles. ....	109
Figure 60 : Évolution des DEMA avec et sans CC.....	110
Figure 61 : Résultats des deux indicateurs synthétiques de l'ACB pour les scénarios de débordement avec et sans changement climatique. ....	110
Figure 62 : Courbes fréquence-dommage pour l'aléa coulée boueuse dans les scénarios sans changement climatique. ....	113
Figure 63 : Extrait cartographique des résultats des modélisations Miket et Watersed et identification des enjeux exposés. ....	122

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Aire drainée et largeur de plein bord des deux points utilisés pour construire la relation empirique aire drainée – largeur de plein bord. ....	22
Tableau 2 : Nomenclature de la cartographie finale de l'occupation des sols 2016. ....	26
Tableau 3 : Table de conversion de la nomenclature OSCOM.....	26
Tableau 4 : Table de conversion de la nomenclature RPG. ....	27
Tableau 5 : Calendrier cultural spécifiant par type de culture et par type de sol, l'état de surface du sol. Les mois de semi et de récolte sont surlignés par type de culture, en jaune et en vert respectivement.....	35
Tableau 6 : Évolution mensuelle de la capacité d'infiltration du sol en fonction du type de culture, de la texture du sol et de l'état de surface des sols.....	35
Tableau 7 : Table de conversion état de surface du sol – .....	36
Tableau 8 : Table de conversion état de surface du sol – coefficient de Manning. ....	36
Tableau 9 : Table de conversion état de surface du sol – érodibilité. ....	36
Tableau 10 : Caractéristiques de chaque type d'aménagement d'hydraulique douce ; XXX : volume spécifique à chaque ouvrage. ....	37
Tableau 11 : Valeurs des différents paramètres après calibration du modèle WaterSed.....	39

Tableau 12 : Table de détermination des pertes initiales (imbibition) au début d'un évènement pluvieux par croisement de la capacité d'infiltration mensuelle et de la hauteur de pluie antécédente à 48 h. ....	42
Tableau 13 : Caractéristiques de la crue de janvier 2018 et de juin 2003 utilisées respectivement pour la calibration et la validation du modèle WaterSed. Le débit de pointe et le volume de ruissellement simulé par le modèle pour ces deux crues sont également indiqués. ....	45
Tableau 14 : Vue d'ensemble des différents scénarios étudiés dans l'ACB. ....	53
Tableau 15 : Statistiques sur les ouvrages structurant et les ouvrages d'hydraulique douce du scénario « actu ».....	54
Tableau 16 : Statistiques du programme d'aménagement d'hydraulique douce du Syndicat SMBV Pointe de Caux Étretat, actualisé en 2019 et intégré au scénario « amb ». ....	55
Tableau 17 : Liste des mesures de conservation des sols étudiées par Maetens et al., (2012). ....	58
Tableau 18 : Caractéristiques des pluies de projet. ....	60
Tableau 19 : Synthèse des volumes de ruissellement (A), des débits de pointe (B) et des masses de sédiment transportées par les eau (C) au droit de la station de Montivilliers pour les cinq scénarios et pour les trois pluies de projet. ....	63
Tableau 20 : Emprise de l'inondation pour chaque scénario et pour chaque pluie de projet sur le bassin de la Lézarde. ....	74
Tableau 21 : Masse totale de sédiment piégée par l'ensemble des ouvrages du bassin de la Lézarde pour chaque scénario et chaque pluie de projet. ....	75
Tableau 22 : Bilan de l'érosion brute totale, des dépôts de sédiments totaux au droit des aménagements d'hydraulique douce, et des ouvrages pour P100ans sur le bassin de la Lézarde. ....	76
Tableau 23 : Synthèse des résultats de modélisation des aléas utilisés pour le calcul économique dans chacun des scénarios. ....	88
Tableau 24 : Périodes retours retenues pour la prise en compte du changement climatique dans la modélisation des phénomènes de débordement. ....	88
Tableau 25 : Périodes retours retenues pour la prise en compte du changement climatique dans la modélisation des phénomènes de coulée boueuse. ....	89
Tableau 26 : Synthèse des bâtiments exposés au risque et qualifiés pour les besoins de l'ACB. ....	92
Tableau 27 : Liste des établissements concernés par des montants de dommages aux stocks et aux équipements supérieurs à 1,5M€ avant application des plafonds de nombre d'employés fournis avec les fonctions de dommage. ....	97
Tableau 28 : Liste et quantité des ouvrages considérés dans les modélisations. ....	101
Tableau 29 : Coûts d'entretien du parc d'ouvrages structurants. ....	103
Tableau 30 : Résumé des coûts de références utilisés et des valeurs retenues pour le chiffrages des actions d'HD. ....	105
Tableau 31 : Coût utilisés pour l'hydraulique douce. ....	106
Tableau 32 : Montant des dommages causés par les débordements de cours d'eau en K€ <sub>2000</sub> . ....	107
Tableau 33 : Résultats des deux indicateurs synthétiques de l'ACB pour les scénario de débordement avec et sans changement des pratiques agricoles. ....	108
Tableau 34 : Montant des dommages causés par les coulées boueuses. ....	112

## Liste des annexes

Annexe 1 - Extrait cartographique des résultats des modélisations Mike et Watersed pour deux scénarios

Annexe 2 - Quelques tableaux de résultats intermédiaires détaillés par enjeux et communes

Annexe 3 - Construction d'une fonction de coût de gestion des déchets d'inondation

## Lexique

ACB	Analyse Coût-Bénéfice
BD TOPO	
CC	Changement Climatique
CTA	
DMA	Domage Moyen Annuel
DEMA	
IGN	
NAF	Nomenclature d'Activités Française
SIG	Système d'information Géographique
SIREN	Système d'Identification du Répertoire des Entreprises
TRI	Taux de Rentabilité Interne
VAN	Valeur Actuelle Nette



# 1. Introduction générale

## 1.1. CONTEXTE

Les départements de la Seine-Maritime et de l'Eure sont caractérisés par une forte sensibilité au ruissellement sur tout le territoire avec des conséquences fortes notamment dans les milieux récepteurs. En effet, d'une part, le territoire subit des inondations par ruissellement / coulées de boue dont la densité par kilomètre carré le classe au deuxième rang en France (Le Bissonais *et al.*, 2002). D'autre part, la Région souffre d'un problème de turbidité des captages, en lien avec l'érosion des terres. Près de 50 % des points d'alimentation en eau potable sont touchés par des problèmes de turbidité et selon les années, entre 1 000 et 20 000 habitants sont privés d'eau potable quelques jours par an suite à ces phénomènes (ARS, 2013). En outre, les questions de présence de produits phytosanitaires retrouvée dans les eaux brutes, dont une partie provient des ruissellements, concernent 50 000 habitants de façon chronique et plus de 100 000 habitants de façon ponctuelle (ARS 2013). Quant à l'érosion des sols, 75 % du territoire de la Seine Maritime et 50% du territoire de l'Eure sont concernés de façon importante (Souadi *et al.*, 2000).

Ces particularités régionales sont connues depuis les années 80 (Boiffin *et al.*, 1988; Papy F. and Boiffin, 1988). Elles résultent de la conjonction de nombreux paramètres, notamment la nature des sols, les types et systèmes de culture, la réduction de l'élevage, la forte densité de pertes ou bétoires dans le sous-sol karstique qui fournit l'eau potable, et enfin le développement historique des habitats et des activités humaines en fonds de vallée.

Suite à une décennie de catastrophes et de pollutions importantes, des stratégies d'actions ont été développées, sur la base de recherches scientifiques. Ces stratégies reposent sur plusieurs principes d'action qui fondent la politique régionale conduite depuis le début des années 2000 :

- intervenir à une échelle pertinente et fonctionnelle : le bassin versant ;
- traiter simultanément, si possible, les impacts du ruissellement et de l'érosion sur les biens et les personnes, et l'eau potable ;
- développer des actions curatives (ouvrage structurant, hydraulique douce, etc.) face aux besoins et à la demande sociale tout en développant en parallèle des mesures préventives (adaptation des pratiques culturelles, etc.) ;
- associer tous les acteurs du territoire : agriculteurs, riverains et aménageurs urbains ;
- développer des structures d'animations dédiées à l'échelle des bassins versants.

La création d'outils d'accompagnement et financiers a favorisé la mise en œuvre et le développement de ces actions. A noter que ces outils ont évolué au cours des années 2000-2015, pour rendre les politiques plus efficaces ou pour s'adapter aux évolutions du contexte réglementaire.

## 1.2. PROBLÉMATIQUE ET ENJEUX

Après plus de quinze années de développement d'actions préventives et correctives sur les bases établies en 2000, se pose la question de la poursuite de ces actions : faut-il continuer exactement dans la même direction avec les mêmes objectifs et les mêmes financements ou y-t-il lieu de réviser les politiques de lutte contre le ruissellement et l'érosion ?

En effet, les conditions ont évolué depuis les années 2000 :

- les conditions économiques sont nettement moins favorables, de par la raréfaction des sources de financement public ;
- de nouvelles préoccupations prennent de l'importance suite, entre autres, à l'évolution des textes réglementaires et du Programme d'intervention de l'Agence de l'eau Seine Normandie ;
- une grande partie des ouvrages structurants (majeurs) ont été réalisés ;
- des Programmes Nationaux ou de Bassins (PGRI), issus des directives cadres, fixent de nouveaux objectifs, avec des priorités différentes.

Parallèlement, l'imperméabilisation des sols s'est accentuée tout comme le retournement des prairies (CESER, 2018), accentuant encore le risque de ruissellement et d'érosion des sols.

Enfin, après quinze années de recherches scientifiques et techniques complémentaires (Ouvry *et al.*, 2012a, 2012b), avec de nouvelles connaissances, et la réalisation de milliers d'aménagements sur le terrain dans toute leur complexité (acceptation, cohérence d'ensemble, coût, entretien, évolution de l'efficacité), il est maintenant opportun de réaliser un retour d'expérience solide.

### 1.3. OBJECTIFS

Les deux principaux objectifs de cette étude sont donc les suivants :

1. réaliser une évaluation technico-économique de la politique menée depuis 2000 sur ce territoire visant à réduire le ruissellement, l'érosion des sols, les coulées de boues/inondations et la turbidité des captages d'eau potable ;
2. proposer une adaptation ou réorientation si besoin de la politique d'intervention de l'Agence.

Un large spectre de compétences a dû être mobilisé pour répondre aux objectifs de l'étude : analyse coût-bénéfice, conceptualisation et modélisation multi-échelles du fonctionnement hydrologique, hydrogéologique et sédimentaire du bassin versant, mesures de réduction du ruissellement et de l'érosion des terres (efficacité / limites), stratégies de déploiement de mesures sur le bassin versant (spatiales et temporelles), impact régional du changement climatique, etc. Dans ce contexte, plusieurs partenaires aux compétences complémentaires se sont associés : le BRGM, le Laboratoire M2C-CNRS de la Faculté de Rouen<sup>1</sup> et l'AREAS<sup>2</sup>. Le déroulé de l'étude ainsi que la répartition des différentes tâches entre les différents partenaires sont présentés sur la Figure 1.

---

<sup>1</sup> M2C-CNRS : <https://www.unicaen.fr/m2c/>

<sup>2</sup> AREAS : <http://www.areas-asso.fr/>

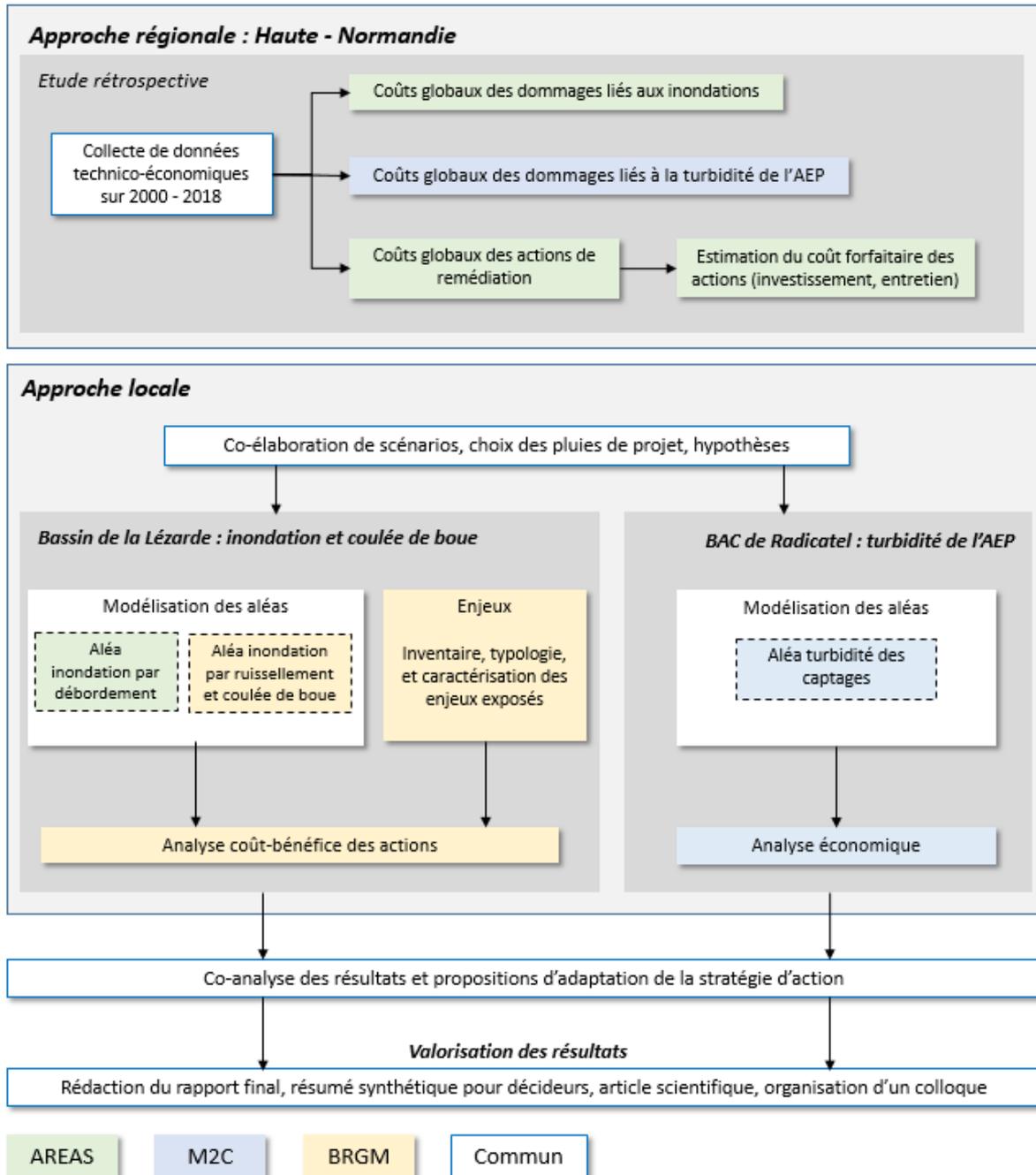


Figure 1 : Schéma général du déroulé de l'étude.

L'ensemble des résultats produits dans cette étude ont été synthétisés dans le rapport :

*Projet EVAPORE - Évaluation de l'efficacité des politiques publiques pour les actions visant à réduire les impacts du ruissellement et de l'érosion en Haute-Normandie, (2020), Rapport final, 356 p.*

Ce rapport est découpé en quatre volumes :

- volume 1 : Bilan économique global du ruissellement, de l'érosion, et de la turbidité aux captages AEP (départements de Seine-Maritime et de l'Eure) ;

- volume 2 : Modélisation des scénarios et cartographie des aléas inondation et coulées boueuses sur le bassin versant de la Lézarde ;
- volume 3 : Analyse coût-bénéfice des actions de lutte contre le ruissellement et l'érosion sur le bassin de la Lézarde ;
- volume 4 : Évaluation économique des actions de lutte contre la turbidité du captage sur le Bassin d'Alimentation de Capatage (BAC) de Radicatel.

Le présent rapport BRGM détaille, d'une part, l'analyse coût-bénéfice sur le bassin de la Lézarde (Volume 3) et, d'autre part, la modélisation de l'aléa inondation par ruissellement et coulée de boue (Partie 2 du Volume 2).

# **Partie 1**

## **Cartographie de l'aléa inondation par ruissellement et coulée de boue**



# 1. Introduction

L'analyse coût-bénéfice (ACB), présentée dans la Partie 2 de ce rapport, nécessite en entrée des cartographies de l'aléa inondation et coulée de boue. En l'état actuel, aucun modèle n'est en mesure de simuler à la fois les inondations par débordement de cours d'eau, les inondations par ruissellement et les coulées de boues. Par conséquent, deux modèles complémentaires ont été utilisés sur le bassin de la Lézarde :

- MIKE 11 : modèle développé par DHI, modélisant l'aléa inondation par débordement de cours d'eau dans les principales vallées (Volume 2) ;
- WaterSed : modèle développé par le BRGM, modélisant l'aléa inondation par ruissellement et l'aléa coulée de boue sur les versants et dans les talwegs.

Le périmètre d'application de chaque modèle est présenté sur la Figure 2. Cette Partie 1 du rapport détaille la modélisation de l'aléa inondation par ruissellement et coulée de boue.

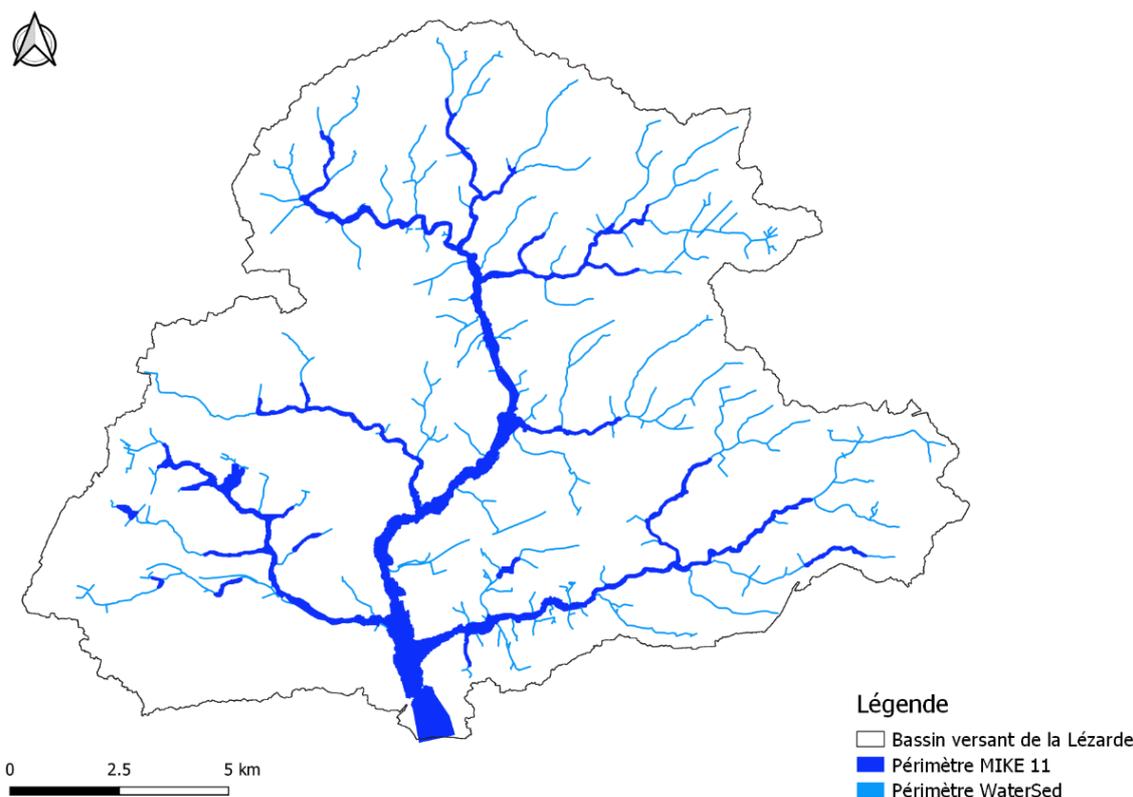


Figure 2 : Périmètre d'action du modèle MIKE 11 et du modèle WaterSed sur le bassin de la Lézarde.

Le modèle WaterSed est un modèle non-dynamique distribué simulant le ruissellement et l'érosion des sols depuis l'échelle de la parcelle à celle du bassin versant pour un événement de pluie donné (Landemaine, 2016). Calibré et/ou validé dans de nombreux contextes (Haute-Normandie, Mayotte, Champagne, etc.), cet outil permet d'évaluer l'impact de mesures préventives et curatives (aménagements d'hydraulique douce, mares, etc.) ou encore de prévoir les conséquences de scénarios futurs d'occupation des sols et de changements climatiques.

La stratégie de modélisation mise en place pour les besoins de l'ACB a été la suivante :

- **phase 1 : construction du modèle hydraulique** à partir des données topographiques, des ouvrages et des levés existants ;
- **phase 2 : mise en œuvre du modèle d'érosion WaterSed** ; paramétrisation des unités sol – occupation du sol ; production des données d'entrée du modèle ;
- **phase 3 : calibration du modèle** d'érosion sur un évènement de référence ;
- **phase 4 : validation du modèle** d'érosion sur un second évènement de référence ; analyse de stabilité des paramètres du modèle ;
- **phase 5 : développement et ajout d'une méthode de cartographie** de l'aléa inondation et coulée de boue ;
- **phase 6 : application du modèle érosion et inondation/coulée de boue pour différents scénarios alimentant l'ACB** ; préparation des données, modélisation, cartographie et analyse des résultats.

## 2. Construction du modèle hydraulique

Le modèle hydraulique d'un bassin versant correspond à une représentation topographique des versants et des cours d'eau sur lequel il est possible de simuler les écoulements de l'eau à l'aide d'un modèle hydrologique.

Dans cette étude, le modèle hydrologique et sédimentaire utilisé est le modèle WaterSed, dont l'application se limite exclusivement aux versants. En effet, ce modèle simule uniquement les inondations par ruissellement. Les inondations par débordements sont simulées par le modèle MIKE11.

Dès lors, la construction du modèle hydraulique et du modèle hydrologique s'est concentrée sur les versants, en veillant à respecter les chemins d'écoulements des eaux depuis la ligne de partage des eaux jusqu'aux cours d'eau permanents et à prendre en compte l'ensemble des ouvrages hydrauliques susceptibles de modifier la réponse hydrologique du bassin (barrages, mares, bassins, etc.)

Pour se faire, différentes bases de données ont été utilisées :

- le RGE ALTI 1m de l'IGN ;
- le réseau d'axes de ruissellement existant complété par la BD TOPO de l'IGN ;
- les ouvrages de rétention des eaux référencés dans la BD CASTOR de l'AREAS.

### 2.1. LE MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN

Le RGE ALTI 1 m est une représentation de la topographie de la surface du sol sous forme de maille de 1 m par 1 m où pour chaque maille, l'altitude du sol est renseignée en mètre NGF. Afin d'optimiser le ratio « représentation des phénomènes de ruissellement / temps de modélisation », ce MNT 1 m a été agrégé à une résolution de 5m. Cette résolution constitue la résolution des sorties de la modélisation hydrologique.

Ce modèle numérique de terrain présente toutefois des artefacts (cuvettes et pics) susceptibles de bloquer l'écoulement des eaux lors de l'étape de modélisation. Un travail de correction des altitudes est donc réalisé sur ce MNT « brut » afin de garantir un gradient de pente continu depuis la ligne de partage des eaux jusqu'à l'exutoire du bassin versant et ainsi un écoulement continu du ruissellement. Toutefois, ce traitement n'est pas suffisant pour reproduire fidèlement l'écoulement des eaux selon les axes de ruissellement naturels.

### 2.2. LE RÉSEAU D'AXE DE RUISSELLEMENT

Un travail conséquent de vérification et de digitalisation a été mené pour décrire finement le réseau d'axe de ruissellement, avec pour support cartographique :

- le réseau d'axe de ruissellement existant issus d'études antérieures ;
- les cours d'eau permanent et intermittent de la BD TOPO de l'IGN ;
- le réseau d'axe de ruissellement brut calculé à partir du MNT ;
- les orthophotographies de la BD ORTHO.

Initialement, le linéaire de cours d'eau cartographié dans la BD TOPO s'élève à 37.1 km. À l'issue du travail de digitalisation, le linéaire total de réseau d'axe de ruissellement s'élève à 252.9 km. La cartographie du réseau d'axe de ruissellement est présentée sur la Figure 3.

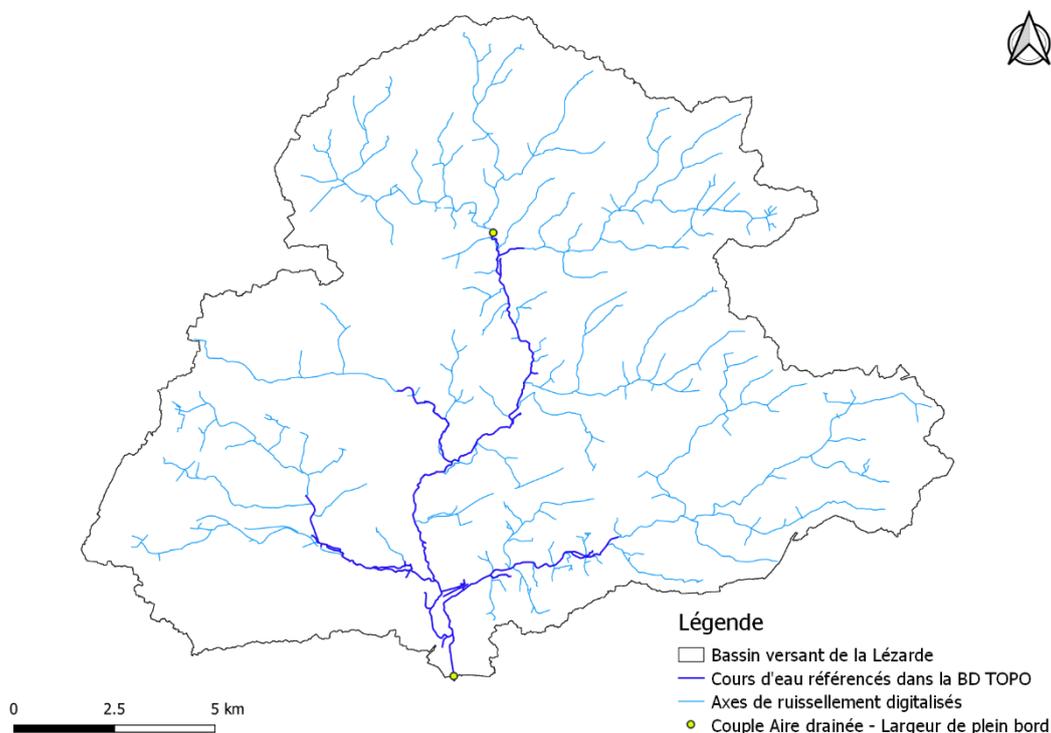


Figure 3 : Cartographie finale des axes de ruissellement digitalisés.

Pour les besoins de la modélisation, il est nécessaire de définir une largeur de plein bord par tronçon d'axe de ruissellement (nécessaire au calcul des vitesses dans le modèle WaterSed). Sur les axes de ruissellement cartographiés comme cours d'eau dans la BD TOPO, une relation empirique a été appliquée pour convertir l'aire drainée de chaque tronçon en largeur de plein bord.

Cette relation a été construite à partir de deux couples aire drainée – largeur de plein bord, le premier situé le plus à l'aval du bassin et le second le plus à l'amont (Tableau 1). La largeur de plein bord a été calculé par mesure de la largeur sur les orthophotographies.

Point	Aire drainée (km <sup>2</sup> )	Largeur de plein bord (m)
1 (amont)	62.2	2
2 (aval)	209.6	32

$$\text{Largeur de plein bord (m)} = 0.203 \times \text{Aire drainée (m}^2) - 10.674$$

Tableau 1 : Aire drainée et largeur de plein bord des deux points utilisés pour construire la relation empirique aire drainée – largeur de plein bord.

Pour les premières ramifications du réseau d'axe de ruissellement (Hors BD TOPO), une largeur par défaut de 1.5 m a été imposée (largeur approximative d'un fossé).

### 2.3. LES AMÉNAGEMENTS EXISTANTS

Les ouvrages de gestion des eaux de ruissellement sur le bassin sont très nombreux, avec 222 ouvrages recensés dans la BD CASTOR<sup>3</sup> et 223 ouvrages dans la base de données de la CODAH<sup>4</sup>. Lors de l'étape de digitalisation du réseau d'axe de ruissellement, un travail parallèle a été mené pour :

- vérifier les coordonnées géographiques de chaque ouvrage par photo-interprétation ;
- vérifier la capacité de l'ouvrage ;
- vérifier la présence d'éventuels doublons dans chaque base de données et entre les bases de données ;
- référencer les ouvrages non-répertoriés.

La cartographie des axes de ruissellement a été contrainte de façon à garantir une interconnexion de tous les ouvrages (Figure 4). Pour les ouvrages non référencés, leur capacité a été estimée en multipliant leur emprise au sol par une hauteur moyenne de 1.5 m.

À l'issue de ce travail, le nombre d'ouvrages inventoriés (principalement des barrages en travers de talwegs secs, des bassins de rétention, et quelques mares tampon), s'élèvent à 247 pour une capacité de stockage totale de 1 477 000 m<sup>3</sup>. La cartographie de ces ouvrages est présentée sur la Figure 5.

Les aménagements d'hydraulique douce existants sont également intégrés. En procédant de la même manière que pour les ouvrages, ce sont au final 57 fascines, 46 haies et 1 aménagement de bétouille qui ont été intégrés.

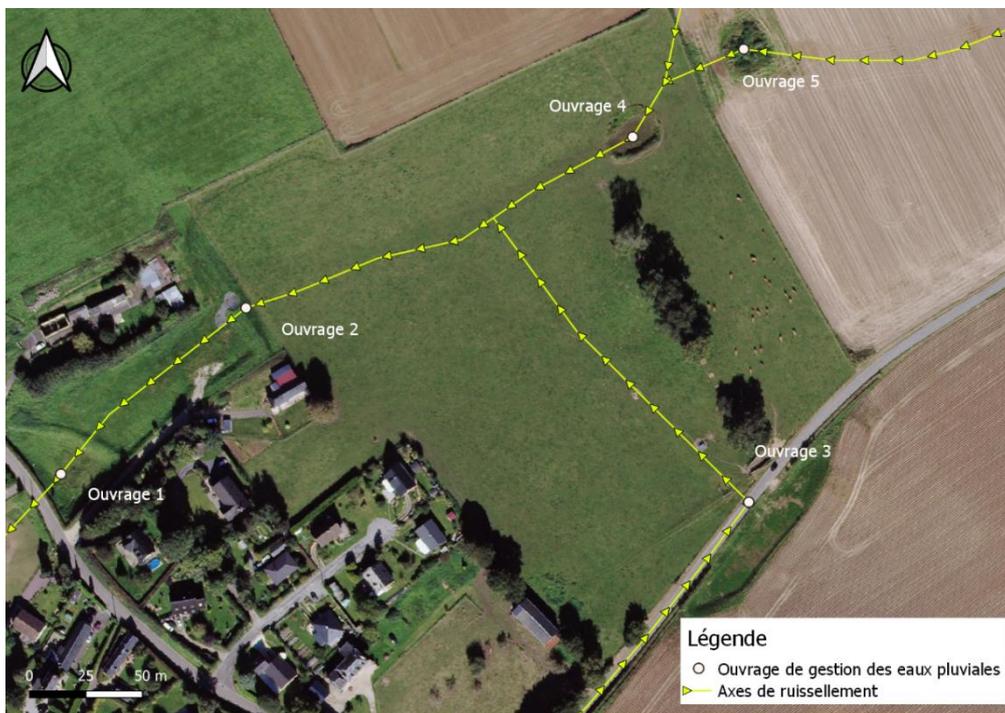


Figure 4 : Exemple d'interconnexion entre les ouvrages recensés (points blancs numérotés de 1 à 5) et le réseau d'axe de ruissellement (trait jaune).

<sup>3</sup> BD CASTOR : <http://bdcastor.fr/>

<sup>4</sup> CODAH : Communauté de l'Agglomération Havraise (Le Havre Seine Métropole)

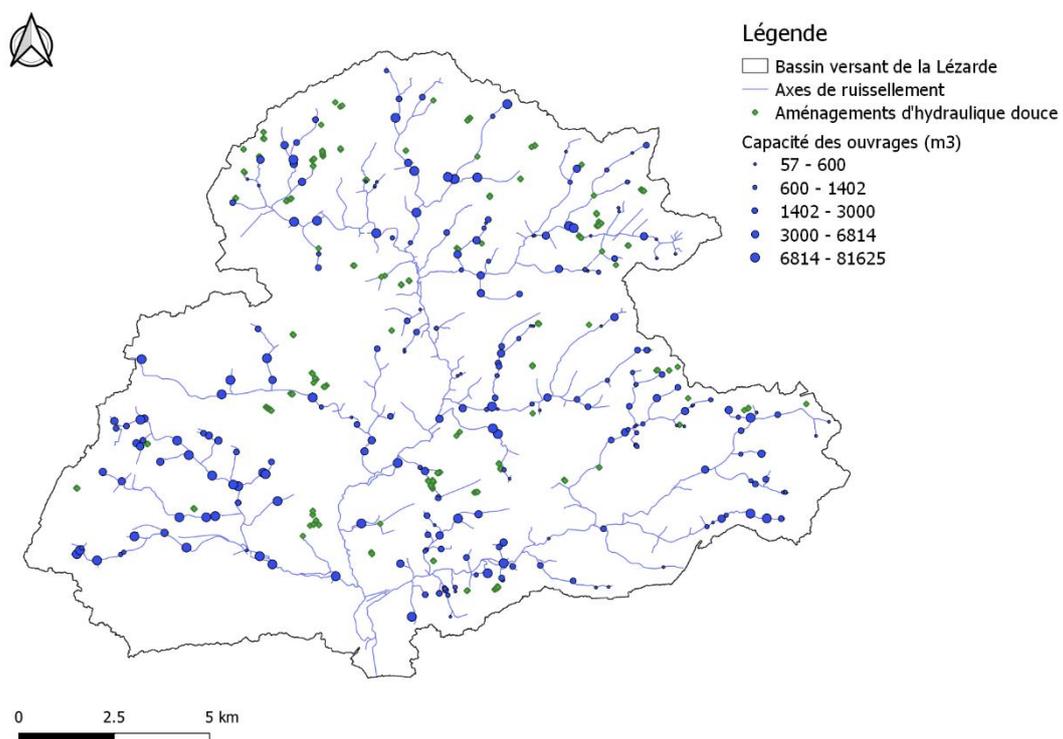


Figure 5 : Cartographie des ouvrages de gestion des eaux de ruissellement intégrés au modèle hydraulique.

### 3. Construction du modèle WaterSed

#### 3.1. L'OCCUPATION DES SOLS

Une cartographie de l'occupation des sols 2016 a été construite pour les besoins de l'étude, basée sur la cartographie de l'Observatoire des Sols à l'échelle Communale (OSCOM) de 2016 et le Registre Parcellaire Graphique (RPG) de 2016.

La **cartographie de l'occupation des sols de l'OSCOM** constitue une cartographie composite provenant de couches de même millésime (hormis la couche des forêts qui date de 2000). Elle est fabriquée à partir du découpage communal de la BD-TOPO® de l'IGN. L'occupation du sol est définie pour chaque commune par intégration successive de couches graphiques de référence selon l'ordre suivant :

1. BD-TOPO® de l'IGN© ;
2. BD-FORET® V1 de l'IGN© ;
3. RPG (Registre Parcellaire Graphique) de l'ASP (Agence de Services et de Paiement) ;
4. Parcellaire Majic (fichiers fonciers) de la DGFIP (Direction générale des Finances publiques).

À l'issue du processus d'intégration, les espaces demeurant vierges sont comblés par l'occupation du sol attenante prépondérante. Sur le bassin de la Lézarde, la nomenclature de la cartographie de l'occupation des sols se décline en 13 classes. Toutefois, cette nomenclature n'apporte pas d'information sur la saisonnalité des cultures (culture d'hiver ou de printemps) et la fusion des classes cultures en deux classes « Terres arables » et « Terres agricoles mixtes » provoque la perte du parcellaire agricole.

Cette cartographie est donc complétée par le **Registre Parcellaire Graphique**. Il s'agit d'une base de données géographiques servant de référence à l'instruction des aides de la Politique Agricole Commune (PAC). La version anonyme utilisée dans cette étude contient l'emprise des îlots de culture au 1/5 000 ainsi que le type de culture majoritaire pratiquée suivant une nomenclature en 328 classes, avec un détail sur la saisonnalité des cultures. Ces données sont produites par l'agence de services et de paiement (ASP) depuis 2007. Le principe général de fusion des deux cartographies est présentée sur la Figure 6.

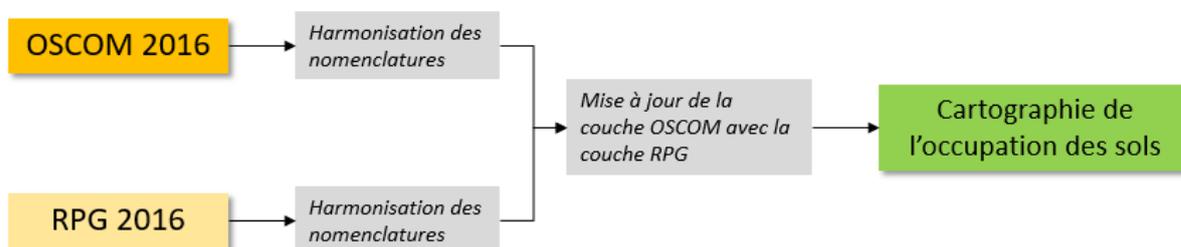


Figure 6 : Étapes de construction de la cartographie de l'occupation des sols à partir des cartographies OSCOM et RPG.

Dans un premier temps, une nomenclature « cible » est définie et correspond à la nomenclature de la cartographie de l'occupation des sols obtenue après fusion de la cartographie OSCOM et RPG (Tableau 2).

CODE_LU	LIBELLE_LU
1	Cultures d'hiver
2	Cultures de printemps précoces
3	Cultures de printemps tardives
4	Prairies
5	Autres cultures
6	Autres terres agricoles
7	Espaces mixtes
8	Espaces urbanisés
9	Espaces industriels ou commerciaux et réseaux de communication
10	Mines, décharges, chantiers
11	Espaces verts artificialisés non agricoles
12	Espaces verts non bâti en attente de requalification
13	Forêts
14	Eaux continentales

Tableau 2 : Nomenclature de la cartographie finale de l'occupation des sols 2016.

Dans un second temps, la nomenclature OSCOM 2016 est transformée suivant cette nomenclature cible à partir d'une table de conversion (Tableau 3).

CODE_OSCOM	LIBELLE_OSCOM	CODE_LU
00	Espaces mixtes	7
11	Espaces urbanisés	8
12	Espaces industriels ou commerciaux et réseaux de communication	9
13	Mines, décharges, chantiers	10
14	Espaces verts artificialisés non agricoles	11
15	Espaces verts non bâti en attente de requalification	12
20	Terres agricoles mixtes	1
21	Terres arables	1
22	Cultures permanentes	5
23	Prairies	4
24	Autres terres agricoles	6
31	Forêts	13
32	Milieux à végétation arbustive	13
51	Eaux continentales	14

Tableau 3 : Table de conversion de la nomenclature OSCOM.

Dans un troisième temps, la nomenclature RPG 2016 est transformée suivant la nomenclature cible à partir d'une table de conversion (Tableau 4). Une attention toute particulière a été portée pour rattacher chaque classe de culture du RPG à chacune des 3 classes de la nomenclature cible, définies suivant la période de semi :

- CODE\_LU 1 : cultures d'hiver ; semi entre octobre et novembre ;
- CODE\_LU 2 : cultures de printemps précoce ; semi entre février et mars ;
- CODE\_LU 3 : cultures de printemps tardive ; semi entre avril et mai.

Lorsque le rattachement n'est pas possible, les classes de culture se répartissent à dire d'expert suivant les classes « Prairies », « Autres cultures » et « Autres terres agricoles ».

CODE_RPG	LIBELLE_RPG	CODE_LU
ART	Artichaut	5
CPA	Autre céréale de printemps de genre Avena	2
FAG	Autre fourrage annuel d'un autre genre	2
FLA	Autre légume ou fruit annuel	5
FLP	Autre légume ou fruit pérenne	5
LUZ	Autre luzerne	1
PPA	Autre plante à parfum, aromatique et médicinale annuelle	5
PPP	Autre plante à parfum, aromatique et médicinale pérenne	5
PFP	Autre pois fourrager de printemps	3
PTR	Autre prairie temporaire de 5 ans ou moins	4
AVP	Avoine de printemps	2
BFS	Bande admissible le long d'une forêt sans production	4
BTA	Bande tampon	4
BVF	Betterave fourragère	3
BTN	Betterave non fourragère / Bette	3
BDH	Blé dur d'hiver	1
BTH	Blé tendre d'hiver	1
BTP	Blé tendre de printemps	2
BOP	Bois pâturé	6
BOR	Bordure de champ	6
CAR	Carotte	5
CEL	Céleri	5
CES	Chicorée / Endive / Scarole	5
CHU	Chou	5
CZH	Colza d'hiver	1
CCT	Courgette / Citrouille	5
CRS	Cresson	5
CSS	Culture sous serre hors sol	5
EPE	Épeautre	1
FF6	Féverole fourragère implantée pour la récolte 2016	2
FVL	Féverole semée avant le 31/05	2
CPL	Fourrage composé de céréales et/ou de protéagineux	1
FRA	Fraise	5
HAR	Haricot / Flageolet	5
J5M	Jachère de 5 ans ou moins	6
J6P	Jachère de 6 ans ou plus	6
J6S	Jachère de 6 ans ou plus déclarée comme Surface d'intérêt écologique	6
LBF	Laitue / Batavia / Feuille de chêne	5
LIF	Lin fibres	2

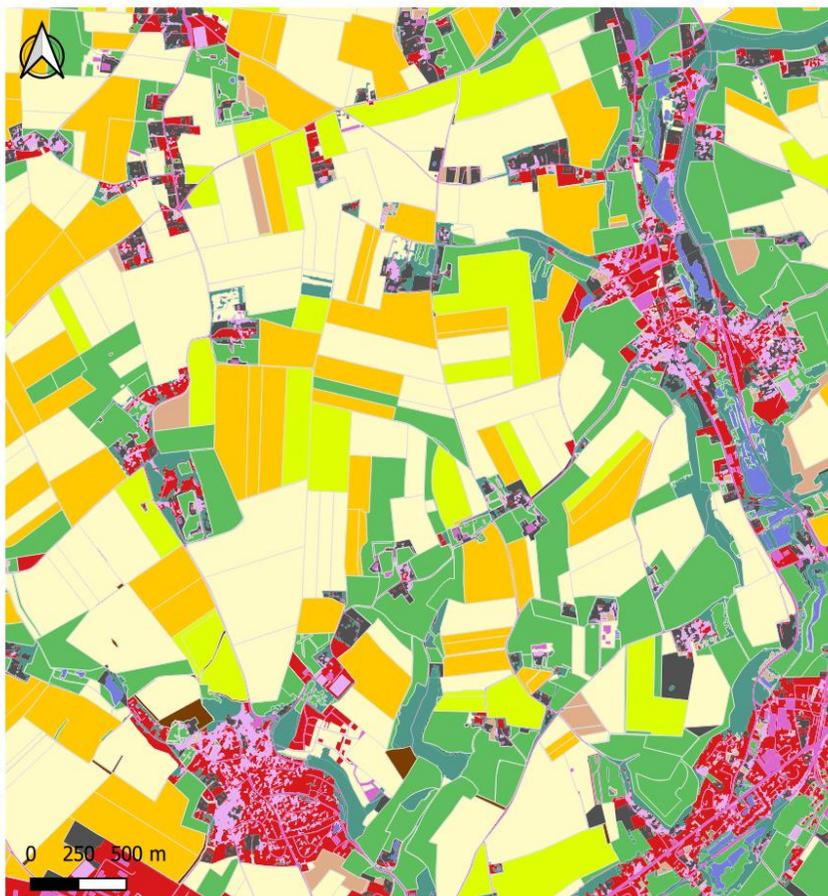
CODE_RPG	LIBELLE_RPG	CODE_LU
LU5	Luzerne implantée pour la récolte 2015	1
LU6	Luzerne implantée pour la récolte 2016	1
MIS	Maïs	3
MID	Maïs doux	3
MIE	Maïs ensilage	3
MCR	Mélange de céréales	1
ML6	Mélange de légumineuses fourragères	1
MH5	Mélange de légumineuses fourragères	1
MH6	Mélange de légumineuses fourragères	1
MC6	Mélange de légumineuses fourragères	1
MLG	Mélange de légumineuses prépondérantes	1
MPC	Mélange de protéagineux et de céréales	1
MTH	Menthe	5
MCT	Miscanthus	6
OIG	Oignon / Échalote	5
ORP	Orge de printemps	2
ORH	Orge d'hiver	1
PEP	Pépinière	5
PSL	Persil	5
PFR	Petit fruit rouge	5
POR	Poireau	5
PHI	Pois d'hiver	1
PPR	Pois de printemps semé avant le 31/05	2
PP6	Pois fourrager de printemps implanté pour la récolte 2016	1
PTC	Pomme de terre de consommation	3
POT	Potiron / Potimarron	5
PRL	Prairie en rotation longue (6 ans ou plus)	4
PPH	Prairie permanente - herbe prédominante	4
RDI	Radis	5
RGA	Ray-grass de 5 ans ou moins	4
SA6	Sainfoin implanté pour la récolte 2016	1
SGH	Seigle d'hiver	1
SNE	Surface agricole temporairement non exploitée	6
SBO	Surface boisée sur une ancienne terre agricole	6
TCR	Taillis à courte rotation	6
TOM	Tomate	5
TOP	Topinambour	5
TRN	Tournesol	3
TR5	Trèfle implanté pour la récolte 2015	1
TR6	Trèfle implanté pour la récolte 2016	1
TTH	Triticale d'hiver	1
VRG	Verger	6

Tableau 4 : Table de conversion de la nomenclature RPG.

Occupation des sols OSCOM 2016



Occupation des sols 2016 OSCOM + RPG



- Légende**
- Espaces mixtes
  - Espaces urbanisés
  - Espaces industriels ou commerciaux
  - Mines, décharges, chantiers
  - Espaces verts artificialisés non agricoles
  - Espaces verts non bâti en attente de requalification
  - Terres agricoles mixtes
  - Terres arables
  - Cultures permanentes
  - Prairies
  - Autres terres agricoles
  - Forêts
  - Eaux continentales
  -

- Légende**
- Cultures d'hiver
  - Cultures de printemps précoces
  - Cultures de printemps tardives
  - Prairies
  - Autres cultures
  - Autres terres agricoles
  - Espaces mixtes
  - Espaces urbanisés
  - Espaces industriels et réseaux
  - Mines, décharges, chantiers
  - Espaces verts artificialisés non agricoles
  - Espaces verts non bâti
  - Forêts
  - Eaux continentales

Figure 7 : (Gauche) Cartographie de l'occupation des sols OSCOM 2016 ; (Droite) Cartographie de l'occupation des sols 2016 OSCOM + RPG.

Passées ces étapes, une intersection géométrique est réalisée entre les deux cartographies, accompagné d'un transfert des attributs de chaque couche. Après traitement, la cartographie de l'occupation des sols 2016 est construite suivant une nomenclature en 13 classes, détaillant la saisonnalité des cultures et le parcellaire agricole. Le gain au niveau des terres agricoles est particulièrement visible en comparant la cartographie OSCOM avec la cartographie finale (Figure 7). Dans la suite de ce rapport, la cartographie produite est considérée comme la cartographie de la situation « actuelle », valable pour les années 2016 à 2018.

La proportion de chaque classe d'occupation des sols par rapport à la superficie du bassin de la Lézarde est présentée sur la Figure 8.

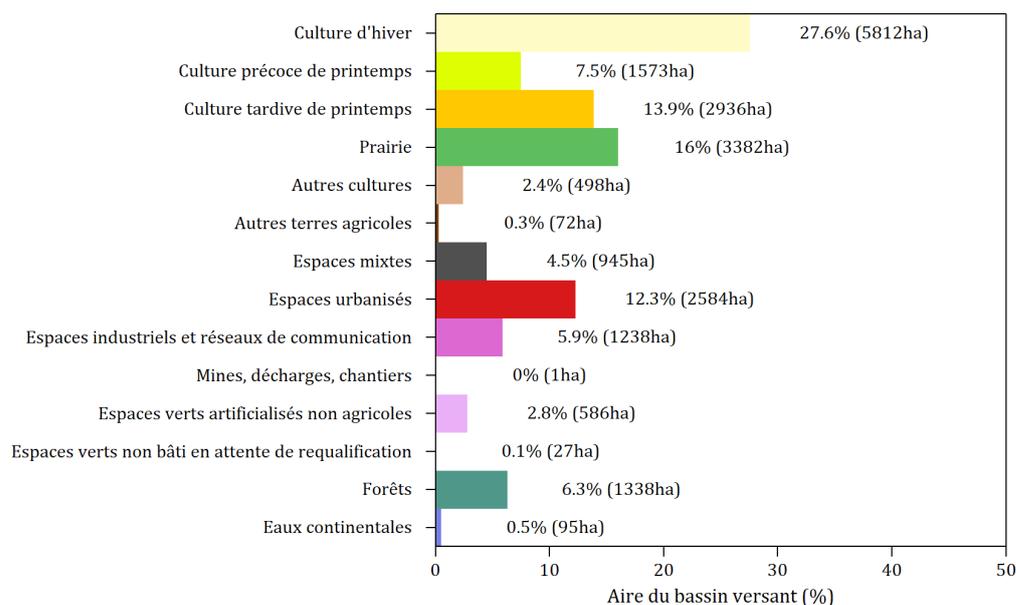


Figure 8 : Statistiques de l'occupation des sols 2016 sur le bassin de la Lézarde.

### 3.2. LES SOLS

La cartographie des sols a été obtenue auprès du Référentiel Pédologique Régional de Haute-Normandie (RRP HN). Cette cartographie représente les Unités Cartographiques de Sol (UCS), ou pédopaysages de l'ex-région Haute-Normandie à une échelle 1/250 000. Les UCS sont constituées de types de sol distribués dans l'espace de manière organisée, selon des facteurs homogènes de pédogénèse (topographie, climat, lithologie et parfois occupation du sol). Les Unités Typologiques de Sol (UTS) correspondent à une portion de cette couverture pédologique représentée par les UCS et chaque UCS peut être constitué d'une ou plusieurs UTS.

Partant de cette cartographie, la texture dominante de chaque UCS a été extraite. Trois classes de texture de sol sont rencontrées sur le bassin de la Lézarde : limoneuse (LM), limono-sableuse (LMS) et limono-sablo-argileuse (LSA) (Figure 9).

- Limoneuse (LM) à limono-sableuse (LS) : sols profonds majoritairement lessivés, localisés en fond de talweg, issus de colluvions de loess, des plateaux du Caux Maritime ;
- Limono-sableuse (LS) à sablo-limoneux (SL) : sols issus de limons grossiers, sur Argiles à silex, localisés à l'ouest du bassin de la Lézarde ;

- Limono sablo-argileuse (LSA) : sols profonds, majoritairement lessivés, parfois tronqués, rarement hydromorphes, issus de loëss, parfois d'Argiles à silex, des plateaux de la Pointe de Caux, localisés à l'est du bassin de la Lézarde.

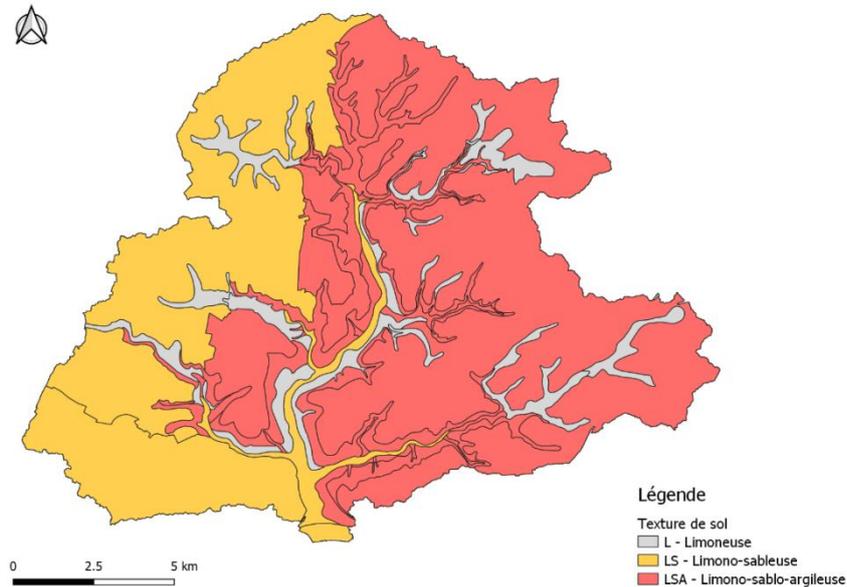


Figure 9 : Cartographie simplifiée des textures de sol sur le bassin de la Lézarde, construite à partir du Référentiel Régional Pédologique de Haute-Normandie.

Associé à l'occupation du sol et à l'historique climatique, l'extraction des textures a pour objectif de déduire les caractéristiques hydrodynamiques et sédimentaires de la surface du sol selon des règles de pédo-transfert et des tables de règles expertes (Figure 10). Ainsi, l'érodibilité des sols à texture limoneuse et limono-sableuse peut être considérée comme forte et l'érodibilité des sols à texture limono-sablo-argileuse comme moyenne. Ce niveau d'érodibilité est par la suite pris en compte dans la paramétrisation du modèle.

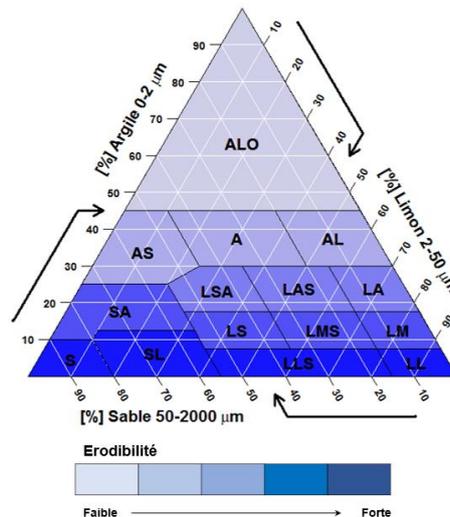


Figure 10 : Triangle des textures et niveau d'érodibilité de chacune des classes.

### 3.3. PARAMÉTRISATION DU MODÈLE

La paramétrisation du modèle WaterSed est l'étape clef qui consiste à affecter à chaque couple « sol - occupation des sols » des propriétés hydrodynamiques (capacité d'infiltration, profondeur du sol, etc.) et érosives (érodibilité, etc.) utilisables par le modèle WaterSed (Figure 11).

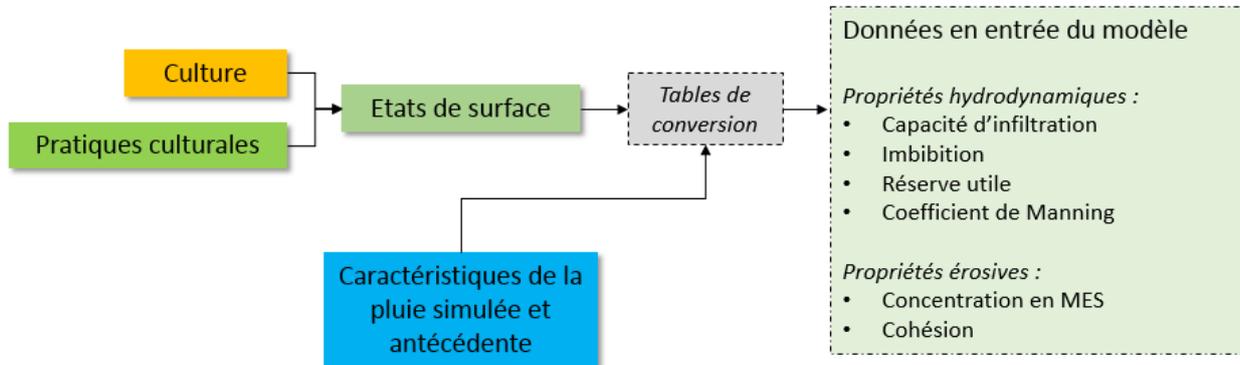


Figure 11 : Principe général de paramétrisation du modèle WaterSed.

#### 3.3.1. Principe

Pour une grande partie des sols cultivés à texture limoneuse, limono-argileuse ou limono-sableuse, l'érosion hydrique des sols résulte du ruissellement lié à la diminution de l'infiltrabilité consécutive à la dégradation structurale superficielle sous l'action de la pluie. Cette dégradation est à l'origine de la formation de croûtes (structurale, sédimentaires) et l'érodibilité est donc directement fonction de la stabilité structurale du sol. Cette stabilité structurale dépend des caractéristiques intrinsèques du sol : texture, teneur en matières organiques, minéralisation des argiles, les cations, les oxydes de Fe et Al, le CaCO<sub>3</sub>. Par ailleurs, la rugosité induite par le travail du sol et la croissance des plantes au cours du cycle cultural complexifie encore ces processus de dégradation.

La conséquence est une évolution au cours du cycle cultural, depuis le semis jusqu'à la récolte, des propriétés hydrodynamiques et érosives de chaque type de culture. Devant un tel niveau de complexité, une approche empirique a été menée par l'INRA pour discriminer les facteurs dominants sur l'intensité des processus d'érosion et de ruissellement (Cerdan *et al.*, 2002; Le Bissonnais *et al.*, 2005, 1998).

À partir de très nombreuses observations réalisées sur les sols cultivés du Nord de la France, trois facteurs majeurs furent identifiés : le couvert végétal, le faciès sédimentaire (état de dégradation structural) et la rugosité (travail du sol). Ils caractérisent l'état de surface du sol à un temps donné (Figure 12).

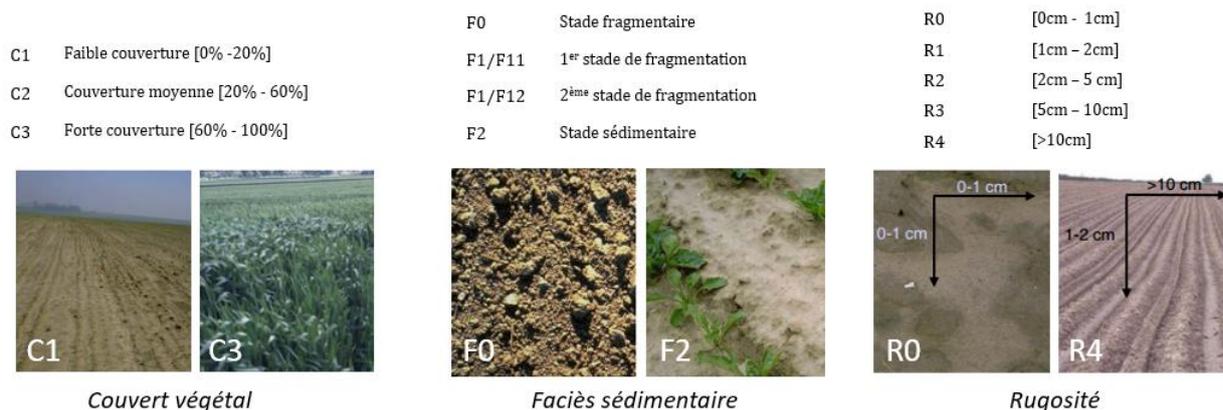


Figure 12 : Méthode d'évaluation de l'état de surface du sol selon la couvert végétal, le faciès sédimentaire et la rugosité du sol.

Des règles de décisions furent élaborées pour déduire, à partir des états de surfaces des sols, les propriétés physiques des sols (aptitude au ruissellement, capacité d'infiltration, concentration potentielle en matières en suspension dans les eaux de ruissellement, ou encore l'érodibilité des sols pour un ruissellement donné).

### 3.3.2. Données génériques en entrée du modèle

- À l'issue de l'étape de paramétrisation, les propriétés hydrodynamiques et érosives de chaque couple « occupation des sols / sol » sont décrites suivant cinq couches raster :
- capacité d'infiltration (mm/h) : infiltration de l'eau au sein de la porosité du sol ;
- réserve utile (mm) : hauteur d'eau maximum équivalente que le sol peut contenir et restituer aux racines pour la vie végétale ;
- coefficient de Manning ( $m^{-1/3}$  s) : rugosité à la surface du sol conditionnant avec la pente la vitesse de l'eau et le détachement à la surface du sol sous l'action de la pluie ;
- érodibilité (-) : coefficient adimensionnel variant entre 0 et 1 et décrivant la sensibilité du sol à l'arrachement en cas de ruissellement concentré ;
- concentration en MES (g/l) : concentration en MES dans les eaux de ruissellement suite à l'érosion des sols par « effet splash ».

Ces cinq couches raster sont créés pour chaque mois de l'année. À cela viennent s'ajouter trois couches raster climatiques décrites dans les points suivants, variant en fonction des caractéristiques de l'évènement de pluie modélisé.

Deux couches raster sont communes quel que soit l'évènement de pluie modélisé :

- le Modèle Numérique de Terrain (m NGF) : altimétrie discrétisée en maille de 5m et corrigée hydrologiquement (« brulage » du MNT à partir du réseau de circulation du ruissellement décrit sur le terrain) ;
- la largeur de plein bord des axes de ruissellement (m).

### 3.3.3. Application au cas d'étude

Ce travail de paramétrisation a été adapté au contexte de l'étude. Un calendrier des états de surface des sols a été établi pour chaque type de culture et pour chaque type de texture et spécifie l'état de surface du sol pour chaque mois de l'année (Tableau 5).

Pour les cultures d'hiver sur sol à texture limoneuse, l'évolution des états de surface depuis le semi (en octobre) se caractérise par une croissance végétale jusqu'en juillet, mois de la récolte (passage progressif d'un couvert végétal C1 à C3). Durant cette période de croissance végétale, la dégradation structurale du sol sous l'action de la pluie (F0 vers F2) se traduit par une diminution de la rugosité (R2 vers R0). Le caractère battant (F2) est atteint dès le mois de janvier et perdure jusqu'à la récolte. La stabilité structurale supérieure des sols limono-sablo-argileux se traduit par une diminution moins rapide de la rugosité comparée aux sols limoneux et limono-sableux (R0).

Ainsi, pour chaque pluie modélisée, les états de surface des sols du mois associé sont extraits. Les valeurs de capacité d'infiltration, de coefficient de Manning et d'érodibilité sont déduites à partir de règles de conversion adaptées au contexte de l'étude (Tableau 7, Tableau 8 et Tableau 9). Sur ce principe, l'évolution mensuelle de la capacité d'infiltration est illustrée sur le

**Erreur ! Source du renvoi introuvable..**

Pour les autres classes d'occupation des sols, l'absence de travail du sol induit des propriétés hydrodynamiques et érosives constantes au cours de l'année. Les valeurs des propriétés ont été déterminées à dire d'expert, en se basant sur des travaux réalisés dans des contextes similaires.



Culture	Texture	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre
Hiver	Limoneuse	C1-F0-R2	C1-F1-R1	C1-F12-R0	C1-F2-R0	C1-F2-R0	C2-F2-R0	C2-F2-R0	C3-F2-R0	C3-F12-R0	C3-F2-R0	C1-F0-R2	C1-F1-R1
Précoce de printemps	Limoneuse	C2-F12-R0	C3-F2-R0	C3-F2-R0	C3-F2-R0	C1-F0-R2	C1-F1-R1	C2-F12-R0	C3-F2-R0	C3-F12-R0	C3-F2-R0	C1-F0-R2	C1-F1-R1
Tardive de printemps	Limoneuse	C3-F2-R0	C1-F0-R2	C2-F1-R1	C2-F12-R0	C2-F2-R0	C2-F2-R0	C1-F0-R2	C1-F1-R1	C1-F1-R1	C2-F2-R0	C3-F2-R0	C3-F2-R0
Hiver	Limono-sablo-argileuse	C1-F0-R2	C1-F1-R2	C1-F1-R1	C1-F12-R1	C1-F12-R0	C2-F2-R0	C2-F2-R0	C3-F2-R0	C3-F12-R0	C3-F2-R0	C1-F0-R2	C1-F1-R2
Précoce de printemps	Limono-sablo-argileuse	C2-F1-R1	C3-F12-R1	C3-F12-R0	C3-F2-R0	C1-F0-R2	C1-F1-R2	C2-F1-R1	C3-F12-R1	C3-F12-R1	C3-F12-R0	C1-F0-R2	C1-F1-R2
Tardive de printemps	Limono-sablo-argileuse	C3-F12-R1	C1-F0-R2	C2-F1-R2	C2-F1-R1	C2-F12-R1	C2-F12-R0	C1-F0-R2	C1-F1-R2	C1-F1-R2	C2-F12-R1	C3-F12-R1	C3-F12-R1
Hiver	Limono-sableuse	C1-F0-R2	C1-F1-R1	C1-F12-R0	C1-F2-R0	C1-F2-R0	C2-F2-R0	C2-F2-R0	C3-F2-R0	C3-F12-R0	C3-F2-R0	C1-F0-R2	C1-F1-R1
Précoce de printemps	Limono-sableuse	C2-F12-R0	C3-F2-R0	C3-F2-R0	C3-F2-R0	C1-F0-R2	C1-F1-R1	C2-F12-R0	C3-F2-R0	C3-F12-R0	C3-F2-R0	C1-F0-R2	C1-F1-R1
Tardive de printemps	Limono-sableuse	C3-F2-R0	C1-F0-R2	C2-F1-R1	C2-F12-R0	C2-F2-R0	C2-F2-R0	C1-F0-R2	C1-F1-R1	C1-F1-R1	C2-F2-R0	C3-F2-R0	C3-F2-R0

Tableau 5 : Calendrier cultural spécifiant par type de culture et par type de sol, l'état de surface du sol. Les mois de semi et de récolte sont surlignés par type de culture, en jaune et en vert respectivement.

Culture	Texture	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre
Hiver	Limoneuse	50	10	5	2	2	2	2	5	10	5	50	10
Précoce de printemps	Limoneuse	5	5	5	5	50	10	5	5	10	5	50	10
Tardive de printemps	Limoneuse	5	50	20	5	2	2	50	10	10	2	5	5
Hiver	Limono-sablo-argileuse	50	20	10	5	5	2	2	5	10	5	50	20
Précoce de printemps	Limono-sablo-argileuse	20	10	10	5	50	20	20	10	10	10	50	20
Tardive de printemps	Limono-sablo-argileuse	10	50	20	20	10	5	50	20	20	10	10	10
Hiver	Limono-sableuse	50	10	5	2	2	2	2	5	10	5	50	10
Précoce de printemps	Limono-sableuse	5	5	5	5	50	10	5	5	10	5	50	10
Tardive de printemps	Limono-sableuse	5	50	20	5	2	2	50	10	10	2	5	5

Tableau 6 : Évolution mensuelle de la capacité d'infiltration du sol en fonction du type de culture, de la texture du sol et de l'état de surface des sols.

Rugosité	Couvert	Faciès sédimentaire			
		F0	F1	F12	F2
R0	C1	10	10	5	2
	C2	20	10	5	2
	C3	50	20	10	5
R1	C1	20	10	5	2
	C2	50	20	10	2
	C3	50	20	10	5
R2	C1	50	20	10	5
	C2	50	20	10	5
	C3	50	50	20	10
R3	C1	50	20	10	5
	C2	50	50	20	10
	C3	50	50	50	10
R4	C1	50	20	20	10
	C2	50	50	20	10
	C3	50	50	50	10

Tableau 7 : Table de conversion état de surface du sol – capacité d'infiltration.

Rugosité	Couvert	Coefficient de Manning (-)
R4	C3	0.19
	C2	0.134
	C1	0.078
R3	C3	0.168
	C2	0.112
	C1	0.056
R2	C3	0.159
	C2	0.103
	C1	0.047
R1	C3	0.155
	C2	0.099
	C1	0.043
R0	C3	0.151
	C2	0.095
	C1	0.039

Tableau 8 : Table de conversion état de surface du sol – coefficient de Manning.

Texture	Couvert	Erodibilité
Limoneuse	C1	0.683
	C2	0.217
	C3	0.047
Limono-sablo-argileuse	C1	0.561
	C2	0.099
	C3	0.01
Limono-sableuse	C1	0.804
	C2	0.417
	C3	0.174

Tableau 9 : Table de conversion état de surface du sol – érodibilité.

Tableau MES à rajouter

### 3.3.4. Données additionnelles : les aménagements actuels

La modélisation du ruissellement et de l'érosion des sols pour l'état initial doit tenir compte de l'ensemble des éléments susceptibles de modifier la réponse hydrologique et sédimentaire du bassin versant étudié. Dans le cas présent, des aménagements d'hydrauliques douces et des ouvrages de gestion des eaux pluviales sont présents sur le bassin de la Lézarde : 247 ouvrages et 113 aménagements d'hydraulique douce (Figure 5).

Type	ID	Largeur	Infiltration	Manning	Volume
Fascine	1	0.5	200	1	0
Haie	2	1	400	0.6	0
Mare	4	0	0	0.04	XXX
Mare/Bassin	4	0	0	0.04	XXX
Bassin	4	0	0	0.04	XXX
Barrage	4	0	0	0.04	0
Aménagement de béttoire	1	0.5	200	1	0

Tableau 10 : Caractéristiques de chaque type d'aménagement d'hydraulique douce ; XXX : volume spécifique à chaque ouvrage.

Dans le modèle WaterSed, les aménagements se distinguent par un identifiant allant de 1 à 4 auquel se rattachent des caractéristiques hydrauliques, hydrodynamiques et sédimentaires (Tableau 10). Ces caractéristiques sont issues d'expérimentations réalisées par l'AREAS dans la région (Ouvry *et al.*, 2012b ; Richet *et al.*, 2006).

Ainsi, cinq couches raster sont créées pour caractériser un aménagement :

- identifiant : 1 (fascine), 2 (haie), 3 (bande enherbée) ou 4 (mare, bassin) ;
- largeur (m) : largeur de l'aménagement (hors bassin) ;
- infiltration (mm/h) : capacité d'infiltration ;
- manning (-) : coefficient de Manning ;
- volume (m<sup>3</sup>) : volume de stockage (seulement pour les bassins, digues, etc.).

### 3.3.5. Données additionnelles : les béttoires

Les béttoires sont nombreuses sur le bassin de la Lézarde (608 béttoires recensées d'après l'inventaire régional des béttoires de Haute-Normandie du BRGM, Figure 13) et constituent des points préférentiels d'engouffrement des eaux de ruissellement. Le fonctionnement de ces singularités restent particulièrement complexe à appréhender, en raison de très nombreux facteurs (Fournier, 2006). Pour la modélisation, le parti pris a été de considérer une infiltration illimitée au droit des béttoires.

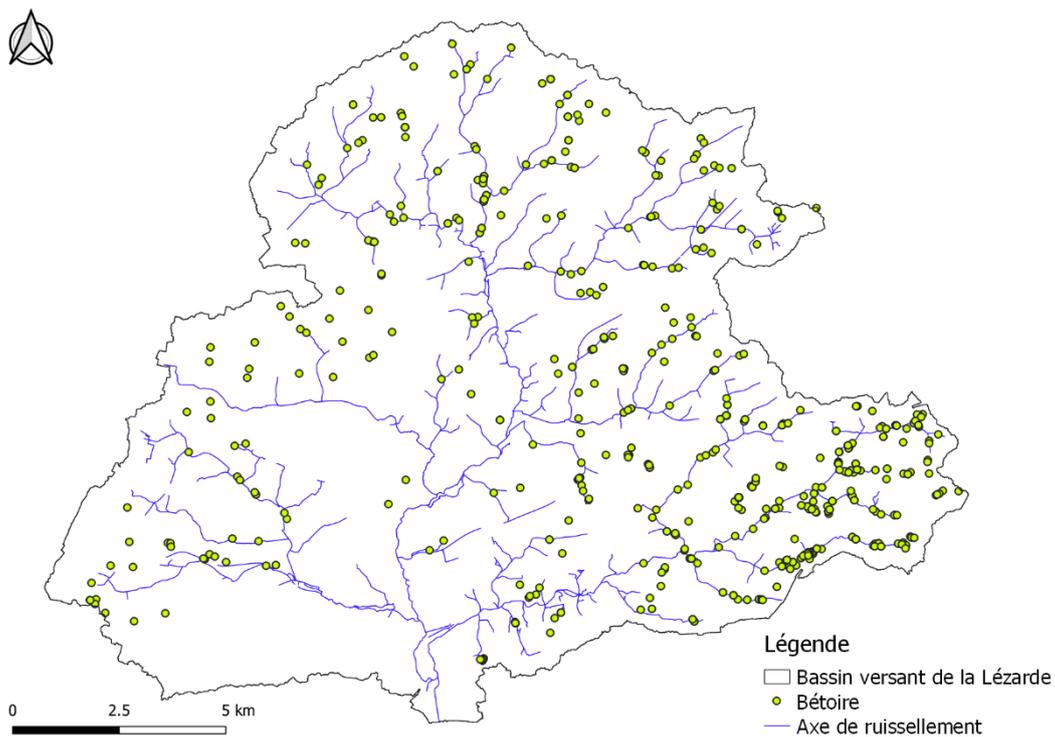


Figure 13 : Cartographie des bétoires sur le bassin de la Lézarde.

## 4. Calibration et validation du modèle

### 4.1. CALIBRATION

#### 4.1.1. Principe

L'étape de calibration consiste à identifier les valeurs des paramètres des modules hydrologique et sédimentaire du modèle WaterSed (Tableau 11).

Paramètre	Description	Valeur
<b>Module « Hydrologie »</b>		
Effet d'échelle (-)	Facteur variant entre 0 et 1 en fonction de la résolution de la modélisation	0,7
Réserve utile maximale (mm)	Valeur maximum de la réserve utile sur le bassin versant	200
Récession (-)	Facteur de forme contrôlant la récession de l'hydrogramme de crue	1,7
<b>Module « Erosion »</b>		
Débit critique (m <sup>3</sup> /s/m)	Valeur seuil enclenchant de l'érosion concentrée	0,005
Coefficient de dépôt sédimentaire (-)	Valeur contrôlant l'intensité des processus de dépôt le long des chemins d'écoulement des eaux	0,0006

Tableau 11 : Valeurs des différents paramètres après calibration du modèle WaterSed.

La calibration est généralement réalisée sur une crue de référence, mesurée au droit d'une station hydrométrique. L'exploitation des mesures de débit permet de caractériser la crue en terme de volume de ruissellement et de débit de pointe. Cette crue est simulée à l'aide du modèle. Différents jeux de paramètres sont testés et seul celui qui minimise l'erreur entre les valeurs observées et mesurées est finalement retenu (Figure 14).

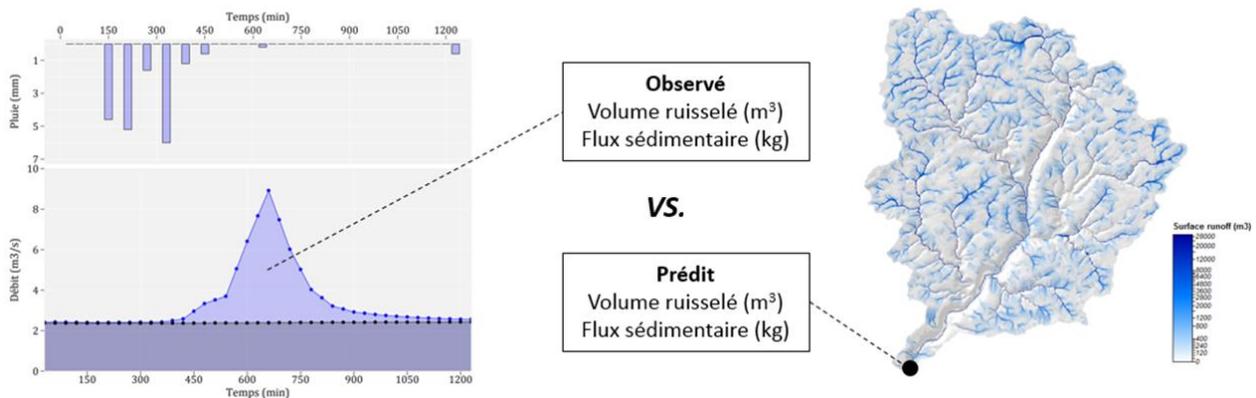


Figure 14 : Méthode de détermination des paramètres du modèle WaterSed par comparaison entre les volumes de ruissellement et les flux sédimentaires mesurés au droit de la station hydro-sédimentaire et ceux prédits par le modèle.

La détermination des valeurs des trois paramètres du module hydrologique est obtenue en comparant les volumes de ruissellement observés à la station hydro-sédimentaire et le volume prédit par le modèle à cet emplacement. Pour les deux paramètres du module « sédimentaire », une comparaison est réalisée entre le flux sédimentaire observé et prédit.

#### 4.1.2. Caractéristiques de la crue de calibration

La première contrainte dans le choix de la crue est la disponibilité des données de débit sur le bassin de la Lézarde. Une seule station hydrométrique est recensée sur la Lézarde, à savoir la station située à Montivilliers, drainant environ la moitié de la superficie du bassin (116 km<sup>2</sup>) (Figure 15).

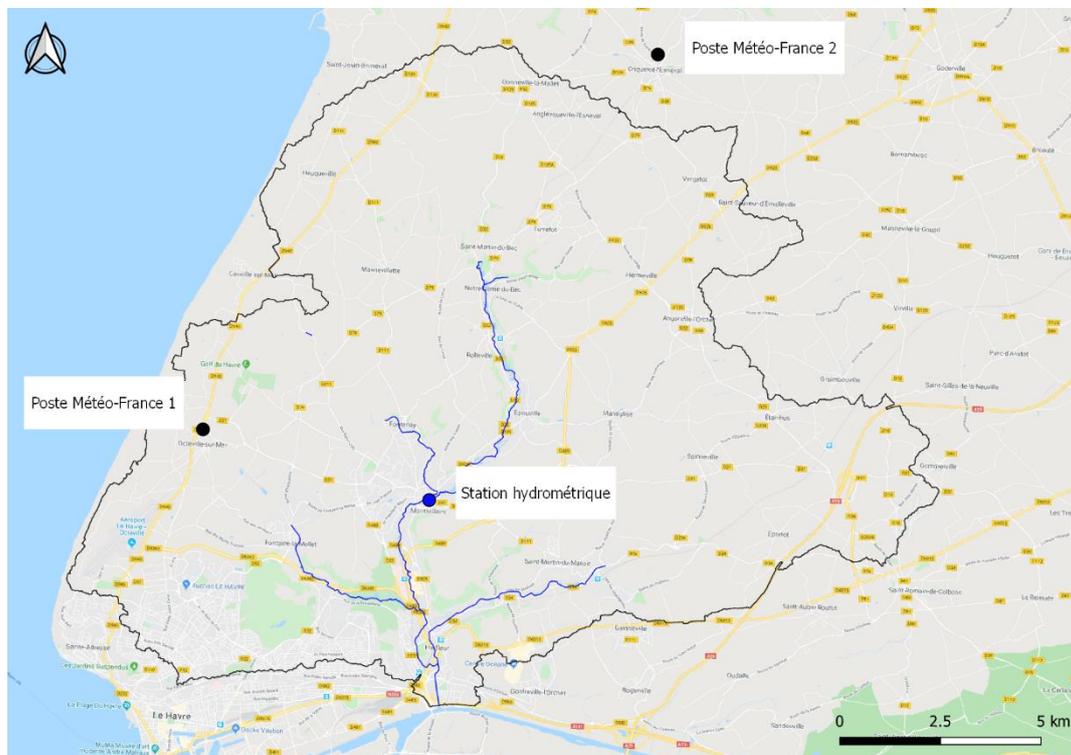


Figure 15 : Localisation de la station hydrométrique de Montivilliers, du poste Météo-France d'Octeville (Poste 1) et du poste Météo-France de Criquetot l'Esneval (Poste 2).

Sur cette station, 17 ans de mesures de débit à pas de temps horaire sont disponibles, offrant potentiellement un vaste choix de crue de référence. Toutefois, la seconde contrainte dans le choix de la crue est le modèle hydraulique. Lors de l'étape de construction, l'ensemble des ouvrages de gestion des eaux pluviales a été intégré au modèle hydraulique. Par conséquent, seule les crues survenues en présence de l'ensemble des ouvrages peuvent être sélectionnées.

Le choix s'est finalement porté sur la crue du 21 au 24 janvier 2018 (Figure 16), provoquée par une pluie de 36 mm tombée sur trois jours entre le 20 et le 22 janvier (moyenne des postes Météo-France de Octeville et de Criquetot l'Esneval).

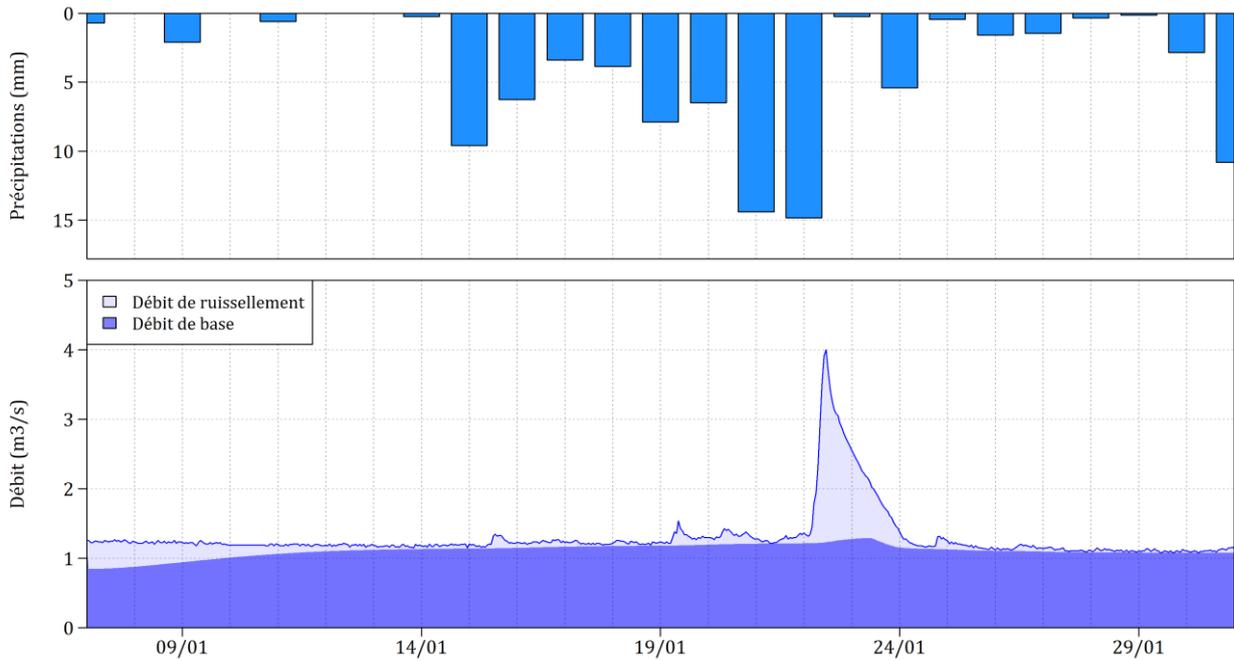


Figure 16 : Hyétogramme et hydrogramme de la crue de janvier 2018 de la Lézarde enregistrée au niveau de la station hydrométrique de Montivilliers.

Cette crue est caractéristique d'une crue d'hiver, intervenant sur un sol saturé suite à un automne particulièrement humide. Il est à noter les valeurs remarquables suivantes, tirées de la station de Octeville :

- 31 mm d'antécédent pluvieux sur 1 semaine ;
- 58.4 mm entre le 1<sup>er</sup> janvier et le 19 janvier 2018 ;
- 138.1 mm pour le mois de novembre 2017 (+53 % par rapport à la normale 1981 – 2010) ;
- 140.1 mm pour le mois de décembre 2017 (+50 % par rapport à la normale 1981 – 2010).

Ces conditions pluviométriques ont déclenché une crue ayant atteint un débit de pointe maximum horaire de 4.0 m<sup>3</sup>/s. Entre le 21 et le 24 janvier, le volume total d'eau ayant transité au droit de la station de Montivilliers s'élève à 552 592 m<sup>3</sup>.

Ce volume total comprend les écoulements de base (souterrains) et les écoulements de surface (ruissellement). Le modèle WaterSed prédit exclusivement le ruissellement généré par une pluie. Par conséquent, le débit de base a été retiré de l'hydrogramme de crue à l'aide d'un filtre de séparation d'hydrogramme (Nathan and McMahon, 1990).

La résultante est un hydrogramme de ruissellement. Cette crue de janvier 2018 se caractérise ainsi par un débit de pointe de 2.77 m<sup>3</sup>/s et un volume de ruissellement de 194 001 m<sup>3</sup>. L'étape de calibration s'est donc focalisée sur une simulation à l'aide du modèle d'un hydrogramme de ruissellement se rapprochant au maximum de ces valeurs.

#### 4.1.3. Données additionnelles pour le modèle

Pour caractériser la pluie ayant engendrée la crue de janvier 2018, deux couches raster sont créées :

- hauteur de pluie (mm) : lame d'eau précipitée ; 36 mm pour cet évènement ;
- durée effective (min) : durée avec une intensité de pluie supérieure à 0 mm/h ; estimée à 197 min pour cet évènement.

L'état hydrique initial du sol est un paramètre important dans le partage ruissellement / infiltration pour une pluie donnée. Dans le modèle, cet état est calculé suivant une table de conversion, en croisant la couche raster « capacité d'infiltration » et l'antécédent pluvieux sur les dernières 48 h (Tableau 12). La couche raster en sortie est nommée :

- imbibition (mm) : perte initiale correspondant à l'humectation du sol et à l'interception de la pluie par la végétation ; dépendant de l'antécédent pluvieux ; pour cet évènement, l'antécédent a été considéré comme > 40 mm au vu des excédents pluviométriques du mois de janvier et des mois précédent.

Capacité d'infiltration (mm/h)	Antécédent pluvieux à 48h (mm)			
	0	1-15	16-40	>40
70	22	17	14	10
60	21	16	13	9
50	20	15	12	8
40	19	14	11	7
30	17	13	10	6
20	15	12	8	5
15	14	10	7	4
10	12	8	5	3
5	8	5	3	1
2	5	2	1	0
1	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Tableau 12 : Table de détermination des pertes initiales (imbibition) au début d'un évènement pluvieux par croisement de la capacité d'infiltration mensuelle et de la hauteur de pluie antécédente à 48 h.

Les autres couches raster (capacité d'infiltration, etc.) utilisées pour simuler cette crue sont celles du mois de janvier.

#### 4.1.4. Résultats

Le modèle a pu être calé sur cette crue (Figure 17). Les paramètres hydrologiques issus de calage sont détaillés dans le Tableau 11. Les performances de calage sont présentées dans le Tableau 13. L'hydrogramme observé et l'hydrogramme prédit sont indiqués sur la Figure 17.

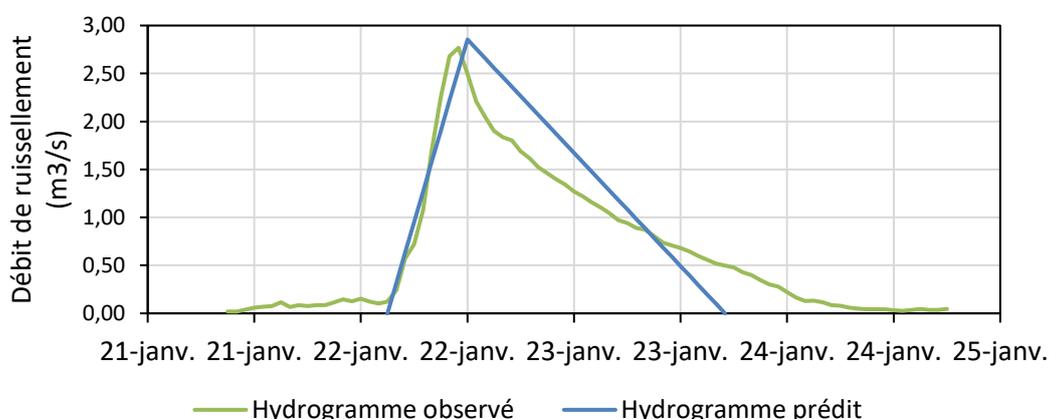


Figure 17 : Hydrogramme de ruissellement observé et prédit à Montivilliers, à l'issue de l'étape de calibration du modèle WaterSed sur la crue de janvier 2018.

Les erreurs entre observé et prédit sont faibles, avec 0,9 % pour le volume de ruissellement et 3,1 % pour le débit de pointe de ruissellement. Dans le point suivant, la validité des paramètres calés est testée en simulant à l'aveugle la crue de juin 2003.

En l'absence de chroniques de concentration en MES, il n'a pas été possible de caler les paramètres sédimentaires du modèle selon cette méthode. Le calage a été réalisé à dire d'expert, connaissant les valeurs de taux d'érosion spécifique généralement observés pour des bassins versants de taille similaire de l'ouest du Bassin de Paris (Cerdan *et al.*, 2004; Delmas *et al.*, 2012; Landemaine, 2016). Ainsi, la valeur de référence retenue est 0,05 t/ha. Les paramètres sédimentaires ont été ajustés de façon à approcher cette valeur. Au final, le taux d'érosion spécifique de la crue de janvier 2018 est 0,051 t/ha, ce qui correspond à un flux sédimentaire de 590 t.

## 4.2. VALIDATION

### 4.2.1. Caractéristiques de la crue de validation

L'orage du 1<sup>er</sup> juin 2003 constitue un évènement de référence rare, de période de retour estimée à 100 ans. Cet évènement a été retenu pour la validation dans la mesure où il est utilisé comme évènement de référence dans l'étude de DHI, complémentaire à cette étude. Cet orage s'est déroulé en deux épisodes successifs :

- un premier épisode de 52 mm d'une durée de cinq heures entre 5:00 et 9:00 ;
- un second épisode de 35 mm d'une durée d'une heure à 15:00.

Cette pluie a généré une crue dont les caractéristiques enregistrées à Montivilliers sont les suivantes : un débit de pointe maximal horaire de 12,1 m<sup>3</sup>/s et un volume total de 1 162 080 m<sup>3</sup>. Cette crue a démarré le 1<sup>er</sup> juin à 5:00 et la décrue s'est terminée autour du 4 juin à 0:00 (Figure 18). Après séparation de l'hydrogramme, le débit de pointe de ruissellement est estimé à 11,0 m<sup>3</sup>/s pour un volume de ruissellement total de 831 591 m<sup>3</sup>.

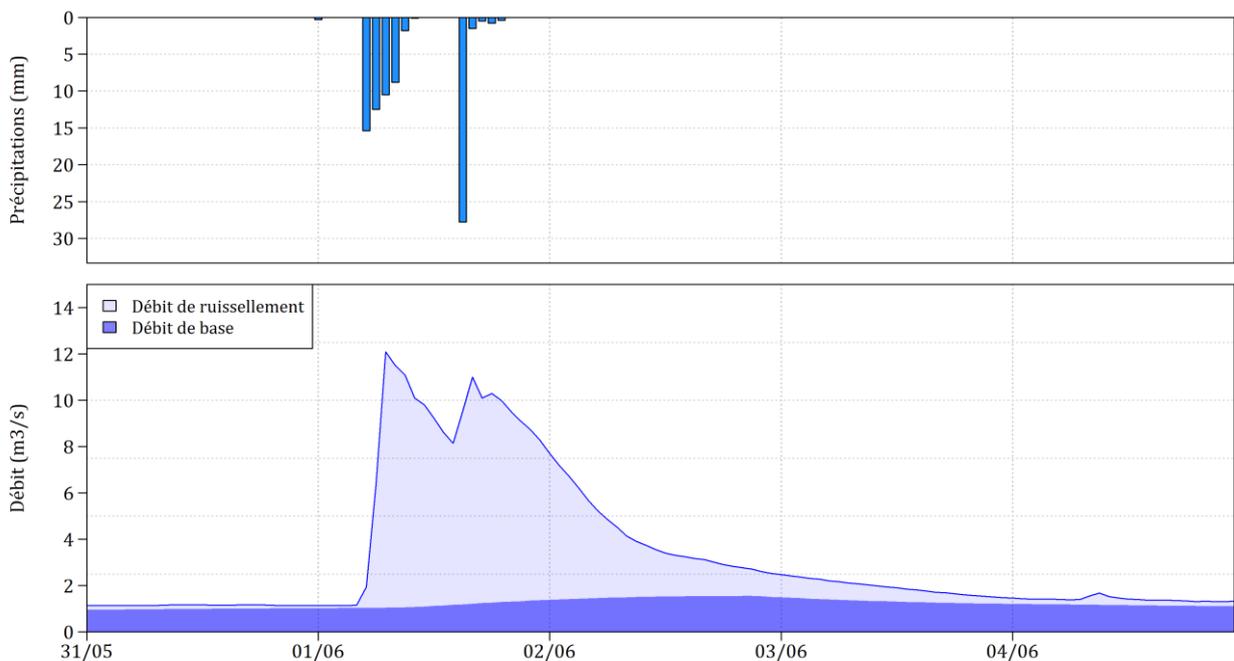


Figure 18 : Hyétogramme et hydrogramme de la crue de juin 2003 de la Lézarde enregistrée au niveau de la station hydrométrique de Montivilliers.

Tout comme la calibration, des données spécifiques ont été rentrées dans le modèle pour caractériser cet épisode pluvieux :

- hauteur de pluie (mm) : 87 ;
- durée effective (min) : 300 min ;
- antécédent pluvieux : 0 mm ; orage intervenant sur un sol sec.

Les autres couches raster (capacité d'infiltration, etc.) utilisées pour simuler cette crue sont celles du mois de juin.

#### 4.2.2. Résultats

Le modèle WaterSed a ainsi été appliqué sur la crue de juin 2003 en appliquant les paramètres calibrés pour la crue de juin 2003 (Tableau 11). Les performances de calage sont présentées dans le Tableau 13. L'hydrogramme observé et l'hydrogramme prédit sont indiqués sur la Figure 19.

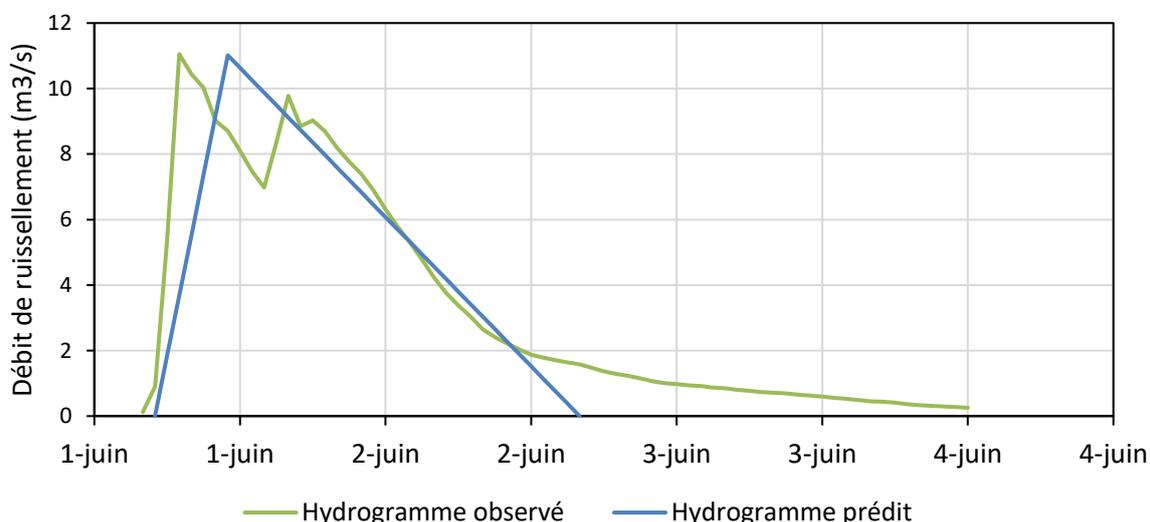


Figure 19 : Hydrogramme de ruissellement observé et prédit à Montivilliers, à l'issue de l'étape de calibration du modèle WaterSed sur la crue de juin 2003.

Le débit de pointe prédit par le modèle est de 11,01 m<sup>3</sup>/s pour un débit de pointe observé de 11,05 m<sup>3</sup>/s, soit une erreur de -0,4 %. Toutefois, ces performances doivent être nuancées :

- le modèle hydraulique et hydrologique construit pour 2018 a été appliqué à cette crue datée de 2003 ;
- la cartographie de l'occupation des sols construite pour 2016 a également été utilisée.

Entre 2003 et 2018, la capacité de stockage a doublé, pour passer de 650 000 à 1 300 000 m<sup>3</sup> d'après la BD CASTOR (estimation approximative). Le débit de pointe prédit par le modèle devrait être logiquement plus faible que celui annoncé.

Toutefois, la valeur de débit de pointe annoncée reste cohérente et certainement proche de la réalité. Ce résultat démontre la robustesse de la paramétrisation mensuelle du modèle et la robustesse des paramètres déterminés lors de l'étape de calibration.

Concernant le volume de ruissellement, le modèle prédit un volume de ruissellement de 561 363 m<sup>3</sup> contre 831 590 m<sup>3</sup> observés, soit une erreur de -32,5 %. Il faut très certainement

y voir l'impact du modèle hydraulique 2018, où la capacité de stockage est nettement supérieure à celle de 2003.

### 4.3. BILAN

L'étape de calibration et de validation du modèle WaterSed avaient pour objectif de, (1) déterminer les paramètres du modèle, et (2) tester la robustesse de la paramétrisation. Les caractéristiques des crues de janvier 2018 et de juin 2003 sont détaillées sur le Tableau 13, ainsi que les volumes de ruissellement et les débits de pointe prédits par le modèle pour chacune des deux crues.

	Crue Janvier 2018		Crue Juin 2003	
Cumul total (mm)	36		87	
Durée effective (min)	197		300	
Antécédent pluvieux (mm)	> 40		0	
	Observé	Prédit	Observé	Prédit
Volume d'écoulement total (m <sup>3</sup> )	552 592	-	1 162 080	-
Volume d'écoulement de base (m <sup>3</sup> )	358 591	-	330 489	-
Volume de ruissellement (m <sup>3</sup> )	<b>194 001</b>	<b>195 712 (+0,9%)</b>	<b>831 590</b>	<b>561 363 (-32,5%)</b>
Débit de pointe total (m <sup>3</sup> /s)	4,00	-	12,10	-
Débit de pointe de ruissellement (m <sup>3</sup> /s)	<b>2,77</b>	<b>2,85 (+3,1%)</b>	<b>11,05</b>	<b>11,01 (-0,4%)</b>
Flux sédimentaire (t)	-	590	-	1 477
Taux d'érosion spécifique (t/ha)	-	0,051	-	0,129

Tableau 13 : Caractéristiques de la crue de janvier 2018 et de juin 2003 utilisées respectivement pour la calibration et la validation du modèle WaterSed. Le débit de pointe et le volume de ruissellement simulé par le modèle pour ces deux crues sont également indiqués.

Les performances sont globalement bonnes, tant au niveau du débit de pointe que du volume de ruissellement. Par ailleurs, les ordres de grandeur des taux d'érosion spécifiques sont cohérents avec la littérature scientifique. Le modèle prédit des valeurs satisfaisantes pour deux événements à forts cumuls pluviométriques, le premier intervenant sur un sol humide et le second sur un sol sec.

L'achèvement de cette étape clef nous permet de mener l'étude de scénarios, présentés dans la suite de ce rapport. Avant cela, une méthode innovante a dû être développée pour cartographier l'aléa inondation par ruissellement, puisque l'analyse économique se base sur des cartographies de hauteur d'eau.



## 5. Cartographie de l'aléa inondation par ruissellement

### 5.1. PRINCIPE

Pour un scénario donné et une pluie donnée, le modèle WaterSed produit en sortie une cartographie des hauteurs d'eau, mais aussi du débit de pointe ou encore de la vitesse des écoulements.

Cependant, en raison d'une conception volontairement simplifiée des processus, les écoulements prédits par le modèle sont simulés dans le sens de la plus grande pente. Autrement dit, le modèle ne permet pas de simuler « l'étalement » d'une crue dans le fond d'un talweg.

Un post-traitement a donc été mis en place pour cartographier l'étalement et les hauteurs d'eau associées, en réalisant un couplage entre la cartographie du débit de pointe (Figure 20), la cartographie des vitesses d'écoulement et la géométrie des talwegs.



Figure 20 : Exemple de cartographie des débits de pointe en sortie du modèle WaterSed.

Ce couplage démarre à partir d'un seuil d'aire drainée de 20 ha, seuil empirique à partir duquel les écoulements sont suffisamment concentrés pour avoir des hauteurs d'eau significatives, et il s'arrête au démarrage de la cartographie des hauteurs d'eau calculée par DHI (Figure 2).

## 5.2. GEOMÉTRIE DES TALWEGS

La géométrie des talwegs a été déterminée par des profils en travers, tracés de manière automatique tous les 5 m et centrés sur le réseau d'axe de ruissellement (Figure 21). La longueur de chaque profil en travers est de 150 m.

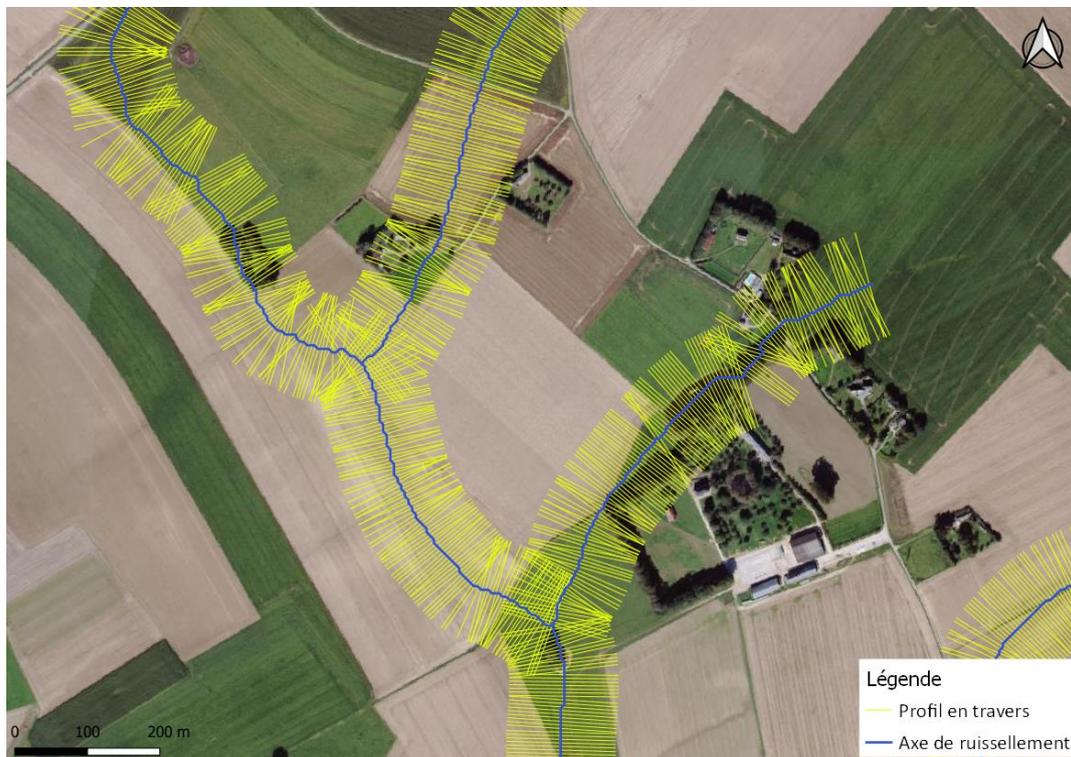


Figure 21 : Caractéristiques des profils en travers tracés pour extraire la géométrie des talwegs.

Sur chaque profil, 30 points ont été définis puisque la résolution du MNT est de 5 m ( $30 \times 5 = 150$  m). L'altitude a été extraite pour chaque point. Au total, 42 589 profils en travers ont été tracés sur le réseau d'axe de ruissellement du bassin de la Lézarde. Pour chaque profil, le débit de pointe et la vitesse des écoulements ont été extraits.

## 5.3. RELATION SECTION-HAUTEUR PAR PROFIL EN TRAVERS

Avant l'étape de calcul de hauteur d'eau, une étape de prétraitement des profils s'est avérée nécessaire pour délimiter les extrémités du talweg en rive droite et en rive gauche. Deux cas de figure se sont révélés problématiques (Figure 22) :

1. cas 1 : la direction du profil en travers est parallèle à la direction du versant ; ce cas de figure est rencontré lorsque l'écoulement se fait de manière perpendiculaire à la direction d'un versant (exemple : une route dans une dépression) ;
2. cas 2 : le profil en travers recoupe deux voire plusieurs talwegs ; ce cas de figure est rencontré notamment à la confluence de deux axes de ruissellement ou encore sur les plateaux, où les variations d'altitude sont très faibles.

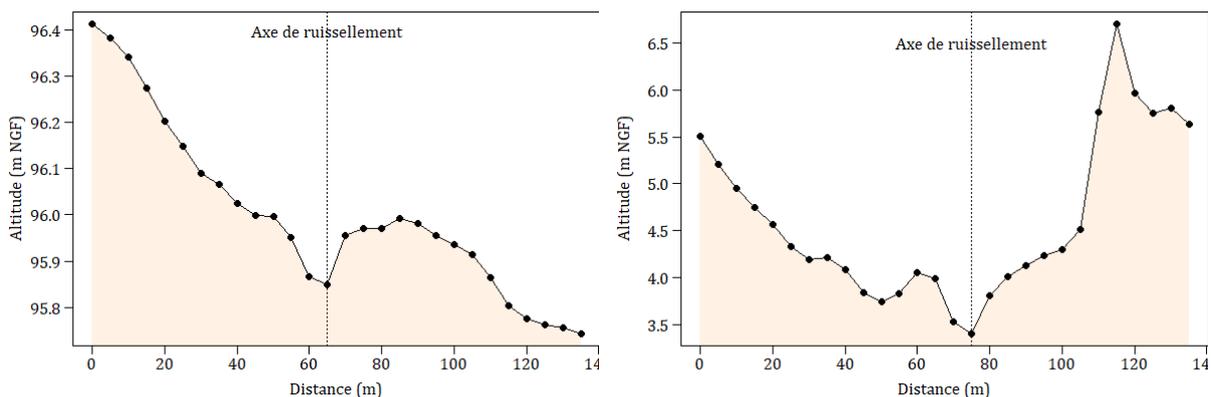


Figure 22 : (Gauche) Cas 1 : profil en travers parallèle à la direction du versant ; (Droite) Cas 2 : profil en travers recoupant deux talwegs.

Le risque est de cartographier des « artefacts d'inondation » (Figure 23). Un algorithme a ainsi été développé, pour rechercher les extrémités en rive droite et en rive gauche de chaque profil en travers (Figure 24). Une extrémité est un point N dont l'altitude est supérieure à celle du point N+1 et du point N-1. Cette recherche est réalisée en rive droite et en rive gauche, en partant du centre du profil. Pour chaque rive, la délimitation s'arrête à la première extrémité rencontrée.

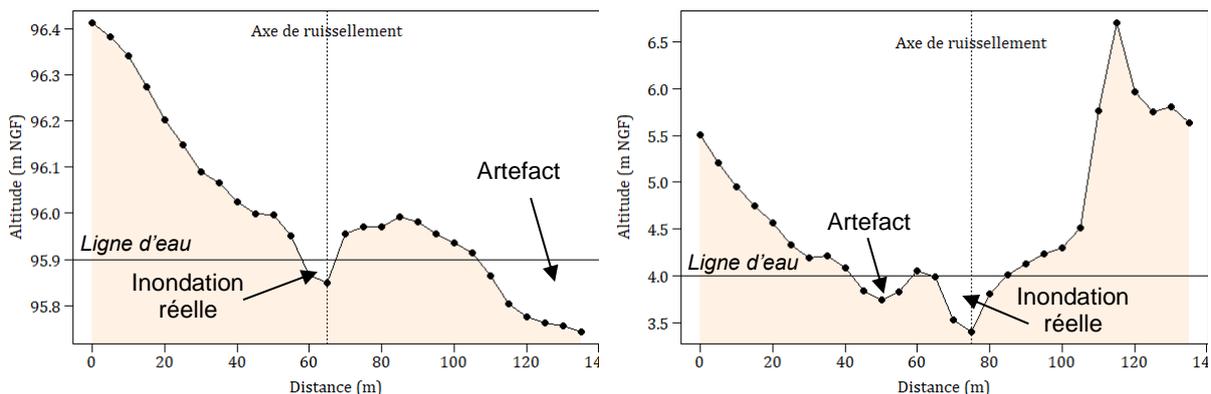


Figure 23 : Artefact généré pour le Cas 1 (Gauche) et le Cas 2 (Droite) si l'ensemble du profil en travers est considéré pour le calcul de la hauteur d'eau.

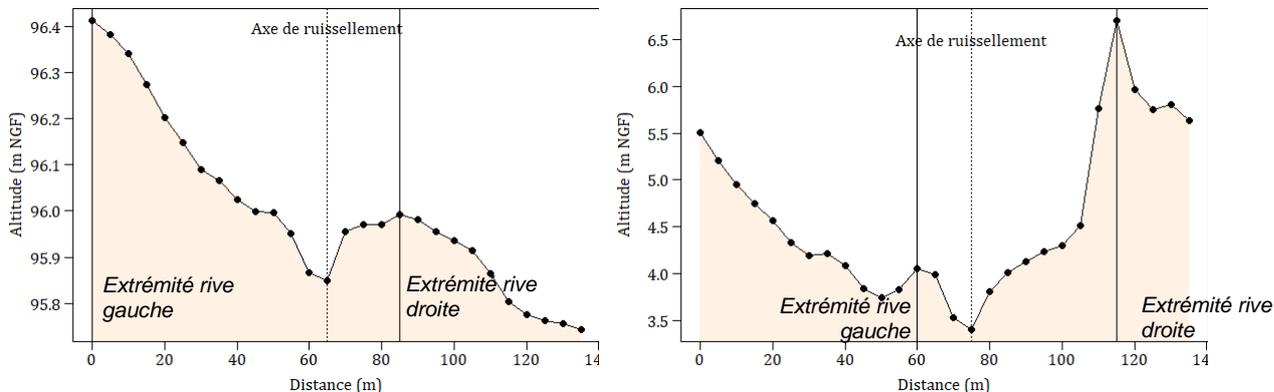


Figure 24 : Délimitation de l'extrémité du profil en travers en rive droite et en rive gauche pour le Cas 1 (Gauche) et le Cas 2 (Droite).

Suite à cette étape de délimitation, une relation section mouillée – hauteur est construite en calculant la section mouillée en chaque point du profil (Figure 25). La hauteur d'un point

correspond à la différence d'altitude entre l'altitude minimum du profil (centre du profil) et l'altitude du point considéré. Le calcul de section est réalisé par la méthode des trapèzes.

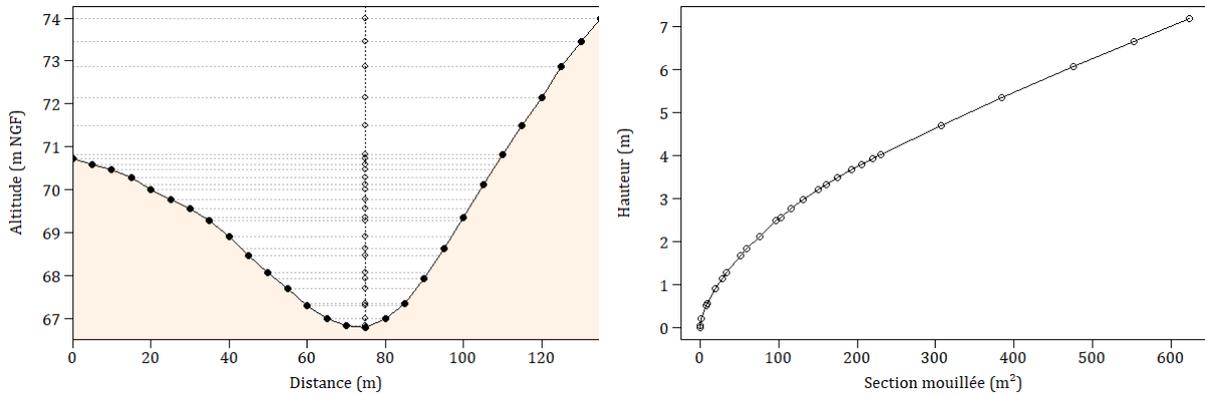


Figure 25 : (Gauche) Méthode de calcul de la section mouillée pour chaque point du profil ; (Droite) Exemple de relation section mouillée – hauteur.

Une fois cette relation établie, la hauteur d'eau sur le profil est déterminée connaissant la section mouillée, calculée à partir du débit de pointe et de la vitesse d'écoulement :

$$Section\ mouillée\ (m^2) = \frac{Débit\ de\ pointe\ (m^3 \cdot s^{-1})}{Vitesse\ (m \cdot s^{-1})}$$

L'altitude de la ligne d'eau est ensuite calculée et projetée sur le profil en travers (Figure 26). L'intersection donne un point en rive gauche et un point en rive droite. Les deux points du profil en travers les plus proches sont sélectionnés et leurs coordonnées géographiques calculées. L'ensemble des points est transformé en raster, correspondant à l'emprise réelle de l'inondation. L'intérêt est d'empêcher l'apparition d'artefact en dehors de ce périmètre.

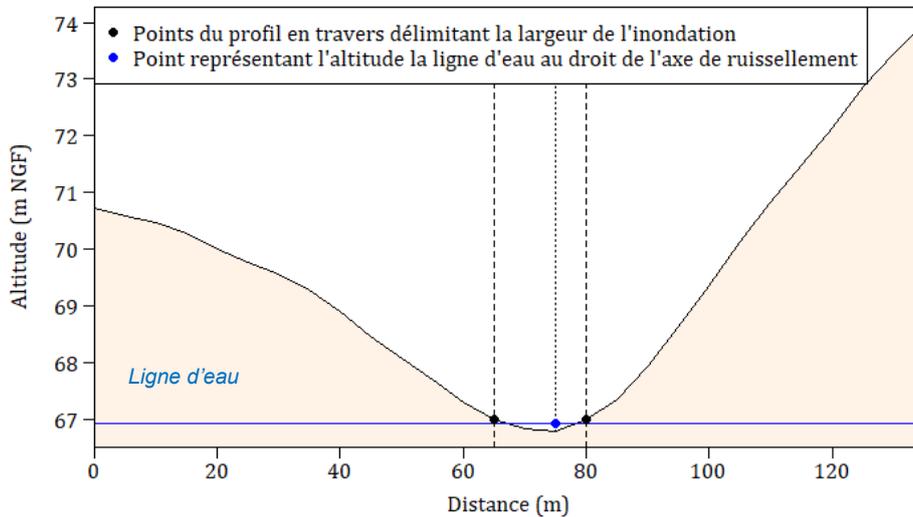


Figure 26 : Représentation sur un profil en travers des deux points délimitant la largeur de l'inondation et du point représentant l'altitude de la ligne d'eau au droit de l'axe de ruissellement.

## 5.4. CARTOGRAPHIE DES HAUTEURS D'EAU

Suite au précédent calcul, chaque profil en travers se résume à trois points, centrés sur l'axe de ruissellement avec pour attribut l'altitude de la ligne d'eau (Figure 27).



*Figure 27 : Représentation d'un profil en travers après traitement. Chaque profil se résume à trois points : un point pour le centre du profil (avec comme attribut l'altitude de l'inondation) et deux points en rive droite et en rive gauche délimitant la largeur d'inondation.*

Une interpolation (Inverse Distance Weighted) est réalisée entre les points représentant le centre et les extrémités de chaque profil. La cartographie des hauteurs d'eau est finalement obtenue en réalisant une différence entre la cartographie de l'altitude de l'inondation et la cartographie de l'altitude du sol, seulement au droit de l'emprise de l'inondation (Figure 28).

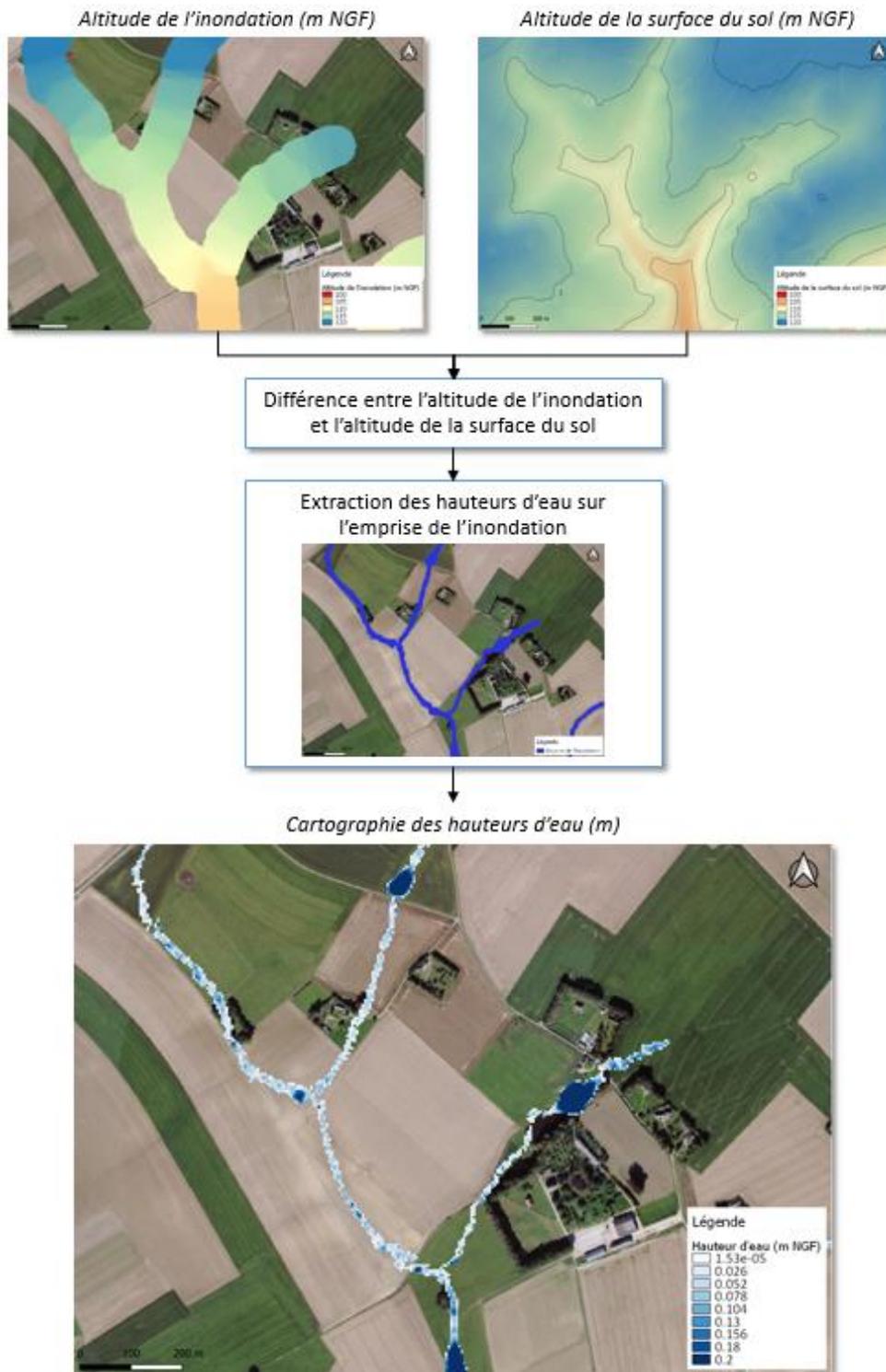


Figure 28 : Procédure de calcul de la cartographie des hauteurs d'eau.

## 6. Aléa inondation et coulée de boue par scénario

Suite à ces cinq premières phases de l'étude, le modèle WaterSed a été calibré et validé sur le bassin de la Lézarde. De plus, une méthode de cartographie des inondations par ruissellement a été développée.

Ce socle constitue le préalable à l'étude de huit scénarios, qui vont venir alimenter l'analyse coût-bénéfice présentée dans la Partie 2 de ce rapport. Chaque scénario est testé selon trois pluies de projet, de période de retour 10 ans, 50 ans et 100 ans.

### 6.1. DÉFINITION DES SCÉNARIOS

L'horizon temporel retenu pour les scénarios est l'année 2050. Les huit scénarios étudiés sont synthétisés dans le Tableau 14.

Nom	Description	Occupation des sols			Ouvrages structurants actuels	Ouvrages d'hydraulique douce	
		2017	2050 « herb »	2050 « agr »		2017	2050
(ref0)	(Scénario de référence DHI) Non modélisé avec Watersed	X					
ref1	Scénario de référence BRGM	X			X		
actu	Hydraulique douce 2017	X			X	X	
amb	Hydraulique douce 2017 + 2050	X			X	X	X
ccb	Changement climatique (hypothèse basse)	X			X		
ccm	Changement climatique (hypothèse moyenne)	X			X		
ccf	Changement climatique (hypothèse haute)	X			X		
herb	Retournement de 1/3 des prairies		X		X		
agr	Amélioration des pratiques culturales sur 50 % des cultures			X	X		

Tableau 14 : Vue d'ensemble des différents scénarios étudiés dans l'ACB.

La définition des scénarios, les hypothèses associées et leurs limites sont détaillés dans la 1<sup>ère</sup> partie du Volume 1 de cette étude.

Le scénario ref1 constitue la référence pour la modélisation de l'aléa inondation par ruissellement et coulée de boue. Il considère l'occupation des sols 2016 et les ouvrages

structurants actuels. L'impact des ouvrages d'hydraulique douce actuels et futurs est respectivement testé dans le scénario « actu » et « amb ».

Les scénarios climatiques « ccm » et « ccf » ne sont pas modélisés puisqu'ils correspondent à une diminution de la période de retour des pluies de projet. Le scénario « ccb » correspond à un maintien de la situation actuelle.

Les impacts du scénario « retournement des prairies » (herb) et du scénario « amélioration des pratiques culturales » (agr) sont évalués. Les points suivants présentent la construction de ces scénarios et leurs caractéristiques.

### 6.1.1. Scénario « actu »

Le scénario « actu » intègre l'occupation des sols 2016, les ouvrages structurants, les aménagements d'hydraulique douce actuels. Le nombre d'aménagements, le nombre d'ouvrages et la capacité de stockage totale sur le bassin de la Lézarde est présentée dans le Tableau 15. La capacité de stockage totale des ouvrages structurant est de 1 477 000 m<sup>3</sup>. La cartographie de ces ouvrages est présentée sur la Figure 5.

Type d'ouvrage	Nom	Nombre	Capacité totale de stockage (m <sup>3</sup> )
Structurant	Barrage	77	800 675
	Bassin	94	467 641
	Mare	35	24 227
	Mare / Bassin	41	184 767
<b>TOTAL</b>		<b>247</b>	<b>1 477 000</b>
Hydraulique douce	Fascine	57	
	Haie	46	
	Aménagement de béttoire	1	
<b>TOTAL</b>		<b>104</b>	

Tableau 15 : Statistiques sur les ouvrages structurant et les ouvrages d'hydraulique douce du scénario « actu ».

### 6.1.2. Scénario « amb »

Le scénario « amb » correspond à la mise en place d'un scénario ambitieux d'aménagements d'hydraulique douce à l'horizon 2050. Ce scénario a ainsi été l'occasion d'intégrer le programme d'aménagement d'hydraulique douce du Syndicat SMBV Pointe de Caux Etretat, actualisé en 2019. Ce scénario comporte 94 km de linéaire d'aménagement d'hydraulique douce et 182 ha d'enherbement (Tableau 16). La cartographie de ces aménagements est présentée sur la Figure 29.

Type d'ouvrage	Nom	Nombre	Linéaire (km) / Surface (ha)
Hydraulique douce	Noue	21	1,9
	Haie	873	67,2
	Bande ligno-cellulosique	54	17,5
	Fascine	186	6,8
	Noue diffusion	14	0,6
<b>TOTAL</b>		<b>1 148</b>	<b>94,0</b>
Enherbement		<b>646</b>	<b>182,4</b>

Tableau 16 : Statistiques du programme d'aménagement d'hydraulique douce du Syndicat SMBV Pointe de Caux Étretat, actualisé en 2019 et intégré au scénario « amb ».

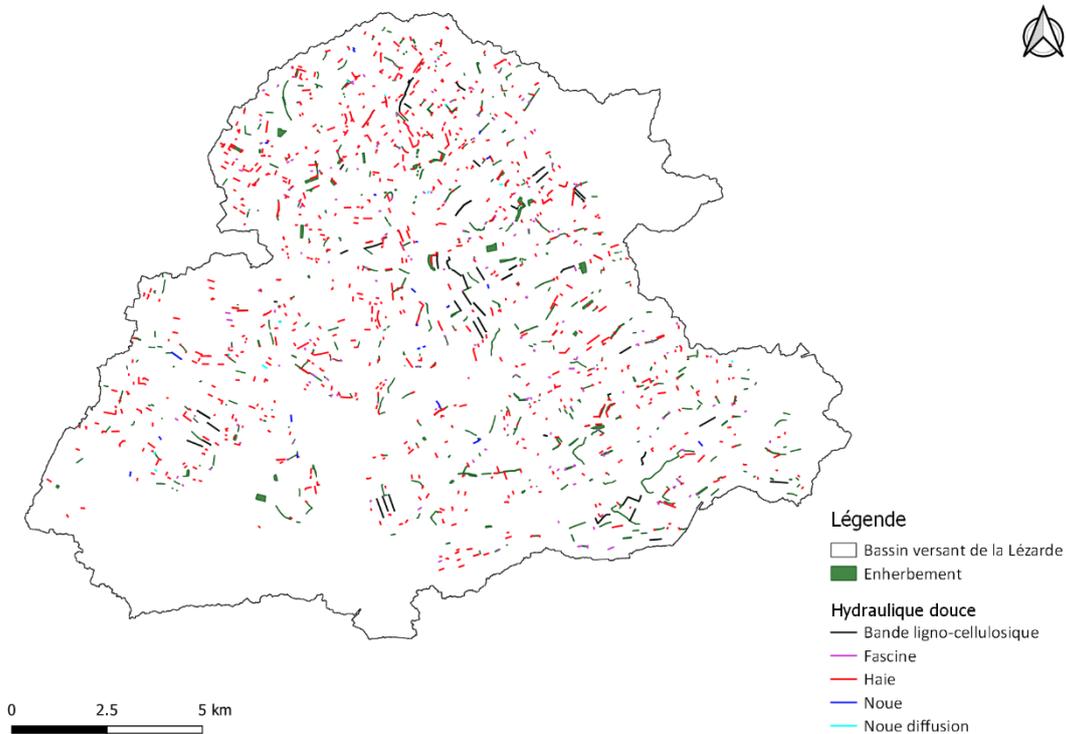


Figure 29 : Cartographie du programme d'aménagement d'hydraulique douce du Syndicat SMBV Pointe de Caux Étretat, actualisé en 2019.

### 6.1.3. Scénario « herb »

Le scénario « herb » correspond au retournement d'environ 1/3 des prairies existantes à l'horizon 2050. Le calcul de ce chiffre est détaillé dans le **Volume 1**, et correspond au taux de retournement actuellement observé. La sélection des prairies à retourner a été réalisée suivant un critère de pente, en sélectionnant en priorité les prairies à pente faible, c'est-à-dire les prairies faciles à exploiter. Il s'agit donc de prairies situées sur les plateaux agricoles, en amont du bassin versant. La surface actuelle de prairie, calculée à partir de la carte d'occupation des sols 2016 RPG + OSCOM est estimée à 3 382 ha (Figure 8). La surface de prairie à retourner est donc d'environ 1073 ha. Pour sélectionner les prairies à retourner, la pente maximale de chaque parcelle de prairie a été calculée à partir de la BD ALTI 5m. La pente maximale a été préférée à la pente moyenne, de façon à écarter les parcelles parfois situées sur des ruptures de pente, à la transition plateau – vallée.

L'ensemble des prairies a ensuite été ordonné suivant ce critère, et la superficie cumulée des prairies a été calculée. La sélection s'est arrêtée lorsqu'environ 1/3 de la superficie totale des prairies a été atteinte (Figure 30). Une classe de culture a ensuite été attribuée de manière aléatoire aux prairies sélectionnées, en veillant à respecter les proportions actuelles entre les différentes classes de culture.

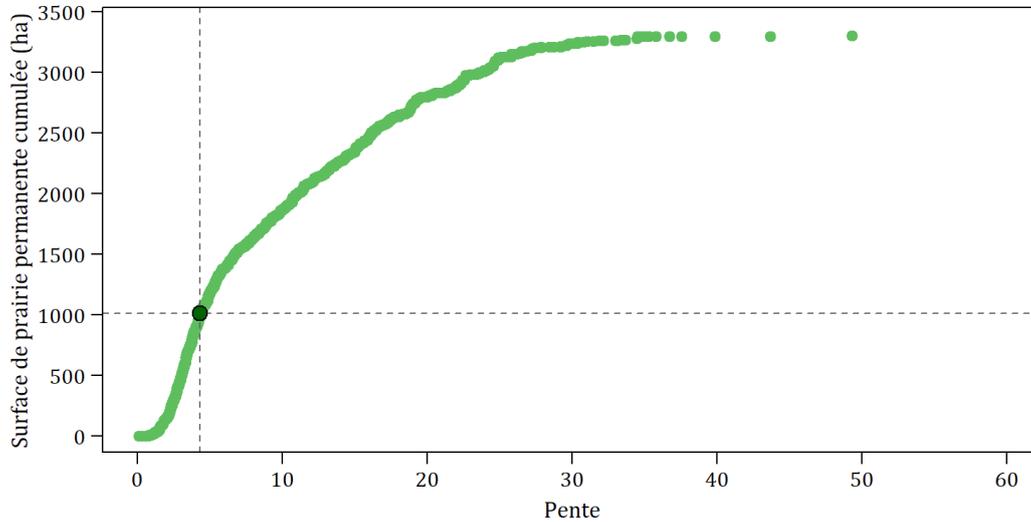


Figure 30 : Superficie cumulée des prairies permanentes sur le bassin de la Lézarde, classée suivant la pente maximale de chaque parcelle de prairie.

À l'issue de cette étape, le pourcentage de prairies retournées est de 31.5 %, soit 1064 ha. La surface de prairie descend ainsi à 2 318 ha (Figure 31). Un extrait de la cartographie de l'occupation des sols avec retournement de prairies est présentée sur la Figure 32 afin de visualiser leur répartition spatiale.

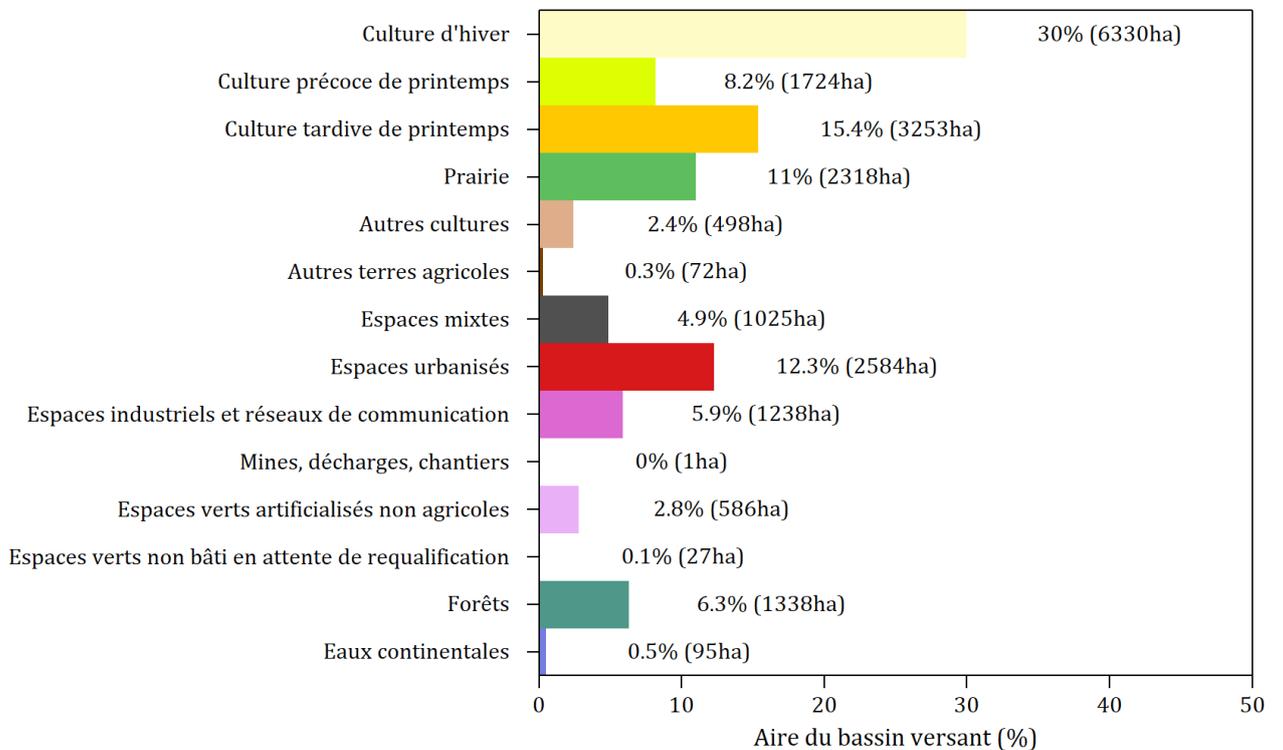


Figure 31 : Statistiques de l'occupation des sols du scénario « herb » sur le bassin de la Lézarde.



Figure 32 : Cartographie de l'occupation des sols 2016 (Gauche) et cartographie de l'occupation des sols du scénario « herb » (Droite) sur le bassin de la Lézarde.

#### 6.1.4. Scénario « agr »

Le scénario « agr » traduit une amélioration des pratiques culturales sur 50 % des parcelles agricoles. Cependant, l'« amélioration des pratiques culturales » englobe une très grande diversité de techniques, dont les effets sur le ruissellement et l'érosion sont très variables suivant le type de pratique.

Les travaux de Maetens *et al.*, 2012 font la synthèse des effets de ces pratiques en analysant 101 études scientifiques datées de 1956 à nos jours et réparties sur toute l'Europe. Les différentes pratiques analysées sont présentées dans le Tableau 17. L'auteur a moyenné les abattements sur le ruissellement et l'érosion par pratique et les résultats sont présentés sur la Figure 33.

SWCT	Description
<b>Crop and vegetation management</b>	
Cc: cover crops	Cover crop during the intercropping season, established after harvest. (e.g. Laloy and Biolders, 2010)
Mu: mulching	Application of stone or organic mulch (crop residue or straw) (e.g. Brown, 1996)
Bs: buffer strips	Strips of perennial vegetation (usually grasses) used to increase infiltration, slow down runoff and increase sediment deposition (e.g. Uusi-Kämpä, 2005)
Sc: strip cropping	Drilling or planting in strips of alternating crop types (e.g. Köse et al., 1996; Köse and Taysun, 2002)
Ex: exclosure	Closing of areas for grazing and agriculture (e.g. Mazour, 1992; Bruggeman et al., 2005; Masri et al., 2005)
<b>Soil management</b>	
Nt: no-tillage	No tillage operations when the traditional practice is tillage (e.g. Turtola et al., 2007)
Rt: reduced tillage	Different forms of reduced tillage resulting in a smaller disturbance of the plough layer than conventional cultivation (e.g. Kwaad et al., 1998)
Ct: contour tillage	Tillage operations parallel to the contour (e.g. Quinton and Catt, 2004)
Dt: deep tillage	Deep non-inversion tillage to improve infiltration (e.g. Suchanic, 1987; Chomanicová, 1988)
Dr: drainage	Application of subsurface drainage pipes (e.g. Øygarden, 1996; Øygarden et al., 1997)
Sa: soil amendment	Application of soil conditioners or fertiliser to improve soil structural stability: i.e. phosphogypsum (Agassi and Benhur, 1991), polymers (Chomanicová, 1988; Lopez-Bermudez et al., 1991; Romero-Díaz et al., 1999), sewage sludge (Ingelmo et al., 1998) and NPK fertiliser (Kroumov and Malinov, 1989)
<b>Mechanical methods</b>	
Te: terraces	Construction of earthen or stone terraces parallel to the contour (e.g. Koulouri and Giourga, 2007)
Cb: contour bunds	Stone or earthen bunds constructed parallel to the contour (e.g. Pinczés, 1982)
Gt: geotextile	Application of geotextile mats (e.g. Mitchell et al., 2003; Bhattacharyya et al., 2008, 2009; Jankauskas et al., 2008)

Tableau 17 : Liste des mesures de conservation des sols étudiées par Maetens *et al.*, (2012).

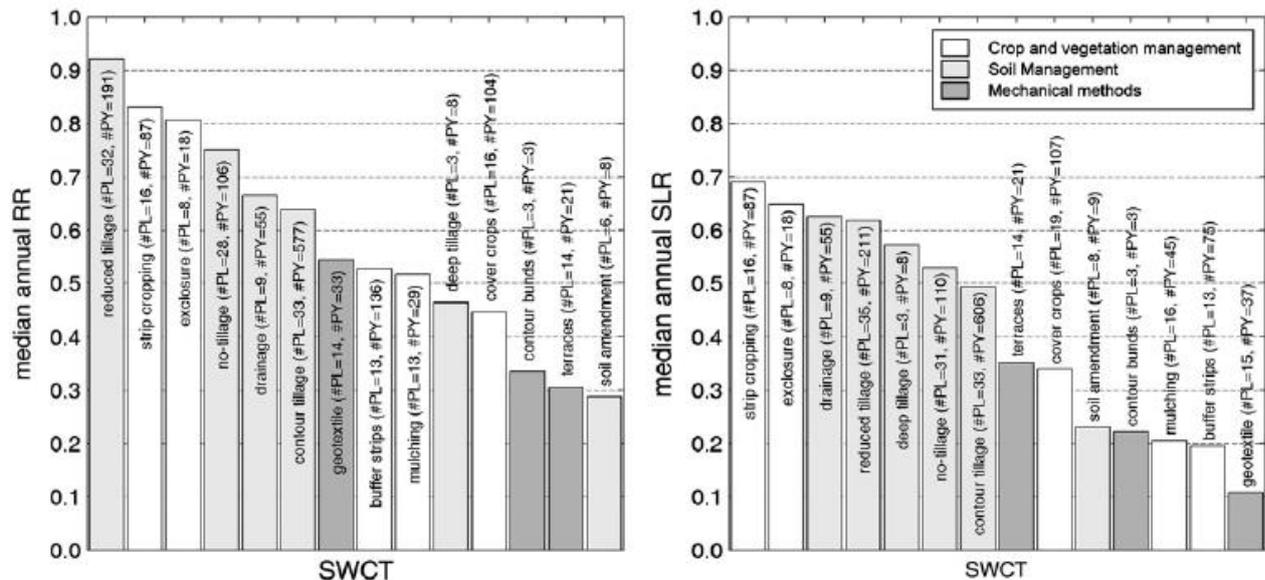


Figure 33 : Ratio médian entre le ruissellement annuel avec mesure et sans mesure (gauche) et ratio entre le flux sédimentaire annuel avec et sans mesure (droite) pour différentes mesures de conservation des sols - Maetens et al., (2012).

Il ressort que l'abattement sur le ruissellement varie en moyenne de 10 % à 60 % et que l'abattement sur l'érosion varie de 20 % à 80 % suivant les techniques.

Les auteurs indiquent que les techniques favorisant un couvert végétal permanent (résidus de cultures, intercultures, bandes enherbées) et limitant le retournement du sol (semi direct, pseudo-labour, etc.) sont bien plus efficaces que les techniques basées sur le labour (labour raisonné, labour parallèle aux courbes de niveau, etc.). Les auteurs montrent également que ces abattements sont très variables dans le temps et dans l'espace, en lien avec l'expression de facteurs environnementaux externes à l'exploitation agricole (variabilité interannuelle du climat, contexte agro-pédologique, etc.)

Dès lors, il est complexe de modéliser l'effet de l'amélioration des pratiques culturales à l'échelle d'un bassin, sans compter que le niveau d'ambition dans la mise en place de mesures de conservation des sols peut être différent suivant les agriculteurs.

Face à ce constat, l'équipe du projet a retenu un scénario réaliste et envisageable à l'horizon 2050, où l'amélioration des pratiques culturales correspond à des techniques d'agriculture de conservation, basées sur la réduction du travail du sol et le maintien d'une couverture du sol. Ce postulat se traduit en conséquence par une augmentation de 15% de la capacité d'infiltration (hypothèse basse), sur les parcelles agricoles où sont déployées une amélioration des pratiques. Comme pour le scénario de retournement des prairies, le scénario de pratique de conservation se base donc sur des hypothèses dont la mise en œuvre apparaît réaliste.

La sélection des parcelles agricoles dites « améliorées » a été réalisée de manière aléatoire sur la cartographie de l'occupation des sols 2016, en veillant à respecter les proportions de cultures d'hiver et de printemps. La proportion de des différentes classes d'occupation des sols est présentée sur la Figure 34.

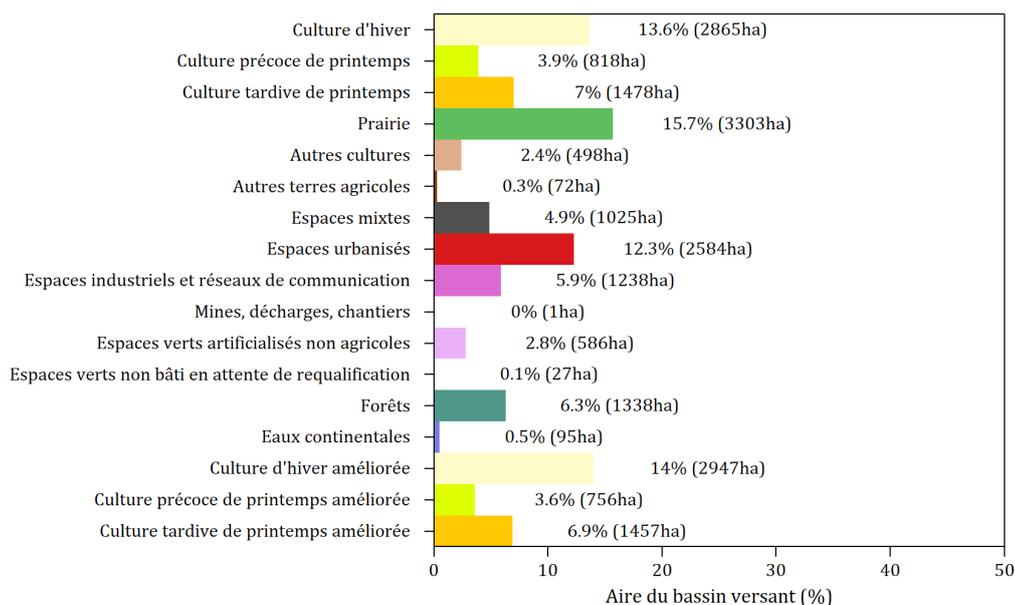


Figure 34 : Statistiques de l'occupation des sols du scénario « agr » sur le bassin de la Lézarde.

## 6.2. PLUIES DE PROJET

Chacun des scénarios est testé suivant 3 pluies de projet, de période de retour 10 ans, 50 ans et 100 ans. Chaque pluie de projet correspond à un orage violent estival intervenant sur sol sec. Ces conditions sont celles de la crue de validation de juin 2003. Les caractéristiques de chacune des pluies sont détaillées dans le Tableau 18. Les cumuls de pluie sont identiques à ceux utilisés par DHI. Pour faciliter la lecture du document dans la suite de cette partie, les termes « P10ans », « P50ans » et « P100ans » seront utilisés pour décrire les pluies de période de retour 10 ans, 50 ans et 100 ans, respectivement.

Période de retour	Cumul (mm)	Durée (min)	Intensité maximale à 6 min (mm/h)	Antécédent pluvieux à 48h
10	51,9	179	45	0
50	74,7	258	45	0
100	87,0	300	45	0

Tableau 18 : Caractéristiques des pluies de projet.

## 6.3. MESURE DE L'IMPACT DES SCÉNARIOS

L'impact de chaque scénario, en terme de débit de pointe, de volume de ruissellement ou encore de flux sédimentaire, est quantifié en comparant les valeurs par rapport au scénario de référence (« ref1 ») au droit de point de contrôle. Dans le cas présent, le point de contrôle retenu est la station hydrométrique de Montivilliers.

Pour rappel :

- le volume de ruissellement ( $m^3$ ) : volume total de ruissellement transitant en un point donné du bassin versant (par exemple à la station de Montivilliers) durant un évènement de pluie donné ;

- le flux sédimentaire (t) : quantité totale de sédiment transitant en un point donné du bassin versant durant un évènement de pluie donné ;
- le débit de pointe (m<sup>3</sup>/s) : débit maximal de ruissellement atteint durant la crue pour un évènement de pluie donné.

#### 6.4. IMPACT DES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS

Le volume de ruissellement, le débit de pointe et le flux sédimentaire de chaque scénario et de chaque pluie de projet sont présentés dans le Tableau 19 ainsi que sur la Figure 35, la Figure 36 et la Figure 37.

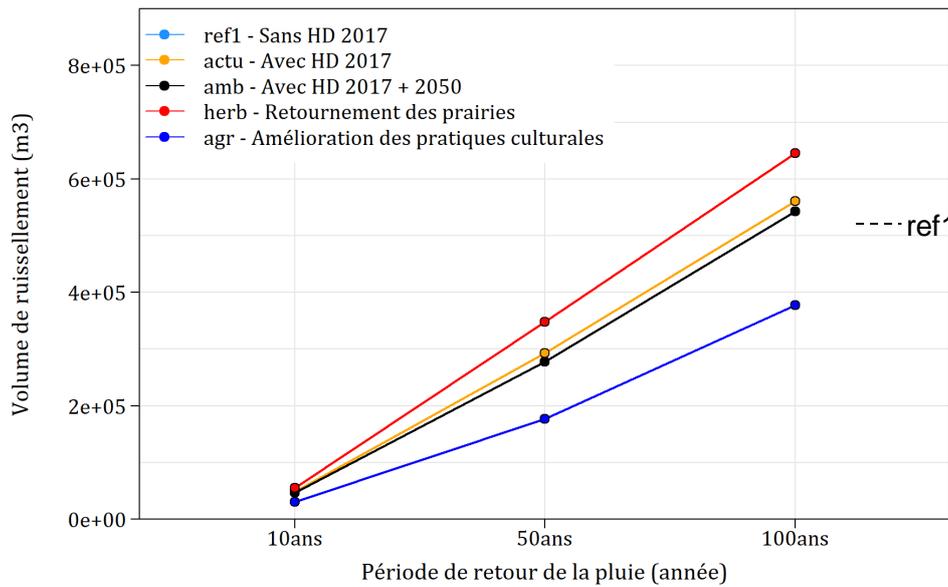


Figure 35 : Volume de ruissellement à Montivilliers pour les cinq scénarios et pour les trois pluies de projet.

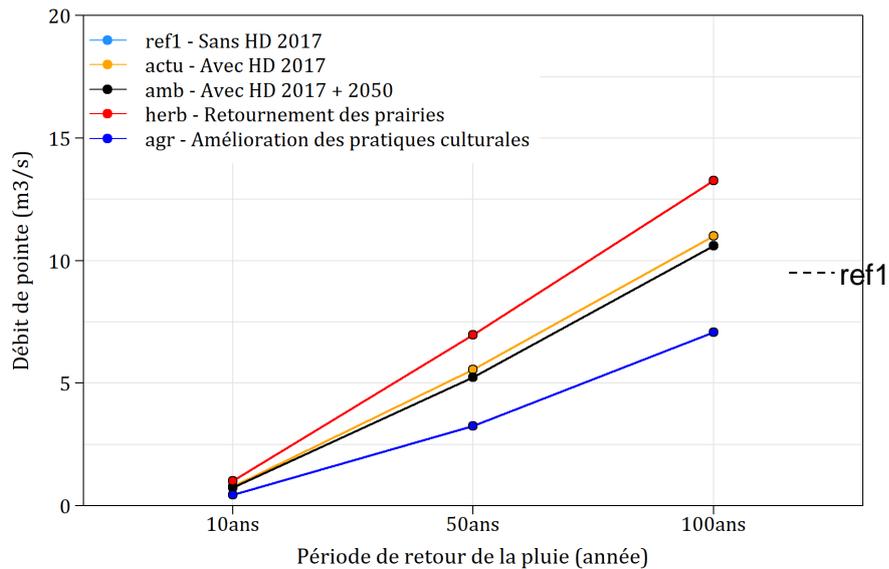


Figure 36 : Débit de pointe à Montivilliers pour les cinq scénarios et pour les trois pluies de projet.

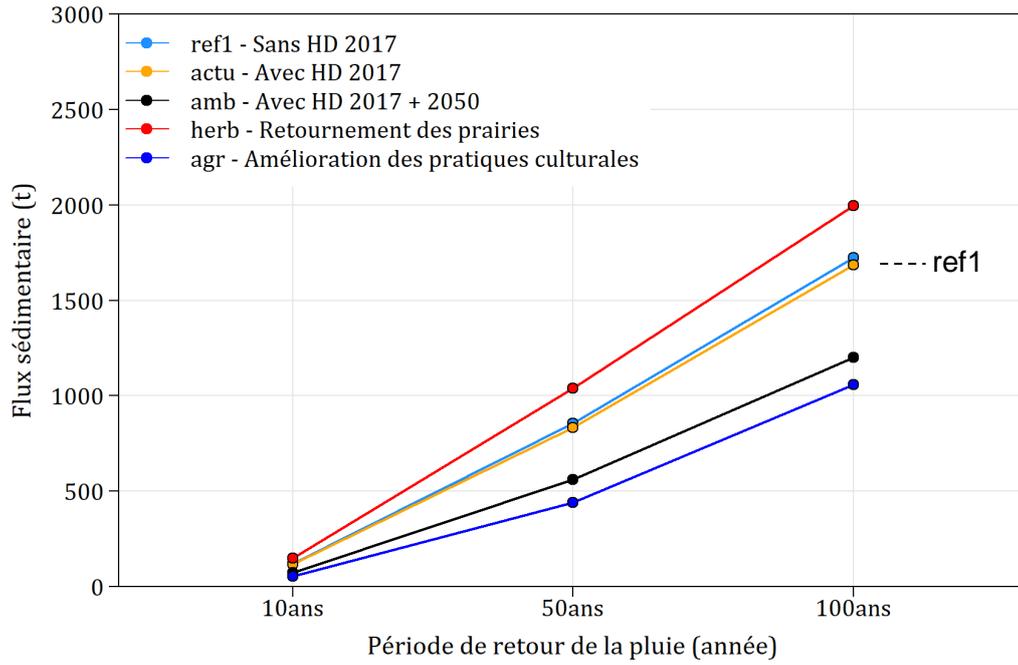


Figure 37 : Flux sédimentaire à Montivilliers pour les cinq scénarios et pour les trois pluies de projet.

**(A) Volume de ruissellement**

Scenario	Période de retour de la pluie					
	P10 ans		P50 ans		P100 ans	
	Volume de ruissellement (m <sup>3</sup> )	Diff (%)	Volume de ruissellement (m <sup>3</sup> )	Diff (%)	Volume de ruissellement (m <sup>3</sup> )	Diff (%)
ref1 - Scénario de référence	48 417		292 870		561 364	
actu - Hydraulique douce 2017	48 330	0%	292 621	0%	561 100	0%
amb - Hydraulique douce 2017 + 2050	46 437	-4%	278 079	-5%	542 821	-3%
herb - Retournement de 1/3 des prairies	55 408	14%	347 660	19%	645 818	15%
agr - Amélioration des pratiques culturales sur 50% des cultures	30 123	-38%	177 035	-40%	377 596	-33%

**(B) Débit de pointe**

Scenario	Période de retour de la pluie					
	P10 ans		P50 ans		P100 ans	
	Débit de pointe (m <sup>3</sup> /s)	Diff (%)	Débit de pointe (m <sup>3</sup> /s)	Diff (%)	Débit de pointe (m <sup>3</sup> /s)	Diff (%)
ref1 - Scénario de référence	0,79		5,6		11,0	
actu - Hydraulique douce 2017	0,79	0 %	5,5	0 %	11,0	0 %
amb - Hydraulique douce 2017 + 2050	0,74	-7 %	5,2	-6 %	10,6	-4 %
herb - Retournement de 1/3 des prairies	1,01	27 %	7,0	25 %	13,3	20 %
agr - Amélioration des pratiques culturales sur 50% des cultures	0,45	-43 %	3,2	-42 %	7,1	-36 %

**(C) Flux sédimentaire**

Scenario	Période de retour de la pluie					
	P10 ans		P50 ans		P100 ans	
	Flux sédimentaire (t)	Diff (%)	Flux sédimentaire (t)	Diff (%)	Flux sédimentaire (t)	Diff (%)
ref1 - Scénario de référence	122		856		1 724	
actu - Hydraulique douce 2017	117	-4 %	833	-3 %	1 687	-2 %
amb - Hydraulique douce 2017 + 2050	72	-41 %	560	-35 %	1 203	-30 %
herb - Retournement de 1/3 des prairies	148	22 %	1 040	22 %	1 997	16 %
agr - Amélioration des pratiques culturales sur 50% des cultures	54	-56 %	440	-49 %	1 059	-39 %

Tableau 19 : Synthèse des volumes de ruissellement (A), des débits de pointe (B) et des masses de sédiment transportées par les eaux (C) au droit de la station de Montivilliers pour les cinq scénarios et pour les trois pluies de projet.

### **Scénario « ref1 »**

Pour comparer les scénarios entre eux, l'analyse se focalise arbitrairement sur la pluie P50ans. Pour cette pluie et pour le scénario de référence « ref1 », la modélisation indique un volume de ruissellement de 292 870 m<sup>3</sup>, un débit de pointe de 5,6 m<sup>3</sup>/s et un flux sédimentaire de 856 t.

### **Impact du scénario « actu »**

Ce scénario considère l'ensemble des aménagements d'hydraulique douce recensés en 2017 sur le bassin de la Lézarde. Ces aménagements ont vocation à « freiner » le ruissellement, empêcher l'apparition de formes d'érosion concentrée et favoriser la sédimentation des agrégats de sol. Ils sont complémentaires aux ouvrages structurants, dont le rôle est de tamponner les volumes de ruissellement et écrêter le débit de pointe.

En toute logique, les résultats montrent que les aménagements d'hydraulique douce ont très peu d'impact sur le débit de pointe et le volume de ruissellement à Montivilliers. La capacité d'infiltration de ces aménagements est certes très forte (200 mm/h pour les fascines, 400 mm/h pour les haies), mais leur emprise totale est très faible au regard de la superficie du bassin versant amont (110 km<sup>2</sup>).

Dans ce scénario, le flux sédimentaire diminue de -3 % par rapport au scénario « ref1 ». Cette valeur d'abattement s'explique par une faible densité d'aménagements sur le bassin versant de la Lézarde : 104 aménagements sur 210 km<sup>2</sup> soit 0,5 aménagements au km<sup>2</sup>.

### **Impact du scénario « amb »**

Ce scénario considère les aménagements d'hydraulique douce de 2017 et ceux prévus pour 2050. La densité d'aménagement passe de 0,5 à 5,5 aménagements / km<sup>2</sup> et 182 ha de terres agricoles sont à nouveau enherbées. Les effets sont cette fois visibles sur le volume de ruissellement (-5 %), sur le débit de pointe (-6 %) et sur le flux sédimentaire (-35 %) pour P50ans.

Malgré une densité d'aménagements nettement supérieure au scénario « actu », l'abattement à l'exutoire est loin des abattements mesurés au droit de ces aménagements, de l'ordre de 90 % (Ouvry *et al.*, 2012b). Pour tenter d'expliquer cette différence, l'impact des aménagements d'hydraulique douce est exploré dans les points suivants aux différentes échelles spatiales du bassin versant.

### **Impact du scénario « herb »**

Ce scénario traduit un retournement de 31 % (1 064 ha) des prairies actuelles à l'horizon 2050. La conséquence serait une augmentation de +19 % du volume de ruissellement, +25 % du débit de pointe et +22 % du flux sédimentaire pour P50ans.

### **Impact du scénario « agr »**

La mise en place de pratiques culturales « améliorées » dans le scénario « agr » est bénéfique à la fois sur les volumes de ruissellement, sur les débits de pointe et les masses de terre transférées. Pour une pluie de période de retour 50 ans, le volume de ruissellement diminue ainsi de -40 %, -42 % sur le débit de pointe et -49 % sur le flux sédimentaire.

L'intérêt de mettre en place des mesures agronomiques est de piéger à la source le ruissellement et l'érosion des sols. Les effets sont bénéfiques à toutes les échelles du bassin versant, depuis la parcelle agricole jusqu'à l'exutoire.

Ces mesures peuvent être évidemment associées à des aménagements d'hydraulique douce. D'ailleurs, le cumul des scénarios (hydraulique douce et amélioration des pratiques culturales) n'a pas été investigué mais il est probable que des abattements encore plus importants puissent être attendus en combinant ces deux stratégies.

## 6.5. EFFET LOCAL ET EFFET GLOBAL DES AMÉNAGEMENTS

### 6.5.1. Paramétrisation des aménagements

Dans le modèle WaterSed, le fonctionnement d'une fascine ou d'une haie est régi par une fonction de dépôt, basée sur les expérimentations de l'AREAS menée dans le Pays de Caux (Ouvry *et al.*, 2012b).

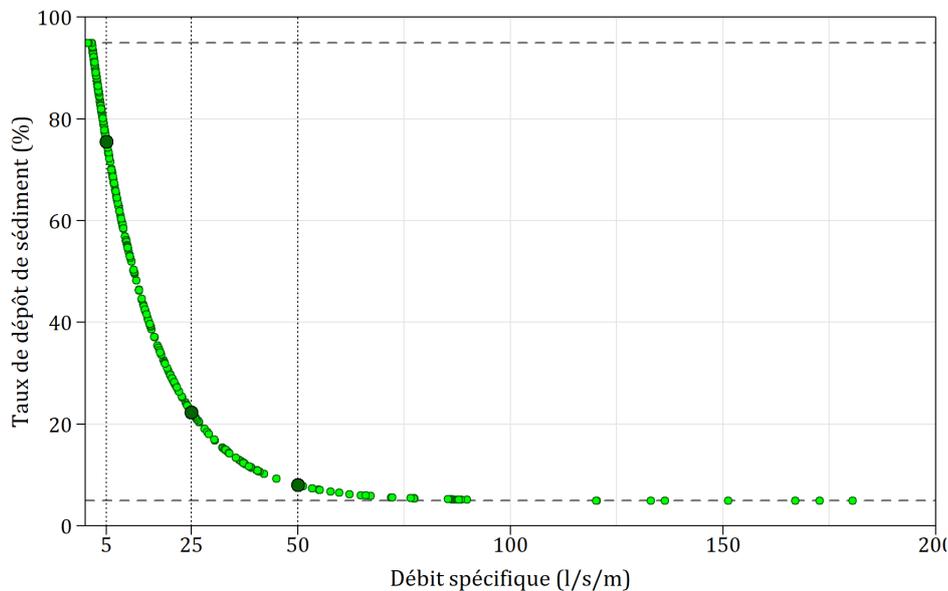


Figure 38 : Fonction de dépôt de sédiments des fascines et des haies dans le modèle WaterSed.

Cette fonction de dépôt exprime le pourcentage du flux sédimentaire entrant qui est déposé au droit de l'aménagement. Elle est fonction du débit spécifique entrant, c'est-à-dire que plus le débit spécifique entrant est grand, plus le taux de dépôt de sédiment est faible.

Ainsi, le taux de dépôt est 75 % pour un débit spécifique entrant de 5 l/s/m de fascine et diminue rapidement à 22 % pour un débit spécifique entrant de 25 l/s/m. Pour un débit entrant de 50 l/s/m, le taux de dépôt n'est plus que de 8 %. Au-delà, le taux de dépôt a volontairement été borné à 5% de façon à toujours donné un impact minimum aux aménagements. Par expérience, des sédiments sont toujours piégés au droit des aménagements même lorsque le débit entrant est très grand (sauf en cas de rupture de l'ouvrage).

Le taux de dépôt a également été borné à 95 % de façon à éviter d'avoir une eau « sans sédiments » en sortie de fascine, ce qui n'ai jamais observé sur le terrain. En effet, les aménagements d'hydraulique douce piègent en priorité les particules grossières en suspension

dans les eaux de ruissellement (agrégats, sables, etc.). Les particules les plus fines, et notamment les argiles, ne peuvent être piégées par ce type d'ouvrage.

### 6.5.2. Effet local

L'impact des aménagements d'hydraulique douce a été analysé à l'échelle locale pour le scénario « actu » et le scénario « amb ». Le taux de dépôt a été extrait au droit de chaque fascine et de chaque haie pour chaque scénario et chaque pluie.

Pour un scénario donné et une pluie donnée, les taux de dépôt ont été classés de manière décroissante puis exprimés en proportion du nombre total d'aménagement. Les résultats sont présentés sur la Figure 39 pour le scénario « actu » et sur la Figure 40 pour le scénario « amb ».

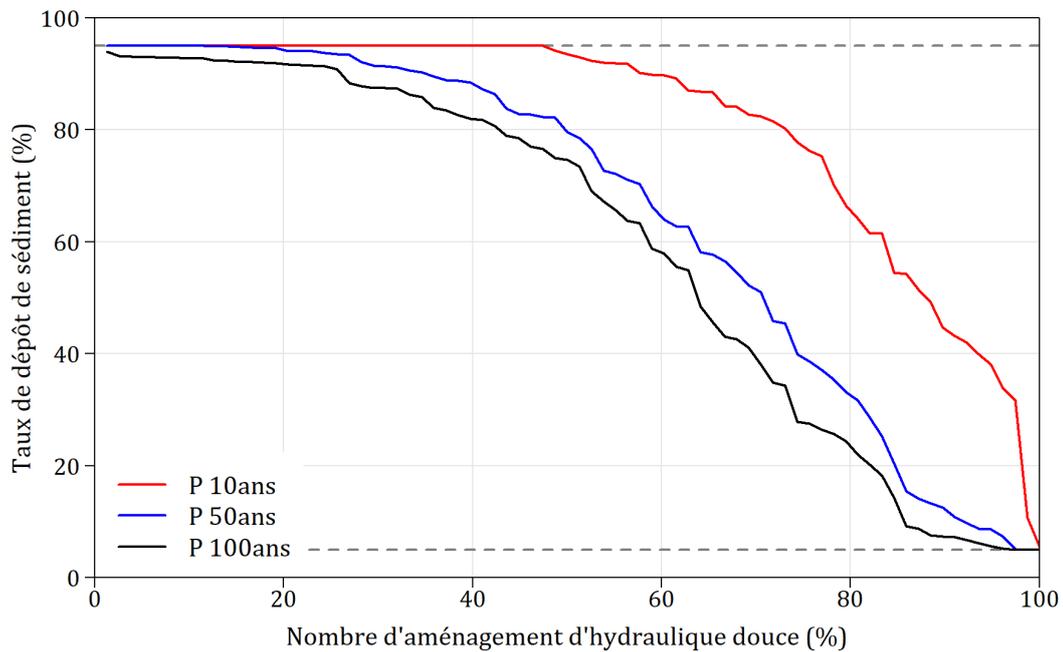


Figure 39 : Taux de dépôt de sédiment des aménagements sur le bassin de la Lézarde pour les trois pluies de projet et pour le scénario « act » ; les taux de dépôt ont été classés de manière décroissante et exprimés en pourcentage du nombre d'aménagement total. Les pointillés correspondent aux bornes 5 % et 95 %.

Dans le scénario « actu » et pour P10ans, 50 % des aménagements ont un taux de dépôt égal à 94 % et pour 80 % des aménagements, ce taux de dépôt est de 64 % (Figure 39).

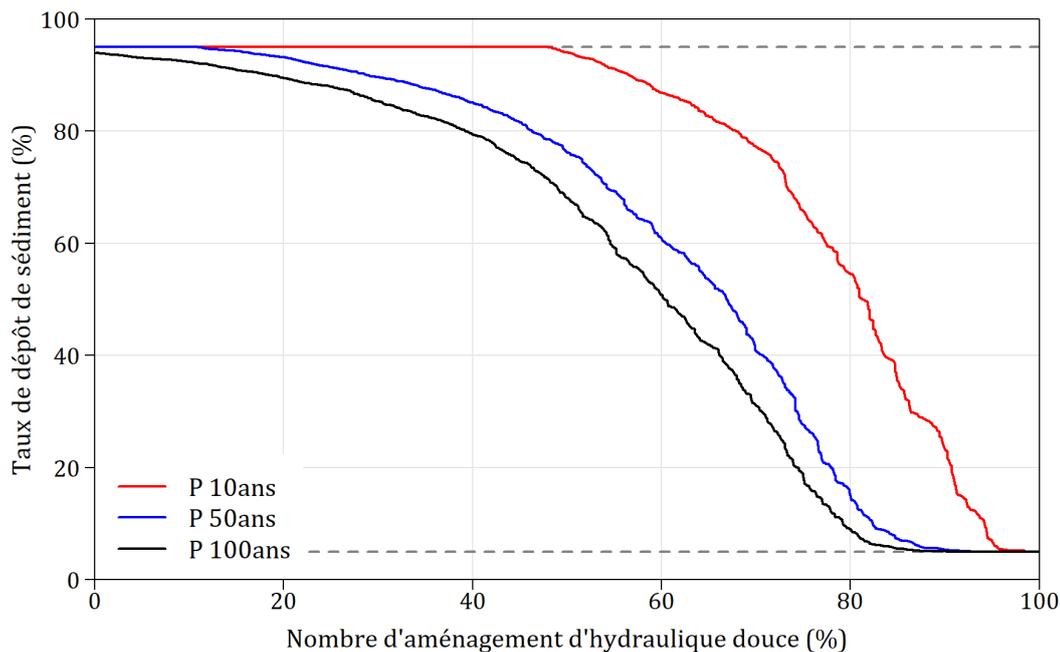


Figure 40 : Taux de dépôt de sédiment des aménagements sur le bassin de la Lézarde pour les trois pluies de projet et pour le scénario « amb » ; les taux de dépôt ont été classés de manière décroissante et exprimés en pourcentage du nombre d'aménagement total. Les pointillés correspondent aux bornes 5 % et 95 %.

Même constat pour le scénario « amb » et pour P10ans, où pour 50 % des aménagements, le taux de dépôt est de 94 %. Pour 80 % des aménagements, le taux de dépôt est supérieur ou égal à 55 % (Figure 40).

L'augmentation des débits de pointe entre P10ans et P50ans entraîne une diminution du taux de dépôt. Ce phénomène se matérialise sur les deux figures par un glissement vers la gauche de la courbe de taux de dépôt.

Ainsi, pour 80 % des aménagements dans le scénarios « amb », le taux de dépôt est supérieur ou égale à 15 % pour P50ans (au lieu de 55 % pour P10ans).

Pour P100ans, les taux de dépôt sont encore plus faibles, toujours en lien avec l'augmentation des débits de pointe.

Au final, ces résultats montrent la bonne cohérence du fonctionnement des aménagements d'hydraulique douce dans les deux scénarios, avec des abattements sur la charge solide de l'ordre de 90 % pour la majorité des aménagements pour P10ans. Ces valeurs sont en accord avec celles mesurées expérimentalement sur le terrain dans le Pays de Caux.

Les valeurs d'abattements diminuent logiquement pour les pluies de période de retour supérieure. Le lecteur doit toutefois être précautionneux avec les valeurs d'abattement annoncées pour P50ans et P100ans, où les valeurs de débit spécifique sont bien au-delà de la gamme de débit testée par Ouvry et al. (2012). Le modèle fournit vraisemblablement les bons ordres de grandeur et les bonnes tendances, mais le lecteur doit être vigilant quant à l'utilisation ultérieure des valeurs communiquées.

### 6.5.3. Effet global

La précédente analyse, menée à l'échelle locale, a montré que des abattements (ou de taux de dépôt de sédiments) de l'ordre de 90 % étaient mesurés au droit des aménagements. Cependant, les valeurs d'abattement mesurées au droit de la station de Montivilliers sont nettement inférieures pour le scénario « actu » et le scénario « amb », avec des valeurs de l'ordre de 3 % et 35 %, respectivement (Tableau 19), par rapport au scénario « ref1 ».

Pour comprendre cette diminution de l'abattement entre les échelles spatiales, un cas synthétique est présentée sur la Figure 41. Deux points de contrôle drainant deux bassins emboîtés sont considérés :

- un point de contrôle (P1) positionné à l'emplacement d'une fascine ; le bassin versant amont draine une superficie de 12 ha ;
- un point de contrôle (P2) positionné à l'aval de la fascine, environ 300 m plus bas ; le bassin versant amont draine une superficie de 23,7 ha.

La pluie de projet étudiée est P10ans. Le flux sédimentaire au droit de la fascine (P1) pour le scénario « ref1 » est de 288 kg et est de 1 471 kg au droit du point de contrôle (P2). Le flux sédimentaire transitant au droit de P1 représente ainsi 19,5 % du flux sédimentaire de P2. Autrement dit, l'impact de la fascine sur le flux sédimentaire transitant sur P1 est au maximum de 19,5 %, dans le cas où l'abattement provoqué par la fascine serait de 100 %.

L'analyse du scénario « act » montre que, en réalité, l'abattement provoqué par la fascine est de 92 %, avec un flux sédimentaire en sortie de fascine de 22 kg. La conséquence est une diminution du flux sédimentaire en aval de la fascine sur environ 100 m. Ensuite, le flux sédimentaire augmente progressivement jusqu'au point P2, alimenté par des phénomènes d'érosion latéral. Il en résulte une diminution progressive de l'abattement jusqu'au point P2. Au droit de P2, le flux sédimentaire est de 1 223 kg, soit un abattement de 17 %.

Ce cas de figure n'est pas isolé et est généralisable à de nombreux aménagements du scénario « actu ». En raison d'une densité d'aménagement très faible (0,5 aménagements/km<sup>2</sup> ; Tableau 15), leur impact ne peut pas être visible à l'échelle globale.

Le seul moyen de maintenir un impact significatif des aménagements d'hydraulique douce aux différentes échelles du bassin versant est de :

- positionner des aménagements sur l'ensemble des îlots cultureux générant du ruissellement et de l'érosion ;
- placer les aménagements en cascade afin de maintenir un abattement élevé dans les fonds de talweg.

Ces principes sont davantage respectés dans le scénario « amb » avec une densité d'aménagement plus de 10 fois supérieure (5,5 au lieu de 0,5 aménagements / km<sup>2</sup>) et des aménagements positionnés en cascade. Dans ces conditions, l'abattement reste élevé malgré l'augmentation de l'échelle spatiale (Figure 42). Ceci explique pourquoi l'abattement passe de - 3 % à -35 % entre le scénario « actu » et « amb ».

Par ailleurs, on comprend également pourquoi le scénario d'amélioration des pratiques culturales (« agr ») est également efficace, puisqu'en piégeant à la source le ruissellement et l'érosion, l'abattement reste visible aux différentes échelles spatiales du bassin (Figure 43).

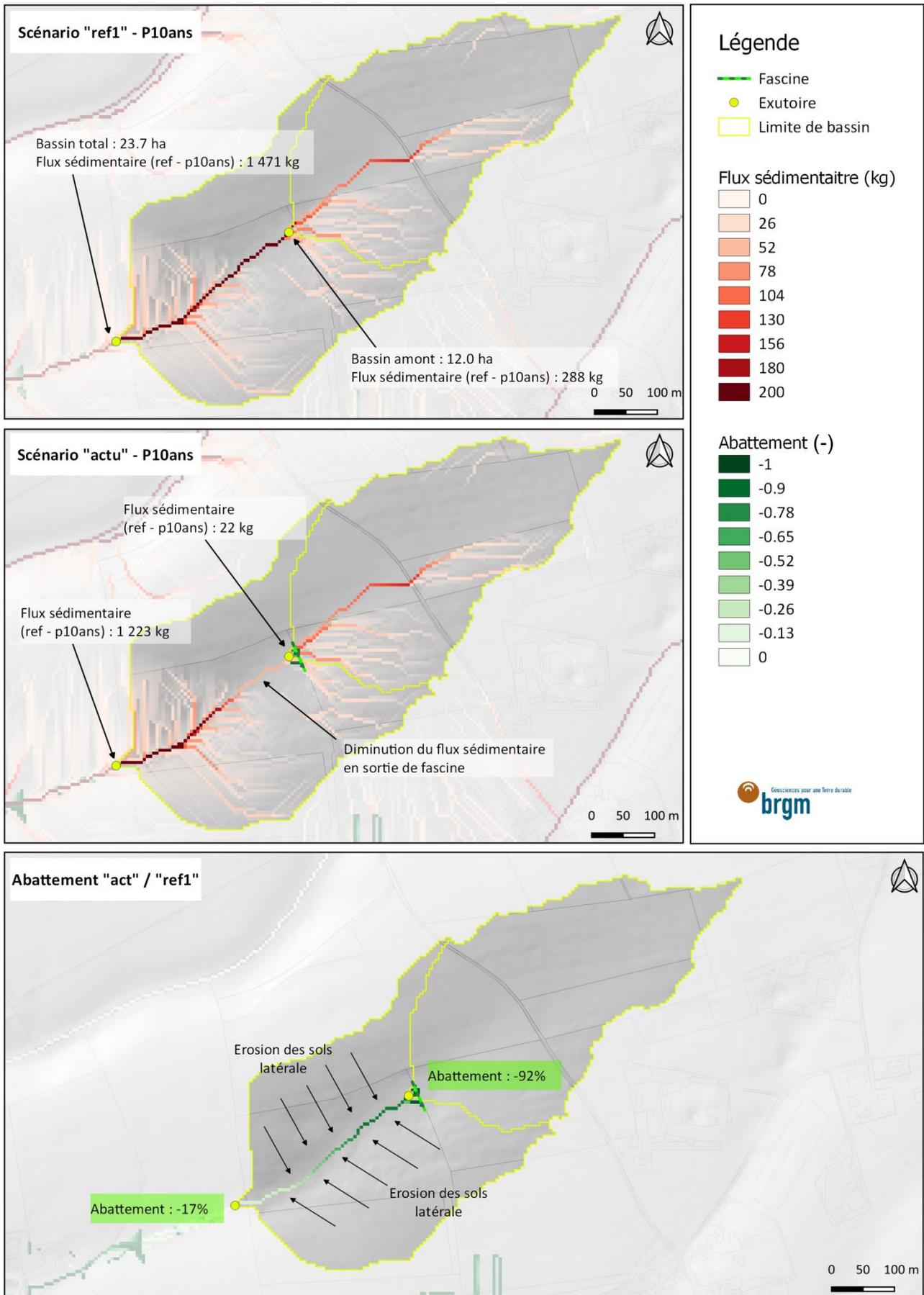


Figure 41 : Cas synthétique illustrant la diminution de l'impact d'une fascine avec l'augmentation de l'échelle spatiale. Les cartographies des flux sédimentaires présentées pour le scénario « ref1 » et « act » sont celles de la pluie de période de retour 10 ans.



Figure 42 : Cas synthétique illustrant le principe d'aménagement en cascade permettant de maintenir un abattement élevé aux différentes échelles spatiales.

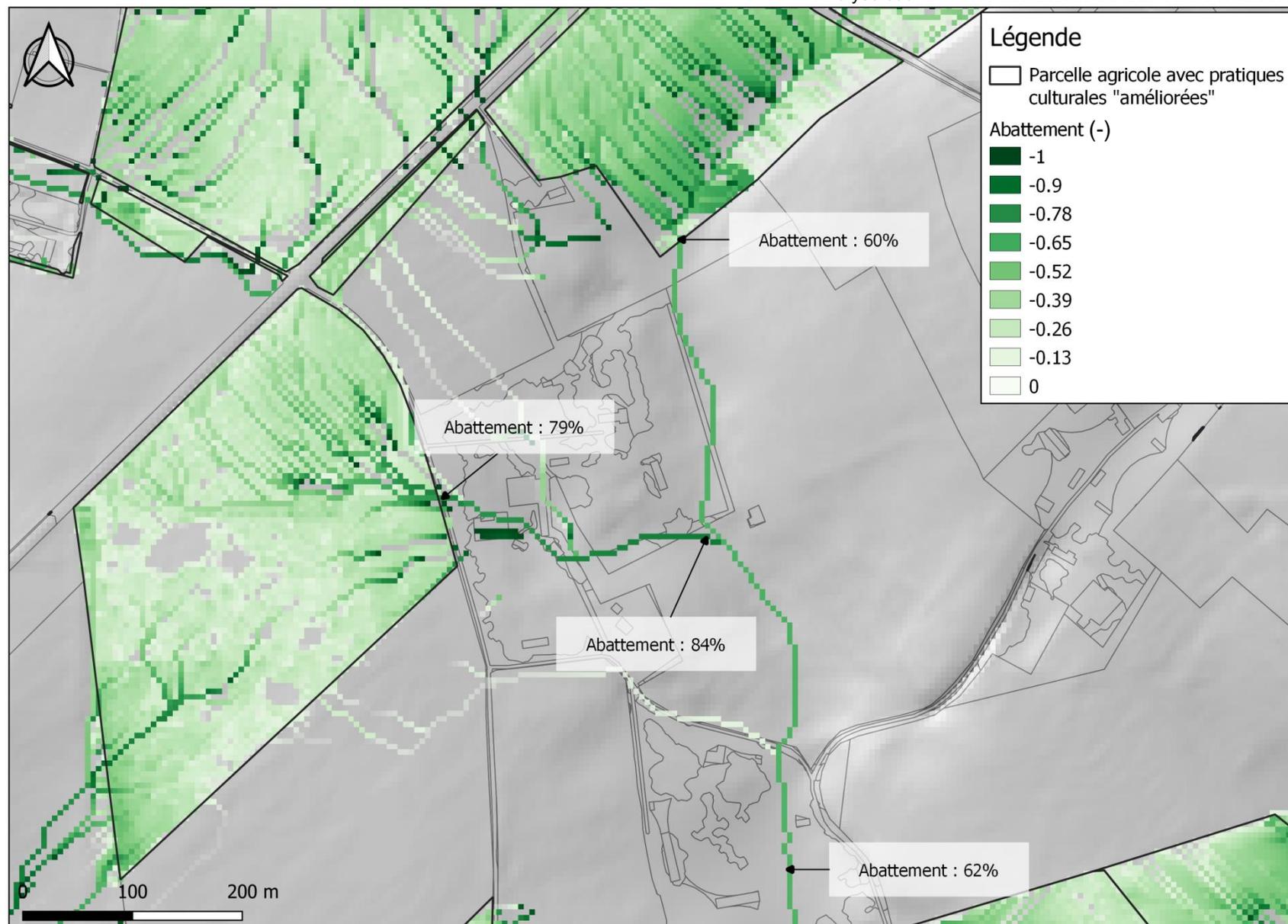


Figure 43 : Cas synthétique illustrant l'impact bénéfique de l'amélioration des pratiques culturales aux différentes échelles spatiales.

## 6.6. CARTOGRAPHIE DES ALÉAS

Après avoir vérifié la bonne cohérence des résultats des modélisations, une cartographie de l'aléa inondation et une cartographie de l'aléa coulée de boue a été produite par scénario et par pluie de projet. Concrètement, la cartographie de l'aléa inondation par ruissellement correspond à la cartographie des hauteurs d'eau et la cartographie de l'aléa coulée de boue à la cartographie des flux sédimentaires. Un extrait de chaque cartographie est présenté sur les Figure 44 et 45.



Figure 44 : Extrait de la cartographie des hauteurs d'eau pour le scénario « ref1 » et pour la pluie de période de retour 10 ans.

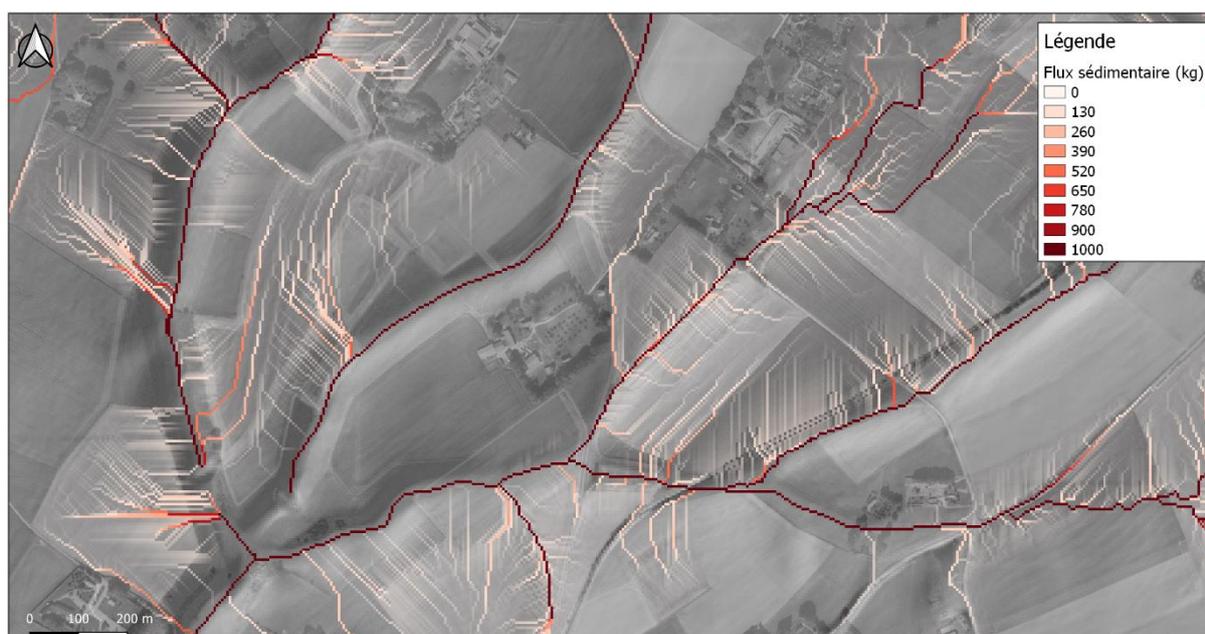


Figure 45 : Extrait de la cartographie des flux sédimentaires pour le scénario « ref1 » et pour la pluie de période de retour 10 ans.

### 6.6.1. Aléa inondation par ruissellement

La cohérence des cartographies de hauteur d'eau a également été vérifiée. L'emprise de l'inondation par ruissellement a été calculé par scénario et par pluie de projet (Figure 46).

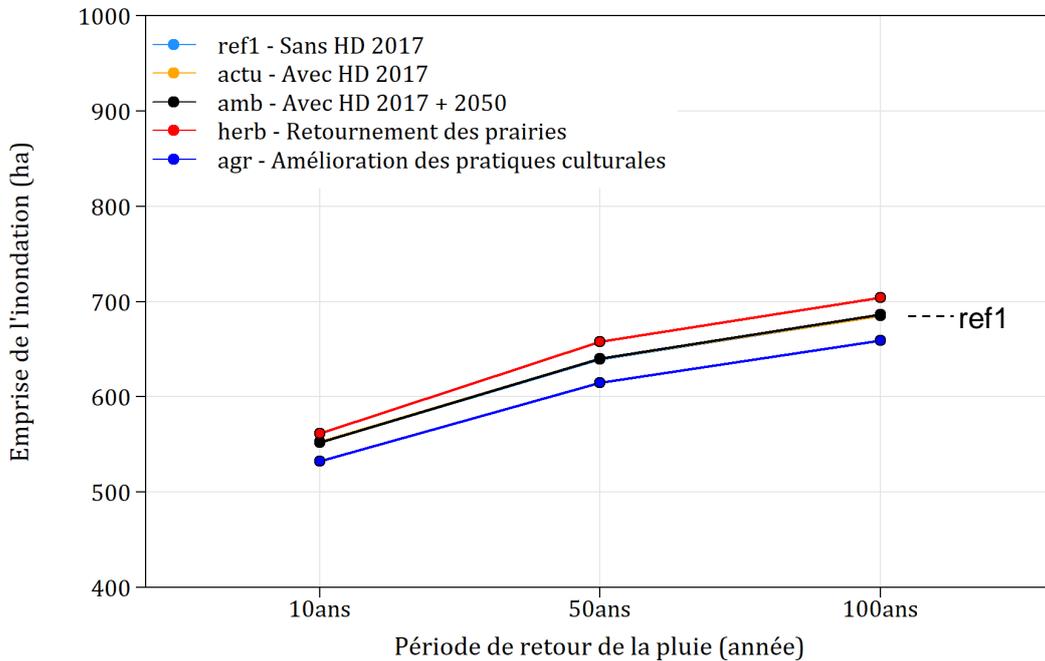


Figure 46 : Emprise de l'inondation pour chaque scénario et pour chaque pluie de projet sur le bassin de la Lézarde.

Les résultats sont accord avec ceux décrits au droit de la station de Montivilliers (Tableau 19). Le retournement des prairies (scénario « herb ») provoque une augmentation de l'emprise de l'inondation de +3 % par rapport au scénario « ref1 » pour P50ans (Tableau 20).

L'emprise de l'inondation est identique pour les scénarios « ref1 », « actu » et « amb ». Comme expliqué précédemment, les aménagements d'hydraulique douce n'ont pas vocation à écrêter les pics de crues ou à tamponner les volumes de ruissellement.

L'amélioration des pratiques culturales dans le scénario « amb » provoque une diminution du ruissellement à la source. La conséquence est une diminution de -4 % de l'emprise de l'inondation pour P50ans.

Ces augmentations et ces diminutions restent toutefois limitées, tout comme les différences d'emprise d'inondation entre les pluies de projet. Par exemple, pour le scénario « ref1 », l'emprise de l'inondation pour P10ans est de 522 ha et est de 685 ha pour P100ans, soit une augmentation de +19 %. Ce chiffre est à mettre en perspective avec les valeurs de débit de pointe pour ce même scénario : 0,79 m<sup>3</sup>/s pour P10ans et 11,0 m<sup>3</sup>/s pour P100 ans.

Scenario	Période de retour de la pluie					
	P10 ans		P50 ans		P100 ans	
	Surface (ha)	Diff (%)	Surface (ha)	Diff (%)	Surface (ha)	Diff (%)
ref1 - Scénario de référence BRGM	552		640		685	
actu - Hydraulique douce 2017	552	0 %	640	0 %	685	0 %
amb - Hydraulique douce 2017 + 2050	552	0 %	640	0 %	687	0 %
herb - Retournement de 1/3 des prairies	561	2 %	658	3 %	704	3 %
agr - Amélioration des pratiques culturales sur 50 % des cultures	533	-4 %	615	-4 %	659	-4 %

Tableau 20 : Emprise de l'inondation pour chaque scénario et pour chaque pluie de projet sur le bassin de la Lézarde.

Comme tout résultats de modélisation, il est nécessaire de garder un regard critique :

- Quelles sont les erreurs de prédiction des emprises d'inondation ?
- Quelles sont limites de la méthode de cartographie des inondations ?
- Est-ce que la précision des résultats dépend de la résolution des données d'entrée ?

La cartographie des inondations par ruissellement reste un exercice complexe car la largeur des écoulements est souvent très faible (quelque mètres) tout comme les hauteurs d'eau (de l'ordre de quelques cm). En remontant les talwegs, la topographie devient de moins en moins marquée ce qui rend difficile la délimitation de l'emprise d'inondation. Arrivé sur les plateaux, ce n'est plus la morphologie du fond de talweg qui limite l'emprise de l'inondation mais bien des objets anthropiques comme les routes, les fossés, les chemins agricoles, etc. Dès lors, la qualité de prédiction de l'emprise de l'inondation sera grandement dépendante de la qualité des données topographiques utilisées.

Dans cette étude, un MNT LIDAR d'une résolution de 5 m a été utilisé pour réaliser ces cartographies. Cette résolution est pertinente pour cartographier les inondations dans les principaux fonds de talweg mais montre ses limites aux extrémités du réseau d'axe de ruissellement, pour les raisons évoquées précédemment. A ce titre, il serait intéressant d'explorer l'influence de la résolution du MNT sur l'emprise de l'inondation par ruissellement.

Enfin, une analyse des erreurs de prédiction sur l'emprise de l'inondation aurait été intéressante. La cartographie de l'emprise d'inondation (par drone ou par images satellites) suite à un évènement majeur semble maintenant réalisable pour identifier les limites et les pistes d'amélioration de la méthode de cartographie des inondations par ruissellement.

### 6.6.2. Aléa coulée de boue

Les cartographies de flux sédimentaires ont pour objectif de fournir à l'ACB des données chiffrées sur les quantités de terre arrivant sur les enjeux pour les différents scénarios et pour les trois pluies de projet. Initialement, il était prévu de chiffrer trois types de dommages liés aux dépôts de sédiments :

- les coûts d'évacuation des sédiments déposés dans le bâti ;
- les couts de nettoyage des routes et des différents réseaux de communication ;
- les couts de curage des ouvrages de gestion des eaux de ruissellement.

Le chiffrage des coûts d'évacuation des sédiments déposés dans le bâti implique de connaître la quantité de sédiment déposé pour une hauteur d'eau donnée et une vitesse

donnée. De nombreuses recherches ont été menées sur l'élaboration d'une relation hauteur d'eau – hauteur de sédiment, mais les résultats ne sont pas encore aboutis.

L'évaluation des coûts de nettoyage des routes n'a également pas été possible, en l'absence de d'exemples documentés (volume de sédiments, emprise du tronçon de route à nettoyer, coût économique). Seul des données macro-économique ont pu être consultées. Une piste d'amélioration serait croiser le linéaire de routes concernés par ces données et de développer un indicateur de coût de nettoyage par mètre linéaire de route touchée.

Les cartographies de flux sédimentaires ont donc été utilisées pour chiffrer les coûts de curage des ouvrages de gestion des eaux de ruissellement. Le modèle WaterSed fournit en effet la quantité de terre piégée dans chaque ouvrage et l'analyse des données technico économiques sur 2000 -2017 a permis d'extraire un coût forfaitaire de curage des sédiments.

La quantité totale de sédiments piégés dans les ouvrages par scénario et par pluie de projet est présentée sur la Figure 47 et le Tableau 21.

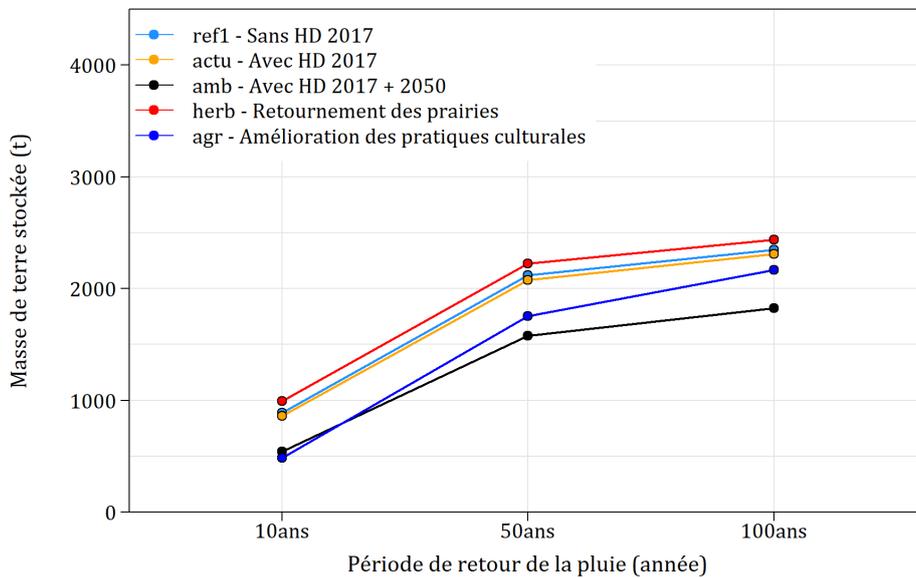


Figure 47 : Masse totale de sédiment piégée par l'ensemble des ouvrages du bassin de la Lézarde pour chaque scénario et chaque pluie de projet.

Scénario	Période de retour de la pluie					
	P10 ans		P50 ans		P100 ans	
	Sédiment (t)	Diff (%)	Sédiment (t)	Diff (%)	Sédiment (t)	Diff (%)
ref1 - Scénario de référence BRGM	891		2 118		2 347	
actu - Hydraulique douce 2017	859	-4 %	2 077	-2 %	2 311	-2 %
amb - Hydraulique douce 2017 + 2050	541	-39 %	1 577	-26 %	1 824	-22 %
herb - Retournement de 1/3 des prairies	994	12 %	2 226	5 %	2 439	4 %
agr - Amélioration des pratiques culturales sur 50% des cultures	486	-45 %	1 755	-17 %	2 167	-8 %

Tableau 21 : Masse totale de sédiment piégée par l'ensemble des ouvrages du bassin de la Lézarde pour chaque scénario et chaque pluie de projet.

Pour le scénario « ref1 », la masse de terre stockée par les ouvrages est 891 t pour P10ans, 2 118 t pour P50ans et 2 347 t pour P100ans.

La mise en place d'aménagements d'hydraulique douce dans le scénario « actu » entraîne une légère diminution de la masse de terre stockée par les ouvrages, de -2 % pour P50ans.

Le déploiement du programme d'aménagement d'hydraulique douce du scénario « amb » réduit encore davantage le flux sédimentaire entrant dans les ouvrages et ainsi la masse de terre stockée. La diminution atteint - 26 % pour P50ans.

Dans le scénario « agr », les dépôts de sédiments dans les ouvrages sont légèrement plus faibles que le scénario « amb » pour P10ans. Toutefois, ils deviennent plus importants pour P50ans et P100ans mais restent inférieurs au scénario « ref1 ». Ce croisement des deux courbes soulève des interrogations, puisque :

- l'érosion brute est plus faible dans le scénario « agr » que dans le scénario « amb » ;
- le flux sédimentaire à Montivilliers est plus faible dans le scénario « agr » que dans le scénario « amb ».

Théoriquement, la quantité de sédiment déposée dans les ouvrages devrait être plus faible dans le scénario « agr » que dans le scénario « amb ».

Pour expliquer ce comportement, un bilan de l'érosion pour P100ans a été réalisé pour le scénario « ref1 », « amb » et « agr » à l'échelle de la parcelle agricole, au droit des aménagements d'hydraulique et au droit des ouvrages (Tableau 22).

En fait, malgré une érosion brute plus forte dans le scénario « amb » que dans le scénario « agr » (10 841 t contre 8 427t), la présence d'aménagements d'hydraulique douce en amont des ouvrages permet de piéger 1 081 t de sédiments, limitant ainsi les dépôts de sédiments dans les ouvrages. Même si l'érosion brute est plus faible dans le scénario « agr », en l'absence d'aménagement d'hydraulique douce, on comprend alors pourquoi la quantité de sédiments piégés est plus importante dans les ouvrages.

Scenario	P100ans				
	Erosion brute (t)	Diff (%)	Dépôt hydraulique douce (t)	Dépôt ouvrage (t)	Diff (%)
ref1 - Scénario de référence BRGM	10 841			2 347	
amb - Hydraulique douce 2017 + 2050	10 717	-1 %	1 081	1 824	-22 %
agr - Amélioration des pratiques culturales sur 50 % des cultures	8 427	-22 %		2 167	-8 %

Tableau 22 : Bilan de l'érosion brute totale, des dépôts de sédiments totaux au droit des aménagements d'hydraulique douce, et des ouvrages pour P100ans sur le bassin de la Lézarde.

Au final, la mise en place de pratiques culturales améliorées permet bien de réduire à la source le ruissellement et l'érosion des sols, mais utiliser ce seul levier pour réduire les transferts sédimentaires ne sera pas suffisant et risque par exemple de provoquer un envasement plus fréquent des ouvrages de gestion des eaux de ruissellement. L'association avec des aménagements d'hydraulique douce positionnés à l'amont permet de pallier à ce problème.

À l'inverse, le retournement de 31 % des prairies dans le scénario « herb » aura pour effet une augmentation des flux sédimentaires sur le bassin versant et ainsi une augmentation de la masse de terre déposée dans les ouvrages, de l'ordre de +5 % pour P50ans.

## 7. Conclusion

L'objectif de cette partie a été de produire des cartographies de l'aléa inondation par ruissellement et coulée de boue sur le bassin de la Lézarde en vue d'alimenter l'analyse coût-bénéfice des actions de lutte contre le ruissellement et l'érosion des sols, présentée dans la seconde partie de ce rapport.

Contrairement aux inondations par débordement de cours d'eau, contraintes spatialement aux limites morphologiques de la vallée fluviale, la cartographie des inondations par ruissellement reste complexe à réaliser. Le ruissellement ne fait que quelques mètres de large et ne suit pas toujours les fonds de talwegs en raison d'éléments anthropiques modifiant la direction des écoulements (fossés, routes, chemins agricoles, etc.).

Dès lors, la cartographie de l'aléa inondation par ruissellement par modélisation implique l'intégration de ces éléments et la simulation du phénomène de manière distribuée sur l'ensemble du bassin versant. Cette étude a été l'occasion de démontrer le potentiel du modèle WaterSed pour répondre à ce besoin. La cartographie de l'aléa inondation par ruissellement et coulée de boue a été effectuée pour quatre scénarios d'occupation des sols et pour trois pluies de projet.

Un modèle hydraulique a été construit, intégrant 247 ouvrages structurants et 253 km d'axes de ruissellement. Le modèle a ensuite été calibré et validé sur des crues de référence, puis appliqué aux différents scénarios : (1) aménagement d'hydraulique douce actuel, (2) aménagement d'hydraulique douce actuel et futur, (3) retournement de 33 % des prairies et (4) amélioration des pratiques culturales sur 50 % des parcelles agricoles. Les résultats montrent que les aménagements d'hydraulique douce n'ont pas d'impact sur l'emprise de l'inondation par ruissellement et sur les volumes de ruissellement. Le retournement des prairies provoque une augmentation moyenne de +19 % des volumes de ruissellement et de +3 % des surfaces inondées. À l'inverse, l'amélioration des pratiques culturales réduit de 40 % les volumes et de 4 % les surfaces inondées.

Les contrastes de surfaces inondées sont faibles malgré l'utilisation d'un modèle numérique de terrain à haute résolution (5 m). Comme indiqué, le ruissellement ne fait que quelques mètres de large. Des contrastes plus marqués pourraient être observés avec une résolution métrique, notamment aux extrémités du réseau d'axe de ruissellement. À ce titre, des recherches pourraient être menées pour étudier l'influence de la résolution du modèle numérique de terrain sur l'emprise de l'inondation déterminée suivant la méthodologie développée dans ce rapport.



## **Partie 2 – Analyse coût-bénéfice**



# 1. Introduction

## 1.1. OBJECTIFS DE L'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE

L'évaluation économique vise à évaluer l'efficacité et l'efficacité des aménagements d'hydraulique douce (HD) et des ouvrages d'hydraulique structurante (HS) mis en œuvre depuis le début des années 2000 pour lutter contre les phénomènes de coulées boueuses (par l'HS et l'HD) et d'inondation par débordement des cours d'eau (par l'HS) sur le bassin versant de la Lézarde. La démarche d'évaluation proposée s'apparente aux évaluations *ex-post* de politiques publiques telles que recommandées dans le cadre de la modernisation de l'action publique engagée en décembre 2012 par le gouvernement.

Cette démarche d'évaluation doit permettre d'identifier les éventuels points d'amélioration spécifiques à la stratégie d'aménagement, ainsi que les effets de facteurs externes à cette politique d'aménagement, tels que l'évolution des pratiques agricoles et le changement climatique. L'objectif de cette évaluation est d'éclairer la prise de décision relative à la continuation de cette stratégie d'aménagement.

Dans le cas présent, la méthodologie d'évaluation repose sur une analyse coût-bénéfice (ACB) des ouvrages d'HD et d'HS sous différents scénarios.

L'évaluation économique des projets de lutte contre les inondations est un exercice classique et richement documenté par la littérature scientifique et plusieurs guides méthodologiques. L'originalité du travail proposé ici réside dans la réalisation, sur un même bassin versant, d'une analyse coût-bénéfice concernant non seulement les phénomènes d'inondation par débordement de cours d'eau, mais aussi des phénomènes de coulée de boue provoquée par l'érosion des versants.

S'agissant de la première tentative d'une telle évaluation, les outils d'évaluation économique utilisés (fonctions de dommage, indicateurs synthétiques de performance, etc.) sont principalement ceux utilisés en routine pour l'évaluation des projets de lutte contre l'inondation.

## 1.2. PRINCIPE DE L'ANALYSE COÛT-BÉNÉFICE

**L'ACB est une méthode d'évaluation économique** qui représente les avantages et inconvénients sur une échelle de valeur commune (la monnaie). L'ACB mobilise plusieurs indicateurs synthétiques (CGDD, 2018).

Le DMA (Dommage Moyen Annuel) permet de synthétiser les dommages subis par un territoire en tenant compte des différents événements d'inondations qui peuvent s'y produire. Il intègre, pour chaque type d'événement (événement fréquent à très rare), les dommages qui lui sont associés. La situation réelle modélisée en croisant les périodes de retour de l'aléa et les dommages associé est alors équivalente en termes de dommages à une situation fictive dans laquelle chaque année un dommage moyen se produit. Un DMA a été calculé pour chacun des scénarios étudiés. Le DMA d'un scénario correspond à l'aire sous la courbe fréquentielle de dommage de ce scénario (Figure 58).

Le DEMA (Dommages Evités Moyens Annuels) synthétise les bénéfices monétaires totaux d'un scénario avec action d'adaptation. Il correspond aux bénéfices réalisés sur un territoire grâce au projet en tenant compte de tous les événements d'inondation qui peuvent s'y produire. Le DEMA est égal au DMA du territoire sans projet (situation de référence = ref 0 ou ref 1) auquel on soustrait le DMA sur le territoire avec aménagements et sous les différentes hypothèses spécifiques à chaque scénario.

À partir du DEMA et des coûts du projet, on peut calculer la valeur actualisée nette (VAN) du projet qui mesure les flux économiques générés par le projet (les bénéfices moins les coûts).

La VAN est calculée ainsi :

$$VAN = BTA - CTA = \sum_{i=1}^n \frac{DEMA_i}{(1+r)^i} - \sum_{i=1}^n \frac{CI_i + CE_i}{(1+r)^i}$$

Avec :

BTA	Bénéfices totaux actualisés
CTA	Coûts totaux actualisés
DEMA <sub>i</sub>	Les DEMA de l'année i
r	Le taux d'actualisation
CI <sub>i</sub>	Les coûts d'investissements de l'année i
CE <sub>i</sub>	Les coûts d'exploitation de l'année i

Dans le cas des projets de protection contre les inondations, le montant de la VAN peut s'interpréter comme le montant des bénéfices pour la société réalisés grâce aux dommages évités par le projet, une fois déduits les coûts associés à ce projet.

Une autre façon d'exprimer l'efficacité d'un projet est le ratio des bénéfices totaux actualisés sur les coûts totaux actualisés. Le ratio B/C peut s'interpréter comme le retour sur investissement de chaque euro investi dans le projet.

Si la VAN est positive ou bien si le rapport B/C est supérieur à 1, la mesure étudiée, sur le périmètre géographique retenu et selon les enjeux et les types de dommages pris en compte, est rentable d'un point de vue économique.

### 1.3. VUE D'ENSEMBLE DE LA DÉMARCHE

La figure suivante illustre les étapes suivies pour la réalisation de l'ACB appliquée aux risques d'inondation et de coulée de boue.

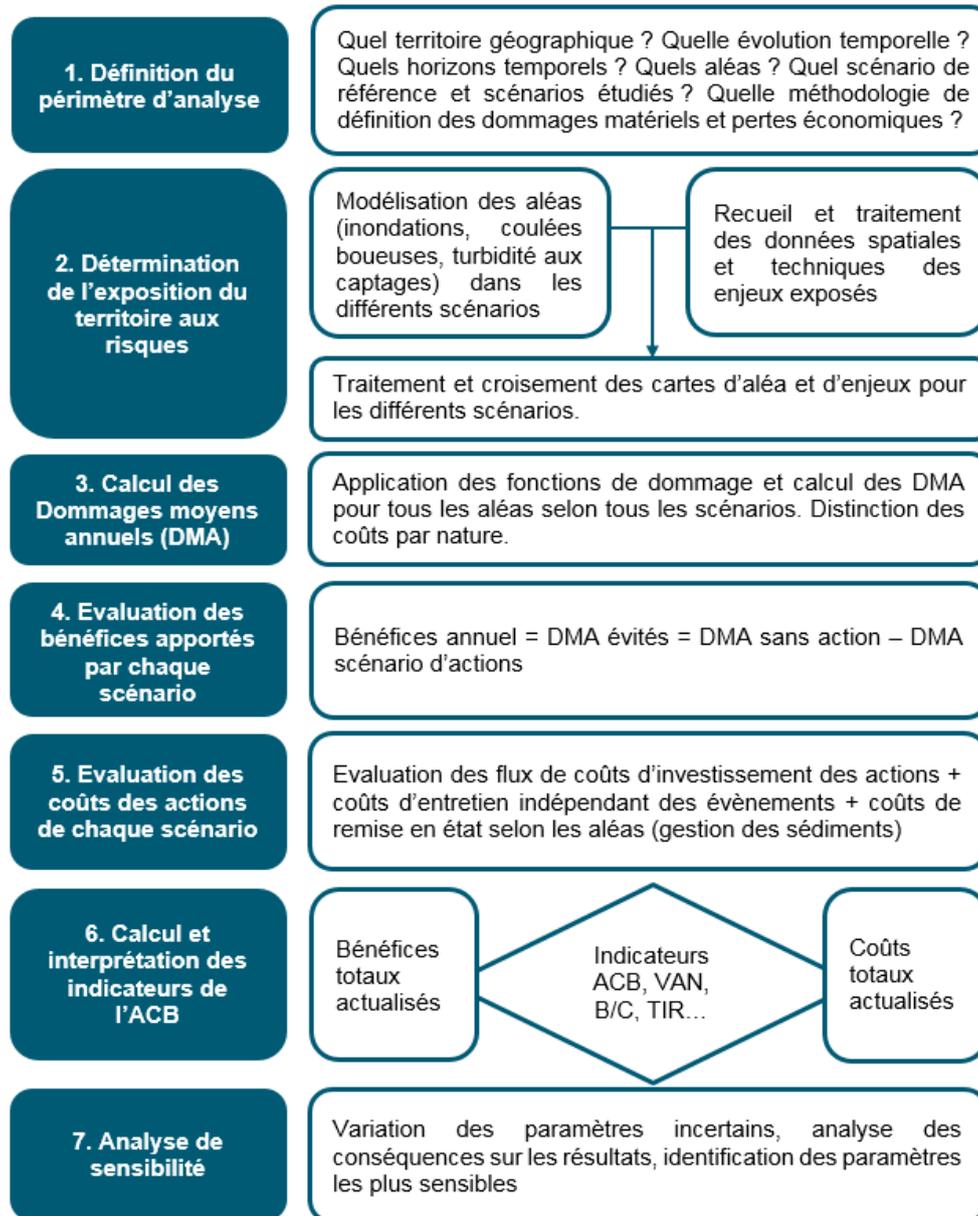


Figure 48 : Synoptique des grandes étapes de l'ACB, adapté de (Cepri, 2011).

Les éléments méthodologiques de base appliqués pour l'application de l'ACB (en particulier les fonctions de dommage) correspondent à ceux présentés dans le guide méthodologique en vigueur au moment de la rédaction de ce rapport, à savoir le guide de la collection Théma publiée par le Commissariat Général du Développement Durable (CGDD) relatif à l'Analyse multicritère des projets de prévention des inondations (CGDD, 2018).



## 2. Définition du périmètre d'analyse

### 2.1. ÉCHELLE SPATIALE ET MODÈLES PHYSIQUES

La zone d'étude concerne l'ensemble du bassin versant de la Lézarde.

Pour l'évaluation des aléas, la zone d'étude est le bassin versant de la Lézarde, mais pour l'évaluation économique la zone d'étude se restreint aux espaces touchés par les aléas. L'identification des enjeux potentiellement endommagés a été possible dès l'obtention des cartes d'aléas maximums modélisés (Q100) issus des modélisations de débordement de cours d'eau et ruissellement dans les talwegs principaux (modèle Mike et modèle Watersed) et de coulée boueuse par ruissellement de surface (modèle Watersed). Toutes les données relatives à ces modélisations sont détaillées dans le volume 2.

La concaténation de ces enveloppes d'aléa donne la zone d'étude totale. C'est dans cette zone que les enjeux ont été caractérisés afin de pouvoir appliquer les fonctions de dommage.

### 2.2. HORIZON TEMPOREL ET ACTUALISATION

Que ce soit pour une évaluation ex-ante (avant la réalisation des ouvrages) ou ex-post telle que réalisée ici, une période de 18 ans (2000 – 2017) est trop courte pour évaluer l'intérêt économique d'investissements de long terme. L'échelle temporelle d'évaluation doit se rapprocher de la durée de vie des ouvrages qui dans notre cas peut être de 50 ans ou plus, sous l'hypothèse d'un entretien rigoureux. En effet, réaliser l'évaluation économique ex-post de la pertinence des ouvrages hydraulique en se basant exclusivement sur les données relatives aux événements ayant eu lieu ces 18 dernières années ne permettrait pas de juger de la pertinence des actions mises en oeuvre. Une telle approche consisterait à ne comptabiliser que ce qui s'est réellement passé (chroniques historiques de pluies des 18 dernières années) et à ignorer ce qui aurait pu se passer (sur la base de chroniques de pluies plus longues). Autrement dit, dans une évaluation ex-post, le caractère imprévisible de l'occurrence des événements climatiques doit être intégré. L'évaluation est donc réalisée sur un horizon temporel de 50 ans ; de 2000 à 2050. L'année zéro de l'ACB est l'an 2000 car c'est cette année-là que la principale vague d'investissement a été observée<sup>5</sup>.

Pour le calcul économique, le taux d'actualisation utilisé est de 2,5 %, conformément aux recommandations du rapport dit Quinet relatif à l'évaluation socioéconomique des investissements et publié par le Commissariat général à la stratégie et à la prospective (CGSP, 2013). Le système d'actualisation des flux économiques permet de ramener l'ensemble des flux économiques aléatoires réels produit tout au long de la vie du projet en une valeur présente équivalente. Sans rentrer dans les détails théoriques et méthodologiques, rappelons que l'application d'un taux d'actualisation permet de retranscrire dans le calcul divers phénomènes économiques dont les principaux sont la balance entre la préférence pour le présent et la volonté d'équité intergénérationnelle, le coût d'opportunité des dépenses présentes alternatives, et le coût de financement de l'investissement public. Rappelons que ce taux n'a rien à voir avec le taux d'inflation, utilisé par ailleurs pour harmoniser les prix utilisés sur la base de l'année 2000 qui est l'année de base pour cette évaluation.

---

<sup>5</sup> Quelques ouvrages significatifs ont été réalisés avant l'an 2000 et ont été intégrés aux modélisations physiques et économiques sous l'hypothèse qu'ils ont été mis en service cette année-là.

Les fonctions de dommages proposées dans le guide de référence utilisé sont exprimées en euros de 2016 et l'année de base de l'ACB étant l'an 2000, ces coûts ont été corrigés de l'inflation. Les montants de dommage aux logements, aux établissements économiques et aux établissements publics ont été corrigés par un coefficient de 0,67 calculé à partir de l'indice du coût de la construction (ICC)<sup>6</sup>. Les montants de dommages aux activités agricoles ont été corrigés par un coefficient de 0,72 calculé à partir de l'indice mensuel des prix agricoles à la production (IPPAP)<sup>7</sup>.

Mis à part cette correction des prix de l'inflation pour tous les exprimer en euros de l'année 2000, le calcul économique est réalisé en monnaie constante. Cela signifie que seule la valeur de l'euro de l'année 2000 est utilisée pour l'ensemble de l'horizon temporel d'évaluation.

### **2.3. TYPES DE DOMMAGES CONSIDÉRÉS**

Conformément au guide de référence (CGDD, 2018), l'évaluation se restreint aux coûts directs (dommages physiques aux biens) et les coûts indirects induits par les dommages ne sont pas évalués. Ainsi, il n'est pas nécessaire d'élargir la zone d'étude pour inclure l'ensemble du tissu économique potentiellement indirectement impacté par les aléas modélisés.

Pour rappel, les coûts indirects sont constitués des pertes imputables au non-usage d'un bien impacté physiquement (capital productif d'une entreprise, routes, réseaux électriques ou téléphoniques...) et la diffusion dans le système économique de ces impacts directs. Quelle que soit la méthode sélectionnée, une telle évaluation nécessite un effort de modélisation et de recueil de données qui va au-delà du cadre de la présente étude. Les pertes de service public induites par les impacts directs aux établissements publics ou par la mobilisation des équipements publics ont également des conséquences indirectes qu'il est très délicat d'évaluer.

Les seuls coûts indirects pris en compte sont ceux subis par les institutions gestionnaires des services d'eau pour s'adapter aux pics de turbidité induits par les engouffrements dans le karst des écoulements turbides de surface (cf. Volume 4). Cette évaluation des coûts pour l'AEP n'est pas incluse dans la présente analyse coût-bénéfice car l'aire d'étude n'est pas la même. Cette analyse est réalisée par ailleurs, dans le rapport de volume 4.

---

<sup>6</sup> <https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/000008630>

<sup>7</sup> <https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010538794>

## 3. Détermination de l'exposition du territoire au risque

### 3.1. MODÉLISATION DES ALÉAS ET SCÉNARIOS CONSIDÉRÉS

Le calcul des dommages par les fonctions de dommages préconisées dans le guide du CGDD nécessite que les résultats de modélisation hydrauliques précisent en tout point:

- la hauteur de submersion (pour tous les types de dommages) ;
- la vitesse d'écoulement exprimée en classe qualitative (pour les dommages aux activités agricoles) ;
- la durée de submersion exprimée en classe qualitative (pour tous les types de dommages) ;
- la saisonnalité de l'évènement (pour les dommages aux activités agricoles).

Pour le calcul du Dommage Moyen Annuel (DMA) il est recommandé de prendre en compte l'aléa de premier dommage (déjà défini dans le Tableau 24 et Tableau 25), des aléas faibles, moyens et fort (Q10, Q50 et Q100 modélisés) et un aléa d'occurrence extrême (au-delà de la centennale). Par hypothèse, l'aléa extrême considéré est d'une période de retour infinie et le montant des dommages pour un tel évènement correspond à ceux de l'évènement centennal majorés par un coefficient de 1,5 (Eleuterio *et al.*, 2008).

Les sept scénarios étudiés sont présentés en détail dans le chapitre 6 de la première partie du rapport. Pour chaque scénario, différents résultats de simulation sont utilisés. Le Tableau 23 présente une synthèse des résultats de modélisation des aléas utilisés dans chacun des scénarios.

- ref0 : scénario de référence sans aucun ouvrage, ni hydraulique structurante (HS) ni hydraulique douce (HD) ni changement climatique ;
- ref1 : scénario de référence sans ouvrages HD mais avec HS ;
- actu : avec aménagements actuels donc avec HD et HS – 2018 ;
- amb : scénario d'aménagement « ambitieux » HD basé sur la mise à jour du programme d'aménagements d'HD sur le BV de la Lézarde(SMBV Pointe de Caux Etretat, août 2019) ;
- ccm : avec aménagements actuels et changement climatique hypothèse moyenne en 2050 ;
- ccf : avec aménagements actuels et changement climatique hypothèse haute en 2050 ;
- herb : avec aménagement actuels et réduction d'un tiers des surfaces herbe en 2050 (par rapport à ref0) ;
- agr : avec aménagement actuels et amélioration des pratiques agricoles sur 50% des surfaces en culture.

Scénarios		ref0	ref1	actu	amb	ccm	ccf	herb	agr
Aléas									
Inondation rivière et talweg	Q10	Q10_ref0	Q10_actu			Reprise des résultats de ref 0, ref1 et actu avec changement des probabilités d'occurrence. Voir tableaux suivants		Q10_herb	Q10_agr
	Q50	Q50_ref0	Q50_actu					Q50_herb	Q50_agr
	Q100	Q100_ref0	Q100_actu					Q100_herb	Q100_agr
Érosion	P10		P10_ref1	P10_actu	P10_amb			P10_herb	P10_agr
	P50		P50_ref1	P50_actu	P50_amb			P50_herb	P50_agr
	P100		P100_ref1	P100_actu	P100_amb			P100_herb	P100_agr

Tableau 23 : Synthèse des résultats de modélisation des aléas utilisés pour le calcul économique dans chacun des scénarios.

Pour les scénarios CCm et CCf, les résultats de modélisation des scénarios de référence (ref0 et ref1) sont réutilisés pour les scénarios avec changement climatique sans ouvrage et les résultats du scénario actuel (actu) pour ceux avec ouvrage. La prise en compte du changement climatique réside dans l'augmentation de la fréquence des évènements modélisés de base. Les détails méthodologiques relatifs à la construction des scénarios de changement climatique sont présentés dans le volume 2. Les scénarios ref0, ref1 et actu sont chacun déclinés en 3 variantes ; sans prise en compte du CC, avec CCm et avec CCf.

L'estimation de la période de retour de l'évènement de premiers dommages<sup>8</sup> (hors changement climatique) est basée :

- pour les communes couvertes par la modélisation Mike (débordement de cours d'eau et ruissellement dans les principaux talwegs) : sur l'exploitation des arrêtés Cat Nat depuis 1982 (base de données Gaspar) en distinguant les périodes avant 2000 (« sans ouvrage ») et après 2000 (« avec ouvrages ») ;
- pour les autres territoires concernés par des phénomènes de coulées boueuses : à dire d'expert.

	sans CC		Avec CC moyen		Avec CC fort	
	sans ouvrage	avec ouvrage	Sans ouvrage	Avec ouvrage	Sans ouvrage	Avec ouvrage
Premiers dommages	2 ans	5 ans	20 mois	4 ans	16 mois	4 ans
Dommages modélisés	10 ans	10 ans	9 ans	9 ans	8 ans	8 ans
	50 ans	50 ans	45 ans	45 ans	35 ans	35 ans
	100 ans	100 ans	80 ans	80 ans	65 ans	65 ans

Tableau 24 : Périodes retours retenues pour la prise en compte du changement climatique dans la modélisation des phénomènes de débordement.

<sup>8</sup> On appelle évènement de premier dommage l'aléa de plus faible intensité causant des premiers dommages. Théoriquement, tout aléa plus fréquent ne cause pas de dommage et tout aléas moins fréquent cause plus de dommages.

	sans CC		Avec CC moyen		Avec CC fort	
	sans ouvrage	avec ouvrage	Sans ouvrage	Avec ouvrage	Sans ouvrage	Avec ouvrage
Premiers dommages	6 mois	6 mois	5 mois	5 mois	4 mois	4 mois
Dommages modélisés	10 ans	10 ans	9 ans	9 ans	8 ans	8 ans
	50 ans	50 ans	45 ans	45 ans	35 ans	35 ans
	100 ans	100 ans	80 ans	80 ans	65 ans	65 ans

Tableau 25 : Périodes retours retenues pour la prise en compte du changement climatique dans la modélisation des phénomènes de coulée boueuse.

### 3.2. CARACTÉRISATION DES ENJEUX EXPOSÉS

Le guide (CGDD, 2018) fournit les fonctions de dommages directs moyennes nationales pour les catégories d'enjeux suivantes : les logements, les entreprises, les activités agricoles, et les établissements publics. L'application des fonctions de dommage nécessite une connaissance suffisante des enjeux exposés et de l'aléa au droit de chaque actif exposé.

Tous les enjeux sont caractérisés sous SIG. La BD topo 2016 fournie par l'IGN est utilisée comme base de travail. Des champs supplémentaires sont rajoutés aux couches de bâti pour y intégrer les données complémentaires nécessaires. Ces compléments sont issus de résultats de traitements réalisés directement sous SIG ou des données récoltées via des bases de données externes, l'interprétation d'orthophotos, l'utilisation de Google Street View, et des visites de terrains. Une partie des données collectées et incrémentées aux polygones de bâti est spécifique aux trois types de bâtiments considérés ; logements, établissements économiques, et établissements publics. Un même bâtiment peut abriter différents usages selon les étages mais c'est toujours l'usage du rez-de-chaussée (exposé à l'inondation) qui prime sur la qualification du bâti. Les attributs communs à l'ensemble des bâtiments investigués sont les suivants :

- Type d'enjeux :
  - logement,
  - établissement économique,
  - établissement public ;
- Surface de plancher :
  - 75 % de la surface du polygone, calculé par requête sous Arc GIS conformément au guide du CGDD ;
- Hauteur du plancher :
  - identifié par Google Street view ou visite de terrain ; comptage du nombre de marches entre le terrain naturel et le seuil de porte sachant que la hauteur moyenne d'une marche est de 16cm ;
- Nom de la commune :
  - Requête Arc GIS.

Pour les bâtiments, la hauteur de seuil (hauteur entre le terrain naturel et le premier plancher habitable) est soustraite à la valeur de hauteur d'eau pour obtenir la hauteur d'inondation dans le bâti. C'est cette valeur finale qui est utilisée pour l'application des fonctions de dommage.

Pour la caractérisation sous SIG des bâtis exposés, des champs ont été rajoutés à chaque polygone d'habitation pour permettre l'application des fonctions de dommage :

- Type de logement :
  - collectif,
  - individuel ;
- Présence de sous-sol :
  - avec sous-sol,
  - sans sous-sol ;
- Présence d'étage :
  - logement individuel avec étage,
  - logement individuel sans étage.

Après simple croisement des couches bâti de la BD TOPO avec les premiers résultats préliminaires des modélisations hydrauliques d'occurrence centennale (Mike et Watersed) auxquels sont rajoutés une zone tampon de 200 mètres, il est identifié qu'un peu moins de 3 400 polygones de bâtis sont potentiellement touchés.

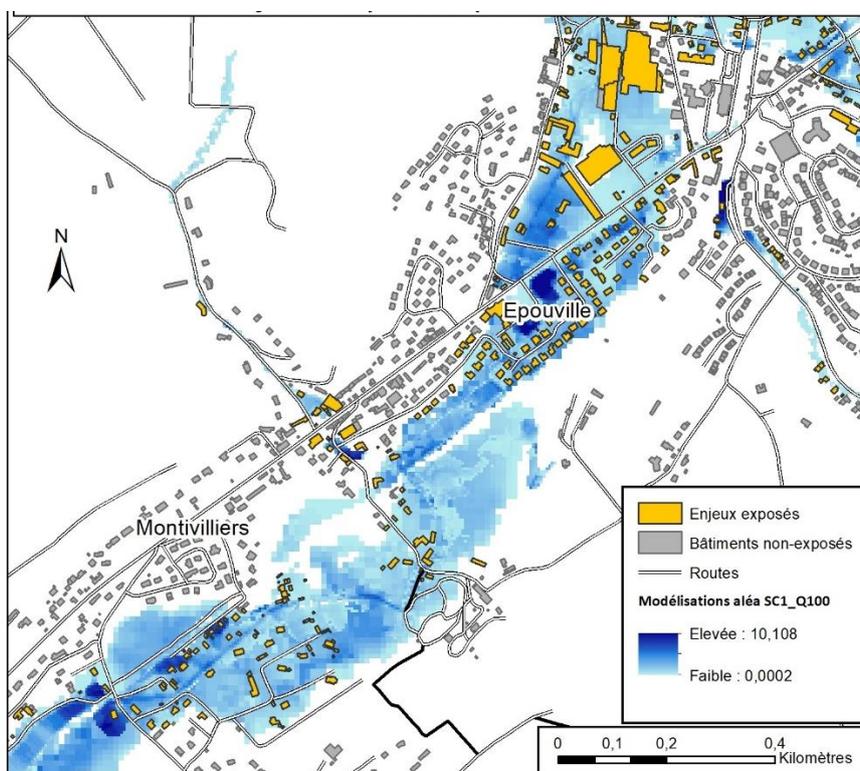


Figure 49 : Zoom sur une zone exposée à l'inondation par débordement d'occurrence centennale et identification des enjeux exposés.

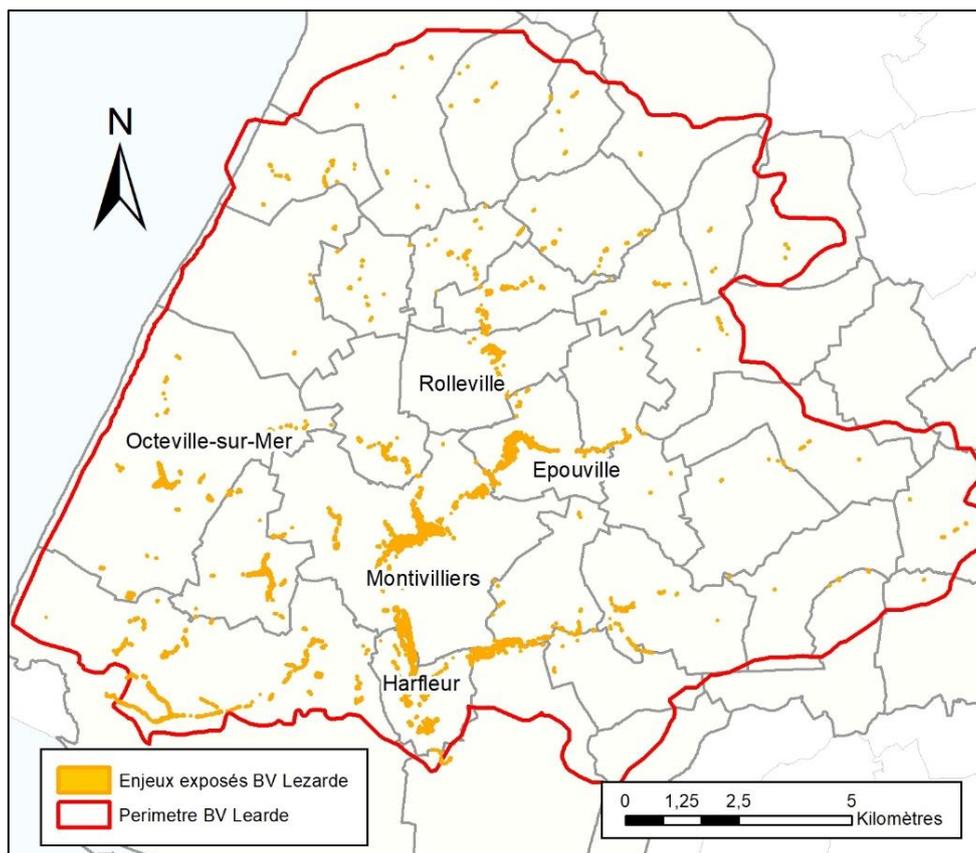


Figure 50 : Répartition géographique des bâtiments exposés aux aléas d'occurrence centennale.

Conformément aux recommandations du guide de référence (CGDD, 2018), un nettoyage des polygones de bâti a été réalisé pour éliminer tous ceux correspondant à du faux bâti ou à des bâtis non éligibles à l'application des fonctions de dommages. Les polygones inférieurs à 20m<sup>2</sup> ont été supprimés par requête SIG, puis, en cours de reconnaissance (bureau puis terrain), les garages, abris de jardin, cabanes, et bâti inexistant ont été supprimés. Après ce nettoyage, il restait 2 070 polygones. Au final c'est environ 32 % des polygones exposés initialement (en unité) qui ont été supprimés par rapport à la BD topo originale, ce qui représente une suppression de seulement 3 % de surface totale de bâti.

Lors des campagnes de reconnaissance depuis le bureau ou depuis le terrain, un total de 50 polygones a dû être créé pour représenter des bâtiments non existants sur la BD topo. Dans certains cas, la BD cadastre (produite par l'IGN) était plus à jour que la BD topo et a donc été utilisée pour l'incrémentation de nouveaux polygones.

Sachant qu'un même établissement économique (entreprise) ou établissement public peut être composé de plusieurs bâtiments, le nombre total de bâtis (polygones) est supérieur au nombre d'établissements potentiellement exposés.

Bâti exposé inondation	Potentiellement touché par une inondation	Potentiellement touché par une coulée boueuse	Qualifié depuis le bureau	Qualifié sur le terrain	Total potentiellement touché	% du total de bâti exposé
Logement	1 354	277	1 436	195	1 631	79 %
Etablissements économiques	298	35	289	44	333	16 %
Etablissement public	96	10	95	11	106	5 %
<b>TOTAL</b>	<b>1 748</b>	<b>322</b>	<b>1 820</b>	<b>250</b>	<b>2070</b>	<b>100 %</b>

Tableau 26 : Synthèse des bâtiments exposés au risque et qualifiés pour les besoins de l'ACB.

La campagne de visite de terrain s'est déroulée sur une semaine. L'enquêteur sigiste était équipé d'une tablette équipée de collecteur for ArcGIS (solution ESRI) dans laquelle il avait préalablement chargé les bases de données spatialisées des enjeux et préparé des menus déroulants pour faciliter la saisie.

## 4. Évaluation des dommages

### 4.1. PRINCIPES DES FONCTIONS DE DOMMAGE

Une fonction de dommage est une fonction mathématique qui permet d'exprimer en euros les dommages subis par un enjeu selon les caractéristiques de l'enjeu et les caractéristiques de l'aléa. Les dommages aux enjeux considérés sont fonction de la hauteur d'eau, de la surface inondée et de la durée d'inondation. L'annexe 1 présente un extrait de la visualisation cartographique du croisement entre les aléas et les enjeux.

Ce chapitre présente en détail les éléments considérés pour l'application des fonctions de dommage spécifiques à chaque type d'enjeu. Seules des fonctions de dommage existantes ont été utilisées. Il s'agit des fonctions de dommage présentées dans le guide méthodologique de 2018 « Analyse multicritère des projets de prévention des inondations » (CGDD, 2018). La charge en sédiment n'est pas prise en compte pour évaluer les dommages aux enjeux exposés. Les dommages causés par les coulées de boues sont évalués avec les mêmes fonctions de coût que les inondations standard.

On distingue deux grands types de fonction de dommage ; une fonction de dommage surfacique donne un coût de dommage par mètre carré alors qu'une fonction de dommage par unité de bien donne un coût par bâtiment exposé.

Pour l'application des fonctions de dommage, il est nécessaire de connaître la hauteur d'eau au droit de chaque enjeu exposé. Cela nécessite un traitement particulier des cartographies résultats des simulations d'aléa. Sous SIG, un polygone de bâti peut être totalement inclus ou partiellement intersecté par un aléa. Dans le premier cas, le nouveau polygone d'exposition obtenu par ce croisement fait exactement la même taille que le polygone de bâti initial. Dans le second cas, le croisement entre le bâti et l'aléa donne un nouveau polygone d'exposition de surface inférieure à celle du bâti.

Dans un cas comme dans l'autre, le bâti exposé peut être concerné par différentes hauteurs d'eau. Dans ce cas, une analyse par statistique zonale permet d'appliquer à l'ensemble de la surface exposée la hauteur d'eau moyenne.

Il est tentant d'utiliser les coûts du bilan économique (réalisé en parallèle) pour adapter les fonctions de dommage aux spécificités du territoire d'étude et des coulées boueuses. Cependant, faire reposer l'évaluation monétaire des dommages sur le montant des indemnités issu des rapports d'assurance collectés sur les communes touchées n'est pas recommandé (CGDD, 2018) et requiert un travail très conséquent qui va bien au-delà du cadre de cette étude. L'absence des données d'aléa dans les dossiers d'assurance nécessite un traitement des chroniques de précipitation pour définir l'aléa correspondant à l'évènement pour lequel les coûts ont été observés. Mais même une fois ce travail réalisé se pose la difficulté d'évaluer la représentativité des données d'assurance, et le problème des écarts entre les coûts indemnisés et les coûts économiques (André, 2013). Pour finir, les coûts indemnisés correspondent généralement à des coûts de réparation ou de remplacement à neuf en TTC alors que dans le calcul économique, les taxes sont exclues (transfert neutre entre acteurs économiques) et les dommages sont calculés avec déduction de la vétusté.

Il existe des fonctions de dommage pour des durées d'inondation inférieures et supérieures à 48 h. Dans notre cas, les durées de submersion sont toujours inférieures à 48 h.

## 4.2. DOMMAGES AUX LOGEMENTS

Les fonctions de dommage au bâti, au sous-sol, et aux mobiliers sont utilisées. Compte tenu de l'ampleur des bâtiments d'habitation potentiellement exposés (plus de 1 600), des fonctions de dommage surfaciques sont préférées aux fonctions de dommage à l'entité de bien.

Les fonctions de dommage surfaciques consistent à prendre en compte la surface de bien impacté indépendamment du nombre d'entité. Par exemple, avec une approche surfacique, les dommages subis par le rez-de-chaussée d'un immeuble seront estimés selon la surface inondée de cet immeuble sans avoir besoin de dénombrer le nombre de logements concernés.

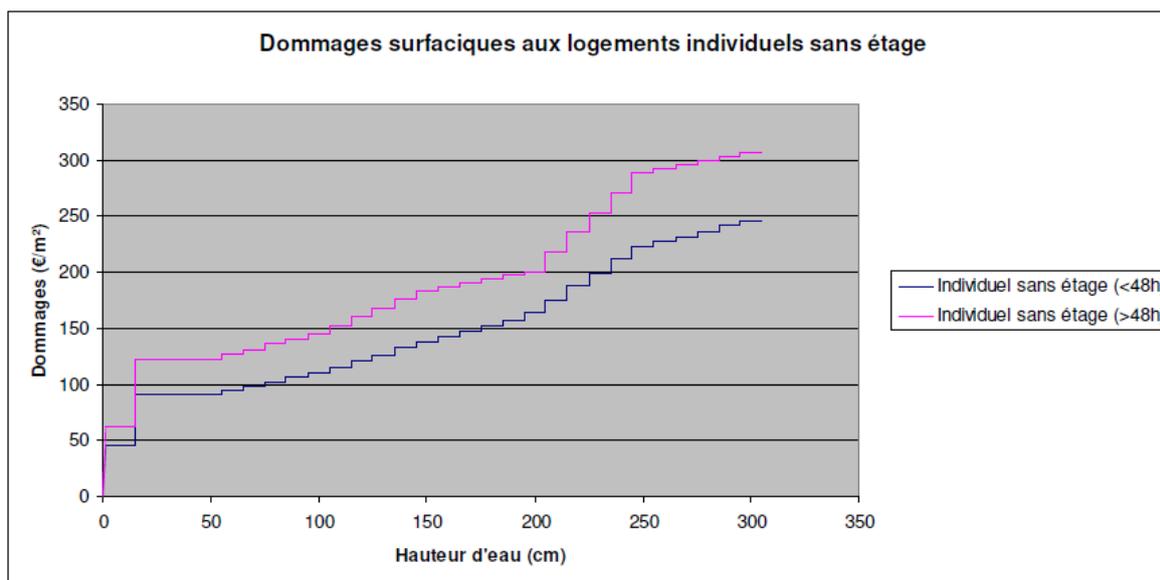


Figure 51 : Exemple de fonctions de dommage utilisées extraites du guide du CGDD de 2018.

## 4.3. DOMMAGES AUX ÉTABLISSEMENTS ÉCONOMIQUES

### 4.3.1. Méthode générale

Deux types de fonctions de dommage aux établissements économiques sont appliqués :

- fonctions de dommages au bâti moyennés surfacique : donne les dommages aux bâtis par m<sup>2</sup> ;
- fonctions de dommage aux stocks et équipements moyennés par employé : donne les dommages aux stocks et aux équipements par employé ;

Il existe une fonction de dommage pour 577 codes NAF (Nomenclature d'Activité Française) différents, il a été nécessaire de préciser pour chaque établissement son code NAF et son effectif moyen. À cette fin, lors de l'identification des établissements économiques (Google Street View et terrain), le nom de l'établissement a été recueilli afin de pouvoir le retrouver sur la base de donnée SIRENE qui contient les informations nécessaires (NAF et effectif). Au total, 238 établissements ont été qualifiés de la sorte.

Pour l'application des fonctions de dommages aux stocks et équipements, lorsqu'il a été constaté que l'établissement occupe plusieurs bâtiments ; le nombre d'employés a été réparti proportionnellement à la surface des bâtiments. Ces surfaces et nombres d'employés de chaque bâtiment ont été utilisées pour calculer les dommages aux équipements et aux stocks à partir de ces valeurs pour chacun des bâtiments.

#### 4.3.2. Cas particuliers

##### **Centre commercial de Montivilliers – La Lézarde**

Ce centre commercial apparait dans la BD topo comme étant un seul et même bâtiment. Ce bâtiment de plus de 4,6 ha abrite environ 70 enseignes et 8 restaurants. D'un point de vue structurel et hydraulique, il n'est pas pertinent de découper ce bâtiment en autant de sous bâtiments. Il a donc été décidé de construire deux fonctions de dommage composites ; une fonction de dommages au bâti et une fonction de dommages aux équipements et aux stocks.

Ces fonctions composites sont le résultat du calcul de la moyenne pondérée par la surface des fonctions de dommages des types d'établissements présents dans le centre commercial. Ce travail a pu être réalisé grâce aux informations disponibles sur le site internet du centre commercial. La liste et la localisation de chaque enseigne est accessible via un plan dynamique (Figure 52). Comme pour les autres entreprises, le code NAF et le nombre d'employés a pu être retrouvé dans la base SIRENE.

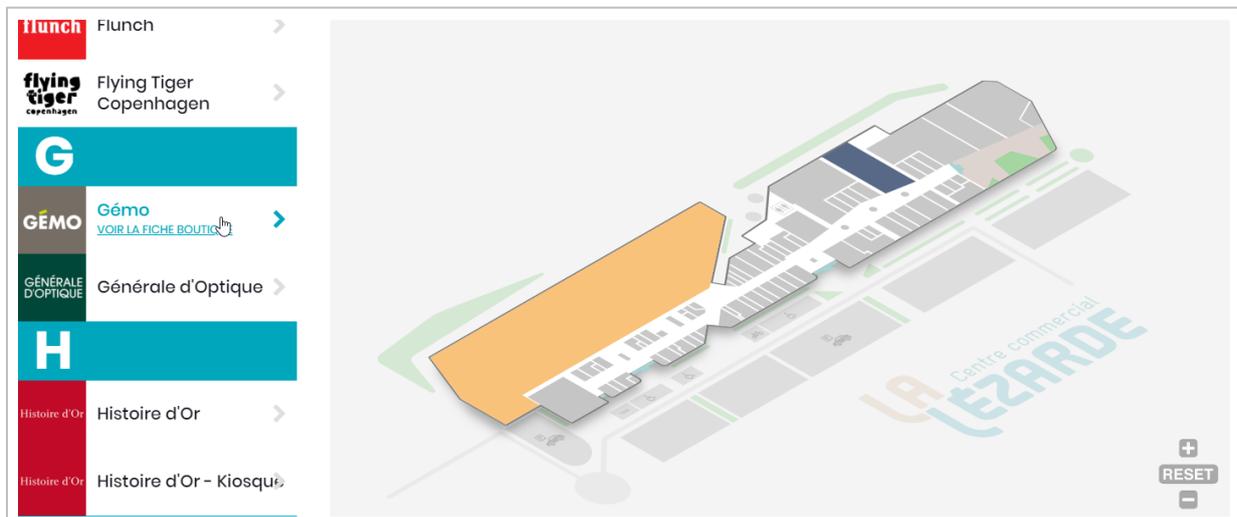


Figure 52 : Extrait du site internet du centre commercial de la Lezarde-  
<https://www.lezarde.fr/boutiques/>

Le tableau suivant présente les codes NAF et les pondérations utilisées pour construire deux fonctions de dommage spécifiques au centre commercial.

Type d'activité	% de surface occupée	NAF type
Restaurant	10 %	4711F
Mode	15 %	4771Z
Accessoires	5 %	4777Z
Beauté/opticiens	15 %	4778A
Chaussures	5 %	4772A
Culture	10 %	4762Z
Equipement de la maison	5 %	4742Z
Super marché	30 %	4711F
Service	5 %	9523Z

Figure 53 : Statistiques utilisées pour la construction des deux fonctions de dommage spécifiques au centre commercial de la Lézarde.

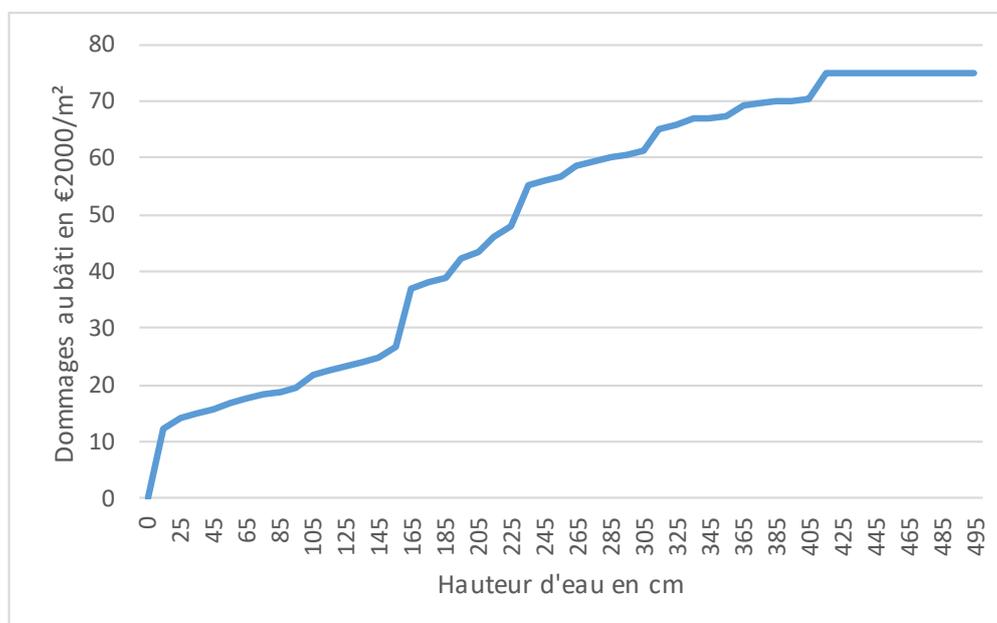


Figure 54 : Fonction de dommage au bâtiment du centre commercial de la Lézarde.

### Établissements concernés par des dommages très importants

Le guide du CGDD précise que les fonctions de dommages proposées ne sont pas applicables aux établissements susceptibles de subir un sinistre au-delà de 1,5 M€. Des montants de dommages très importants peuvent être atteints par application des fonctions de dommages aux équipements et aux stocks lorsque le nombre d'employés attribués à l'établissement est significativement élevé. C'est pour cette raison que les fonctions de dommages sont accompagnées de seuils d'employés à partir duquel les dommages de l'enjeu de la catégorie peuvent dépasser 1,5 million €. Pour les entreprises dans cette situation, la valeur seuil du nombre d'employés a été appliquée pour éviter une surestimation des dommages.

Une telle limitation des montants de dommages est nécessaire pour deux raisons principales. Premièrement, les fonctions de dommage perdent en fiabilité sur de tels montants de

dommage. Ensuite, ces gros montants polarisent les dommages sur peu d'enjeux et neutralisent la sensibilité de l'ensemble de la zone d'étude face aux variations d'aléas et de scénarios.

Il est recommandé de procéder à une analyse au cas par cas pour ces établissements. Une telle analyse ne rentre pas dans le cadre de la présente étude. Le tableau suivant présente les établissements concernés par des montants de dommage potentiellement supérieurs à 1,5 M€ et pour lesquels une analyse spécifique de leur vulnérabilité devrait être réalisée pour fiabiliser l'ACB.

Établissement	Code NAF	Commune
ADF Normandie	3312Z	Harfleur
BOULANGER - Montivilliers	4754Z	Harfleur
cap isola	2223Z	Harfleur
Centre commercial de Montivilliers	Multiple	Montivilliers
colas rail	4212Z	Harfleur
DECATHLON	4764Z	Montivilliers
DES JARDINS	4776Z	Montivilliers
distillerie Hauguel	2014Z	Gonfreville-l'Orcher
GIRPI	2223Z	Gonfreville-l'Orcher
KIABI	4771Z	Harfleur
Lidl	4711D	Harfleur
Stokomani	4719B	Harfleur

*Tableau 27 : Liste des établissements concernés par des montants de dommages aux stocks et aux équipements supérieurs à 1,5M€ avant application des plafonds de nombre d'employés fournis avec les fonctions de dommage.*

#### 4.4. DOMMAGES AUX ÉTABLISSEMENTS PUBLICS

Le guide du CGDD fournit des fonctions de dommages pour sept catégories types d'établissements publics :

- établissements scolaires ;
- établissements d'incendie et de secours ;
- hébergements sociaux ;
- centres techniques municipaux ;
- administrations publiques ;
- gendarmeries et commissariats ;
- établissements de santé.

Les établissements publics dont la catégorie de rattachement n'est pas évidente (complexe sportif, salle des fêtes, gymnase, salle des associations) ont été catégorisés comme « autre » et la fonction de dommage des centres techniques municipaux leur ont été attribués car il s'agit de la fonction avec les montants les plus faibles.

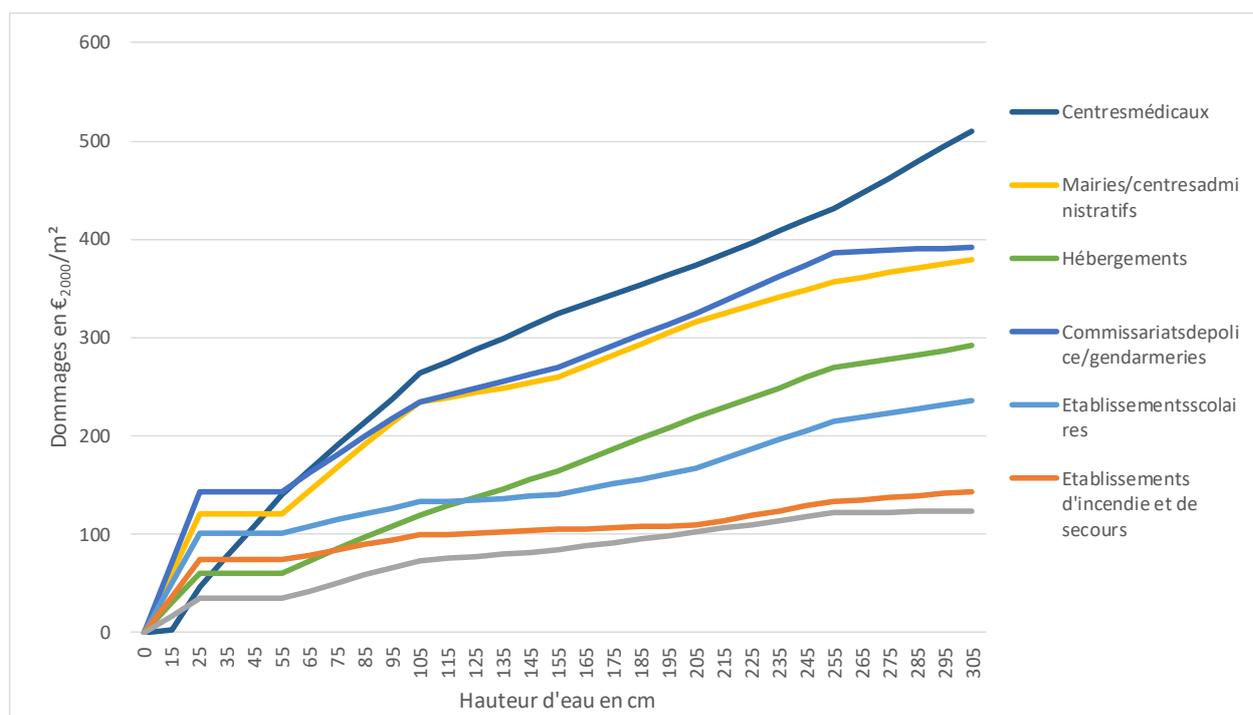


Figure 55 : Courbes d'endommagement aux bâtis et équipements des établissements publics.

## 4.5. COÛTS ET BÉNÉFICES NON PRIS EN COMPTE

### 4.5.1. Coûts des dommages aux infrastructures

Les bâtiments ne sont pas les seuls actifs exposés au risque de dommages. Toute une variété d'infrastructures de réseaux, supports de services de base, sont également susceptibles de subir des dommages directs et de effets de propagation des dommages (CEPRI, 2016) ; les réseaux de transports, de télécommunication, d'énergie, et d'eau. Les dommages subis par ces infrastructures peuvent être très coûteux en terme de réparation (coûts directs) mais aussi au regard des conséquences relatives aux pertes de service (coûts indirects) (Hallegatte *et al.*, 2019) (CEPRI, 2016; Hallegatte *et al.*, 2019). Bien que les coûts relatifs à la dégradation de ces infrastructures puissent être significatifs, l'évaluation des dommages et des coûts associés est très compliquée (Hallegatte, 2008; Hammond *et al.*, 2015; Przulski and Hallegatte, 2011). Il n'existe pas pour l'instant de fonctions d'endommagement de référence concernant les infrastructures publiques et pouvant être appliquées en routine.

Une analyse spécifique a été réalisée concernant les coûts pour l'AEP (Volume 4) sur le Bassin d'Alimentation du Captage de Radicatel (en dehors du périmètre de l'ACB sur le bassin versant de la Lézarde).

### 4.5.2. Coûts de curage, de nettoyage et d'évacuation des sédiments

Seuls les coûts de curage des ouvrages d'hydraulique structurante sont pris en compte (cf. chapitre 5.2.1) mais les coûts de nettoyage des voiries et des autres espaces urbains ne sont pas pris en compte faute de données économiques disponibles et relatives à des cas d'études précis sur le territoire. Pareillement, le surcoût induit par le nettoyage des boues (suite à une concentration élevée en MES des eaux de ruissellement) dans les bâtiments touchés n'est pas évalué. Ces coûts imputables à la charge sédimentaire et que les ouvrages d'HD sont susceptibles de réduire n'ont pas pu être pris en compte dans le modèle économique faute de données de retour d'expérience sur lesquelles construire des fonctions de coût.

### **4.5.3. Coûts de gestion des déchets**

Une inondation génère une énorme quantité de déchets de nature très diverses. Il peut s'agir de matériaux de construction, branchages, mobiliers, stocks d'entreprises, d'exploitations agricoles ou de supermarchés, boues, gravats, cadavres d'animaux qui se retrouvent mélangés, voire pollués par des hydrocarbures et des substances toxiques.

La nécessité d'une méthode de caractérisation du gisement de déchets post-inondation a conduit à la mise en œuvre du projet MECaDePI (Méthode d'évaluation et de caractérisation des déchets post-inondation) ayant abouti à la publication, par le CEPRI, du guide du même nom (CEPRI, 2013).

Malgré la disponibilité de ces méthodes, le coût de gestion des déchets n'a pas pu être estimé. Compte tenu des modalités de calcul MECaDePI, on peut affirmer que le coût de gestion des déchets est grandement corrélé au coût des dommages aux logements. Vraisemblablement, du fait de cette corrélation, on suppose que le rapport entre le coût de gestion des déchets et le coût de dommage aux bâtiments seraient très proche entre tous les scénarios. On peut donc considérer que la non prise en compte du coût de gestion des déchets ne remet pas en question les résultats de l'ACB concernant la comparaison des scénarii, mais dégrade la balance coût-bénéfice des programmes d'action.

### **4.5.4. Impacts environnementaux**

Les impacts sur la qualité des masses d'eau ne sont pas pris en compte. En effet, les phénomènes d'inondation et plus particulièrement la charge sédimentaire cause l'envasement et la pollution des masses d'eau de surface et souterraines, et la dégradation des écosystèmes aquatiques. Les pertes de services écosystémiques associées pourraient théoriquement faire l'objet d'une valorisation économique mais l'exercice est particulièrement difficile et incertain. Compte tenu de l'importance de l'enjeu de qualité des masses d'eau vis-à-vis du respect des objectifs de bon état fixés dans le SDAGE en déclinaisons de la DCE, et de l'intérêt croissant pour la considération des services écosystémiques associés, le développement d'une méthodologie d'évaluation spécifique paraît pertinent et pourrait faire l'objet d'un travail futur.

Une approche non-monétarisée telle que l'analyse multicritère offre l'opportunité d'une évaluation non-monétarisée. On peut imaginer un indicateur basé sur la comptabilisation des linéaires de cours d'eau impacté et croisé selon leur sensibilité environnementale.

### **4.5.5. Coûts intangibles**

Les aléas étudiés sont susceptibles d'avoir des impacts négatifs sur la santé humaine (physique et/ou psychologique) ou même de causer la mort. Ces phénomènes peuvent aussi affecter le patrimoine paysager et/ou historique des territoires impactés. Ces coûts intangibles n'ont pas fait l'objet d'une valorisation économique parce que l'exercice est très compliqué et qu'il n'y a pas de consensus sur les méthodes (Floyd and Tunstall, 2005; Frongia et al., 2016; Lekuthai and Vongvisessomjai, 2001; Markantonis et al., 2012).

Généralement en France, lors de l'évaluation de projets de lutte contre les inondations, les impacts sur les personnes physiques et sur le patrimoine sont approchés par le calcul d'indicateurs non monétaires tels que le nombre de personnes exposées ou le nombre d'ouvrages classés exposés. Le calcul de ce type d'indicateurs, pour l'analyse multicritère des projets de lutte contre les inondations, est à envisager dans le cadre d'une prolongation du travail déjà réalisé.

#### **4.5.6. Bénéfices fournis par les ouvrages d'hydraulique douce et non pris en compte**

Les principaux bénéfices fournis par les ouvrages hydrauliques résident dans la réduction d'impacts négatifs. Ces bénéfices sont en fait des dommages évités. Mais les ouvrages d'hydraulique douce sont également porteurs de « bénéfices purs » qui n'ont pas fait l'objet d'une estimation économique car en plus d'être souvent difficiles à évaluer, ils ne sont pas l'objectif prioritaire de ces aménagements. Ces bénéfices non pris en compte sont les suivants (liste non-exhaustive) :

- bénéfices tangibles non pris en compte :
  - production de bois énergie, de bois d'œuvre, de fourrage ;
  - création d'emplois ;
  - amélioration de la recharge des aquifères ;
  - protection des cultures voisines par hébergement d'auxiliaires ;
  - création d'habitats naturels favorables à la biodiversité ;
  - stockage de carbone ;
  - amélioration de la vie du sol et de sa fertilité ;
- bénéfice intangible :
  - amélioration de l'aménité paysagère des territoires agricoles et des cours d'eaux.

## 5. Évaluation des coûts des ouvrages

### 5.1. OUVRAGES CONSIDÉRÉS

La description des ouvrages d'hydraulique douce (HD) et d'hydraulique structurante (HS) intégrés dans les modélisations sont présentés dans le volume 2. Le tableau suivant synthétise les quantités d'aménagements considérés, et pour lesquels des fonctions de coût ont été construites. Le scénario ambitieux ne présente que les ouvrages additionnels à la situation actuelle.

Pour les aménagements d'hydraulique douce actuels, la source d'information est la base de données Castor [www.bdcastor.fr](http://www.bdcastor.fr). Pour les ouvrages d'hydraulique structurante actuels, les sources de données sont la Communauté urbaine Le Havre Seine Métropole (ex-Codah) sur son territoire ; la BD Castor et le bureau d'études DHI sur les secteurs hors Codah.

Types	Ouvrages	Situation actuelle		Scénario ambitieux	
		Nombre	Linéaire ou volume total	Nombre	Linéaire ou volume ou surface total
Hydraulique douce	aménagement de béttoire	1			
	fascine	57	1 412 ml	186	6 766 ml
	haie	46	3 744 ml	873	67 254 ml
	Mare	35	24 227 m <sup>3</sup>		
	mare/bassin	41	184 767 m <sup>3</sup>		
	BLC			54	17 480 ml
	noue			21	1 935 ml
	noue diffusion			14	607 ml
	enherbement			646	1 824 359 m <sup>2</sup>
Hydraulique structurante	Bassin/barrages	33	594 083 m <sup>3</sup>	33	594 083 m <sup>3</sup>
	barrage	21	369 510 m <sup>3</sup>	21	369 510 m <sup>3</sup>

Tableau 28 : Liste et quantité des ouvrages considérés dans les modélisations.

### 5.2. CONSTRUCTION DES COÛTS DES OUVRAGES

Pour chacun des types d'ouvrage considérés ont été estimés un coût d'investissement et un coût d'entretien moyen par ml, m<sup>3</sup> ou m<sup>2</sup>. L'ACB étant réalisée en euro constant avec l'année 0 en 2000 il a été nécessaire de corriger de l'inflation les montants issus de la littérature pour les rapporter à l'année 2000. Pour cela, l'indice INSEE du coût de production des travaux publics<sup>9</sup> a été utilisé.

<sup>9</sup> <https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010566988#Tableau>

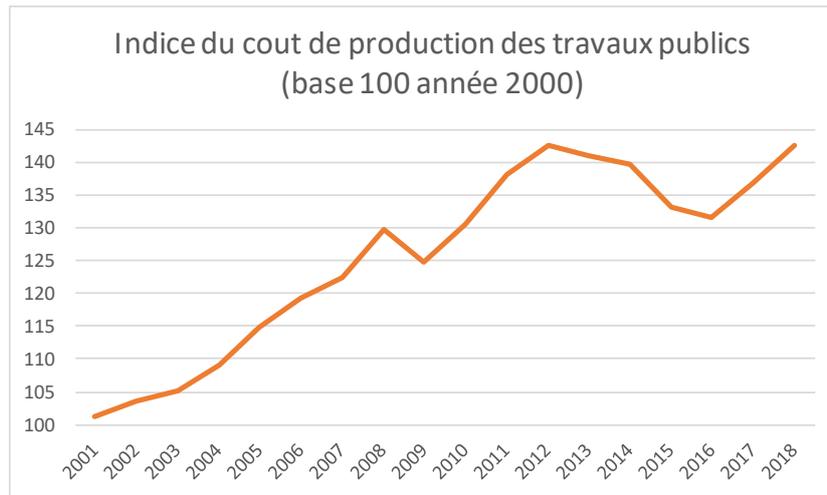


Figure 56 : Indice du coût de production des travaux publics (base 100 année 2000).  
Source : INSEE

### 5.2.1. Coûts relatifs aux ouvrages d'hydraulique structurante

Le détail des éléments présentés dans ce chapitre se trouvent dans le volume 1. Pour les ouvrages d'HS, les coûts d'investissement sont issus des données de la Communauté urbaine Le Havre Seine Métropole. Il faut préciser que la communauté urbaine a été créée le 1<sup>er</sup> janvier 2019 par la fusion de la communauté de l'agglomération havraise (CODAH), de la communauté de communes Caux Estuaire et de la communauté de communes du canton de Criquetot-l'Esneval. La CODAH était gestionnaire des ouvrages considéré dans les modélisations. Sur les 54 ouvrages intégrés dans les modélisations, tous disposent d'une année de création, d'un volume en m<sup>3</sup> mais seulement 23 disposent d'un coût d'investissement. Ces derniers ont été utilisés pour construire deux fonctions de coûts d'investissement ; une pour les barrages et l'autre pour les bassins et bassins-barrages. La Figure 57 présente la construction de ces fonctions de coût d'investissement.

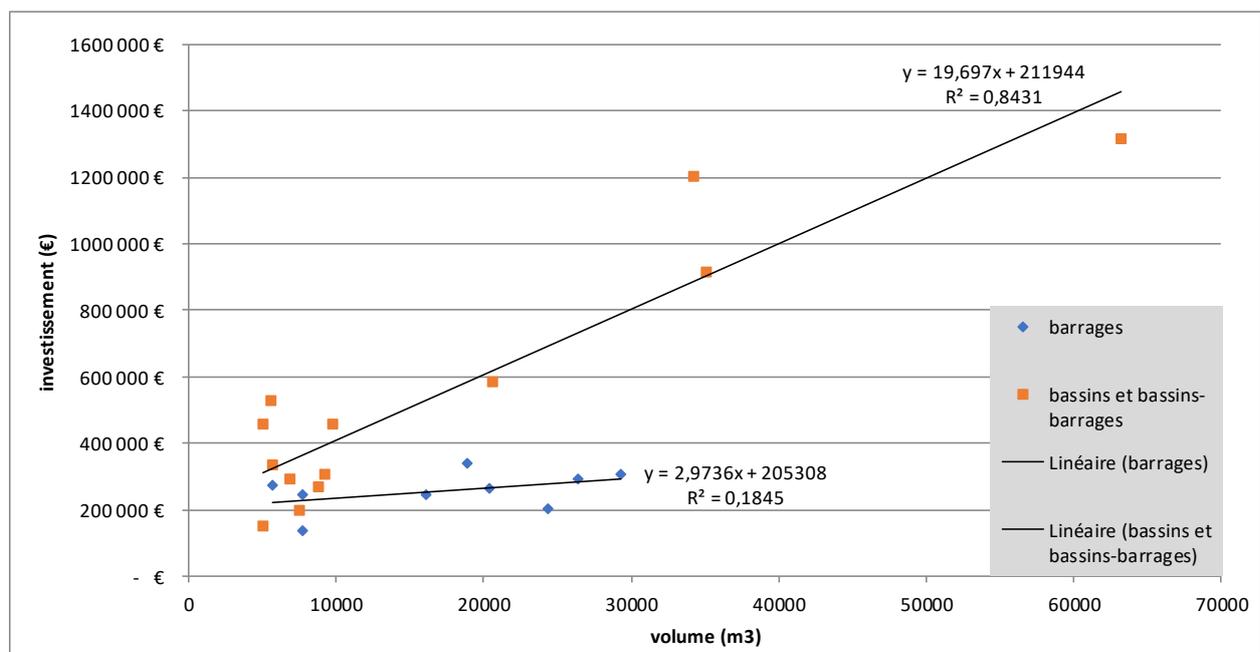


Figure 57 : Construction des fonctions de coût d'investissement pour les ouvrages d'HS (€ 2 000).

Tous les coûts sont issus d'entretiens avec des membres de l'ex-CODAH, et les coûts d'entretien des ouvrages sont composés de différentes postes dont l'entretien des espaces verts, les visites de routine, l'entretien des clôtures, l'entretien des organes de fuite, les visites réglementaires (visites techniques approfondies) ...

Nb d'ouvrages en 2017	54
Temps passé au suivi ordinaire (5 ETP <sup>10</sup> /154 ouvrages)	3 750 €/an/ouvrage
Suivi en temps de crise (ETP)	NC
Espaces verts	1 000 €/an/ouvrage
Entretien ordinaire	990 €/an/ouvrage
Remise en état suite à inondations (dont traitement de bétoires, hors curage)	200 €/an/ouvrage
Curage réguliers (hors curages ponctuels post-événement)	940 €/an/ouvrage
<b>Total</b>	<b>6 880 €/an/ouvrage</b>

Tableau 29 : Coûts d'entretien du parc d'ouvrages structurants.

À ces coûts, d'entretiens récurrents, il faut rajouter les coûts d'entretien ponctuels qui correspondent au curage des ouvrages et à l'évacuation des sédiments curés, à la réhabilitation suite à l'ouverture d'une bétoire, ou la reprise de l'ouvrage en cas de dégâts ponctuels par exemple si une surverse est sous-dimensionnée.

Concernant les coûts de curage, les résultats du modèle WaterSed sont utilisés pour connaître les volumes de sédiments retenus par chaque ouvrage pour ensuite y appliquer des coûts forfaitaires de curage et d'évacuation. Comme expliqué dans le volume 1, les coûts d'évacuation des sédiments font l'objet d'une grande variabilité selon la qualité des sédiments. Le modèle Watersed ne permet pas, à ce stade de son développement, de connaître la qualité des sédiments au droit des ouvrages. Ainsi des hypothèses simplificatrices ont été construites par l'équipe de projet, sur la base des discussions avec les gestionnaires des ouvrages pour estimer la destination moyenne et donc le coût moyen d'évacuation des sédiments. Le coût de gestion des sédiments retenus est de 20 €/m<sup>3</sup> curé et évacué.

Concernant la réhabilitation suite à l'ouverture d'une bétoire, ou la reprise de l'ouvrage en cas de dégâts ponctuels, ces coûts ponctuels peuvent être très importants (parfois plus de 50 % du coût d'investissement initial de l'ouvrage) mais ce sont des événements particulièrement imprévisibles et trop peu documentés pour pouvoir établir une probabilité d'occurrence. Ces coûts ponctuels n'ont donc pas été intégrés.

Pour finir, du fait des fortes incertitudes et des difficultés méthodologiques, il est décidé de ne pas procéder à une redistribution des coûts de fonctionnement de l'ex-CODAH sur l'ensemble des ouvrages.

### 5.2.2. Coûts relatifs aux ouvrages d'hydraulique douce

Pour les ouvrages d'HD, les coûts retenus (investissement et exploitation) sont issus d'une revue bibliographique. Selon les cas, soit le montant proposé par la source considérée comme la plus fiable a été retenu soit une valeur moyenne des différentes sources a été calculée.

Plusieurs aspects rendent difficile la transformation des prix exprimés dans la littérature sur une base en euros de l'année 2000. Pour commencer, les observateurs de l'évolution des coûts des ouvrages - tels que l'AREAS – constatent une certaine stabilité des prix surtout

<sup>10</sup> <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1371004>

depuis 2005. Ces témoignages vont à l'encontre de l'intuition d'une tendance naturelle à l'inflation. De plus, l'indice du coût de production des travaux publics ne paraît pas vraiment adapté à ce type d'ouvrage pour lesquels les matériaux et matériels utilisés sont assez différents de ceux entrant dans le coût de production des travaux publics. Néanmoins, aucun autre indice des prix potentiellement plus pertinent n'a été identifié dans la base INSEE. Dernier point de difficulté, l'année de référence pour l'expression des valeurs proposées dans la littérature n'est pas toujours explicitée. Il est tentant d'utiliser l'année de publication du document comme année de référence mais rien ne permet d'affirmer que les valeurs annoncées dans le document aient rigoureusement été calculées pour cette année de publication.

Compte tenu des difficultés présentées dans le paragraphe précédent, une correction de l'inflation classique par application pure et simple de l'indice du coût de production des travaux publics risque de générer une forte sous-estimation des coûts d'investissement et d'exploitation des ouvrages d'HD.

Par exemple, dans le guide Érosion de 2016 (Institution Adour, 2016) le coût d'investissement des fascines est estimé à environ 70 €/ml (selon les techniques et les modalités de pose) mais il n'est pas précisé si cette valeur est exprimée en euros de l'année 2016. Sous cette hypothèse et par utilisation de l'indice du coût de production des travaux publics, le coût en d'une fascine est de 53,2 €<sub>2000</sub>/ml. Ce résultat correspond à l'application d'un coefficient de 0,76.

Par chance, les variations de tendance de l'indice des prix font que quasiment le même résultat est obtenu en utilisant un indice moyen des années 2018 à 2006 (le coefficient de correction est alors de 0,78). Finalement, il a été décidé d'appliquer un coefficient de correction de l'inflation de 0,78 sur toutes les valeurs de référence identifiées dans des publications récentes et pour lesquelles l'année d'expression des valeurs n'est pas précisée.

Le tableau suivant présente les valeurs de référence identifiées et retenues pour la construction des coûts forfaitaires utilisés dans le calcul économique.

Aménagement	Valeur retenue investissement	Valeur retenue entretien / an	Année de référence	Coût d'investissement	Entretien divers	Code source doc.
Mare	40 €HT/m3	230 €HT/mare	non précisé	11€ /m3		[1]
			non précisé	40€ /m3		[2]
			non précisé	79,16€ /m3	230€ HT/an	[2]
			2016	28€ /m3		[3]
Noue / noues diffusion	73 €HT/ml	1 €HT/ml	non précisé	704€ /ha	30€ HT/ha	[1]
			non précisé	76€ /ml	68€ HT/ml	[2]
			non précisé	70€ /ml	3000€ HT/an	[4]
			non précisé		0,76€HT/ml	[1]
Bande enherbée	441 €HT/ha	889 €HT/ha	non précisé	16€/ml	3€/ml/an	[7]
			non précisé	16,6€ /ml		[2]
			non précisé	19,1 € /ml	3€/ml/an	[2]
			2009	369€ /ha		[5]
			non précisé	250€ /ha		[6]
			non précisé		889€/ha/an	[10]
			non précisé	704€ /ha	30€ HT/ha	[1]
Fascine	70 €HT/ml	3 €HT/ml	2007	67,5€/ml	3€/ml/an	[7]
			non précisé	70€/ml		[6]
			non précisé	55€ /ml		[1]
			non précisé		4 euros/ml/an	[13]
			non précisé	80€/ml		[14]
Haie	20 €HT/ml	2 €HT/ml	non précisé	11€/ml		[1]
			non précisé	15 à 17 euros/ml	3€/ml/an	[7]
			non précisé		0,34€/ml	[5]
			non précisé		0,72 à 0,77€/ml/an	[15]
			non précisé	25€/ml	0,175€/ml	[6]
			2016	20€/ml		[3]
BLC	2 600 €HT/ha	350 €HT/ha	non précisé	2100€/ha	600€/ha/2ans	[8] [10]
			non précisé	2800-3000€ha	400/ha/an	[9] [11]

[1] Guide de l'érosion 2018

[2] Étude technico-économique sur les actions et les impacts des inondations par ruissellement en Seine-Maritime sur la période 2000-2017

[3] Étude de conception d'un plan d'hydraulique douce sur le bassin versant du Clignon amont

[4] Comparaison des coûts de différents scénarios de gestion des eaux pluviales - Etude de cas

[5] Caractérisation de l'érosion et du ruissellement des territoires aval de la Chalaronne. Propositions de mesures de gestion.

[6] Démarche de lutte contre l'érosion des sols: de la préparation à la mise en œuvre

[7] Base de données documentaire en ligne AREAS

[8] Fiche technique Saules BLC Innobioma

[9] Fiche technique Miscanthus BLC Innobioma

[10] <https://seine-maritime.chambres-agriculture.fr/environnement/bandes-ligno-cellulosiques/le-taillis-tres-courte-rotation-de-saule/>

[11] <https://seine-maritime.chambres-agriculture.fr/environnement/bandes-ligno-cellulosiques/le-miscanthus/>

[12] <https://seine-maritime.chambres-agriculture.fr/territoires/indemnisations/amenagements-hydrauliques/indemnisation-des-servitudes-ou-conventions/>

[13] Entretien - SMBV Dun Veules

[14] Entretien - SMBV pointe de Caux

[15] Entretien - SMBV Yères

Tableau 30 : Résumé des coûts de références utilisés et des valeurs retenues pour le chiffrage des actions d'HD.

Les coûts utilisés dans les calculs correspondent à un total actualisé (CTA) à 2,5 % sur 50 ans. Le CTA est composé de l'investissement (année 0) et de l'entretien (années suivantes) des ouvrages conformément aux coûts de référence présentés dans le chapitre précédent. Autrement dit, il s'agit de la somme actualisée des coûts moyens annuels. Cette approche permet de prendre en compte l'évolution des flux financiers dans le temps. Les CTA sont exprimés en euros de l'année 2000. La date exacte de création des ouvrages n'étant pas toujours connue, les CTA de tous les ouvrages intégrés dans les scénarios de niveau d'équipement actuels sont lissés entre l'année 2000 (pas d'ouvrage) et l'année 2018 (situation actuelle). Pour rappel, la réduction progressive des dommages est calée au même rythme que celui de création des ouvrages.

Le Tableau 31 présente les coûts utilisés pour l'hydraulique douce. Pour les mares, le coût d'entretien est exprimé par mare (indépendamment de la taille) et par an, alors que le coût d'investissement est exprimé par mètre cube. C'est pour cette raison qu'ils ne sont pas agrégés.

Ouvrage	CTA Investissement et entretien	unité	CTA de l'entretien lorsque l'unité est différente	unité
Aménagement de béttoire	20 000	€		
Mare	30	€/m <sup>3</sup>	5 088	€/an
Noue / noues diffusion	77	€/ml		
Bande enherbée	20 011	€/ha		
Fascine	124	€/ml		
Haie	61	€/ml		
BLC	6	€/ml		

Tableau 31 : Coût utilisés pour l'hydraulique douce.

La création de ces ouvrages induit une réduction des surfaces cultivées sur les parcelles agricoles où ils sont mis en œuvre. Ce coût d'opportunité de production agricole n'a pas été pris en compte.

## 6. Analyse coût-bénéfice

### 6.1. ACB DES SCÉNARIOS DE DÉBORDEMENT DE COURS D'EAU ET DE RUISSELLEMENT DANS LES TALWEGS PRINCIPAUX

#### 6.1.1. Analyse des résultats sans changement climatique

Dans le scénario de référence sans aménagement (*ref0*), le montant des dommages causés par les inondations est très important. Les coûts directs relatifs à une crue d'occurrence décennale s'élèvent à un peu moins de 10 M€, ceux d'une cinquantennale à presque 18 M€, une crue centennale causerait un peu moins de 30 M€ de dommages (Tableau 32). Compte tenu des périodes de retour de ces événements, le Dommage Moyen Annuel (DMA) s'élève à environ 3,5 M€/an.

Les Dommages Évités Moyens Annuels (DEMA) du scénario *actu* ont été évalués sur la base d'une comparaison avec le scénario de référence *ref0*. En complément, la simulation des scénarios *herb* (réduction de 33 % des surfaces en herbe) et *agri* (augmentation de 20 % de l'infiltration) permettent d'évaluer la sensibilité du scénario *actu* à des changements des pratiques futures.

Les dommages aux établissements économiques comptent pour un peu plus de 70 % du montant total des dommages alors que les dommages aux logements représentent un peu plus de 20 % du montant. Il faut souligner la polarisation des dommages aux établissements économiques des communes de Montivilliers et Harfleur qui, par exemple, pour une Q100 en situation de référence, concentrent 80 % des dommages aux établissements économiques.

Les résultats de l'évaluation des dommages des quatre scénarios sont présentés dans le Tableau 32. La Figure 58 offre une représentation plus visuelle de ces mêmes résultats. Tous les résultats sont exprimés en euros de l'année 2000.

		Coûts des dommages exprimés en K€ base an 2000			
		ref0	actu	herb	agr
Q10	Logements	2 420	1 040	1 740	815
	Etab. Eco.	6 619	3 704	4 075	1 667
	Etab. Publ.	390	246	374	170
	Parc. agri.	32	26	33	25
	<b>TOTAL</b>	<b>9 461</b>	<b>5 016</b>	<b>6 222</b>	<b>2 677</b>
Q50	Logements	3 908	2 705	3 635	2 661
	Etab. Eco.	12 917	7 900	12 220	7 638
	Etab. Publ.	895	543	838	460
	Parc. agri.	53	37	47	38
	<b>TOTAL</b>	<b>17 775</b>	<b>11 184</b>	<b>16 740</b>	<b>10 797</b>
Q100	Logements	6 188	4 434	4 641	4 283
	Etab. Eco.	21 432	17 350	17 963	15 285
	Etab. Publ.	1 738	1 250	1 284	1 172
	Parc. agri.	57	51	51	51
	<b>TOTAL</b>	<b>29 415</b>	<b>23 085</b>	<b>23 939</b>	<b>20 789</b>
	DMA	<b>3 585</b>	<b>1 359</b>	<b>1 732</b>	<b>1 091</b>
	DEMA		<b>2 227</b>	<b>1 853</b>	<b>2 495</b>

Tableau 32 : Montant des dommages causés par les débordements de cours d'eau en K€<sub>2000</sub>.

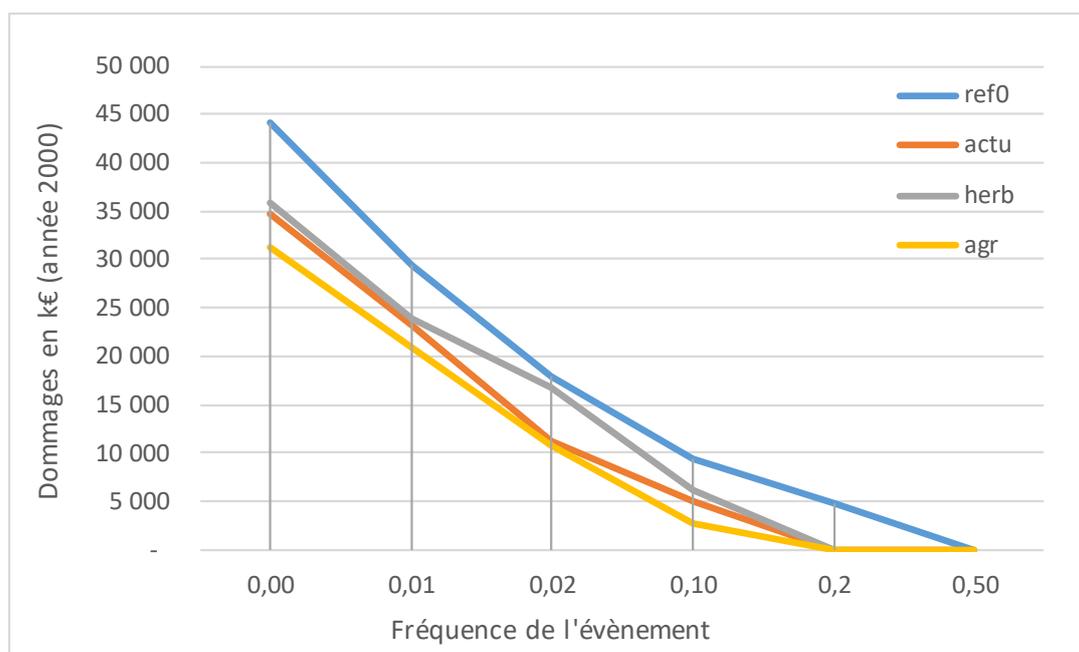


Figure 58 : Courbes fréquence-dommage pour l'aléas débordement de cours d'eau dans les scénarios sans changement climatique.

Dans les trois scénarios d'action, et pour chaque période de retour étudiée, le montant des dommages est inférieur à ceux du scénario de référence. Pour rappel, le DMA de chaque scénario correspond à l'aire située sous la courbe de fréquence-dommage et le DEMA d'un scénario d'adaptation correspond à l'aire entre sa courbe et celle du scénario de référence.

Le scénario d'aménagement actuel (actu) offre un DEMA d'environ 2,2 M€/an. On observe une forte influence de la modification des pratiques agricoles (agri) ; alors que la réduction des surfaces en herbe (33 % de surface en moins en 2050 dans le scénario herb) tend à dégrader l'efficacité des aménagements actuels de 14% (DEMA de 1,8 M€/an), une transformation des pratiques agricoles permettant une augmentation de l'infiltration (20% d'infiltration en plus en 2050) permet de réduire l'intensité des phénomènes de débordement et les montants des dommages de 18 % (DEMA égal à 2,5 M€/an). La Figure 59 présente l'évolution temporelle des DEMA compte tenu du rythme de mise en œuvre des ouvrages d'HS et d'évolution des pratiques agricoles.

Le CTA (Coût Total Actualisé) des investissements d'hydraulique structurante pris en compte dans les modélisations s'élève à 22,6 M€. La confrontation du CTA avec les BTA (Bénéfices Totaux Actualisés) par le calcul des indicateurs synthétiques de l'ACB (Tableau 33) offre une appréciation de l'efficacité du programme d'investissement mis en œuvre ces 18 dernières années selon une projection de son fonctionnement sur 50 ans.

	VAN en M€ <sub>2000</sub>	B/C
Scénario aménagement actuel (actu)	21,5	1,95
Scénario actu + réduction des surfaces en herbe	19,6	1,86
Scénario actu + modification des pratiques agricoles	22,9	2,01

Tableau 33 : Résultats des deux indicateurs synthétiques de l'ACB pour les scénarios de débordement avec et sans changement des pratiques agricoles.

Il est important de préciser que le calcul de la VAN (Valeur Actuelle Nette) et de la balance Bénéfice/Coût pour le scénario de modification des pratiques agricoles (agri) est faux car les

coûts de mise en œuvre de la politique agricole conduisant à ce résultat n'ont pas été évalués. Néanmoins, on peut considérer que les résultats obtenus pour le scénario herb sont corrects car ce scénario ne nécessite pas de dépenses particulières de la part des pouvoirs publics.

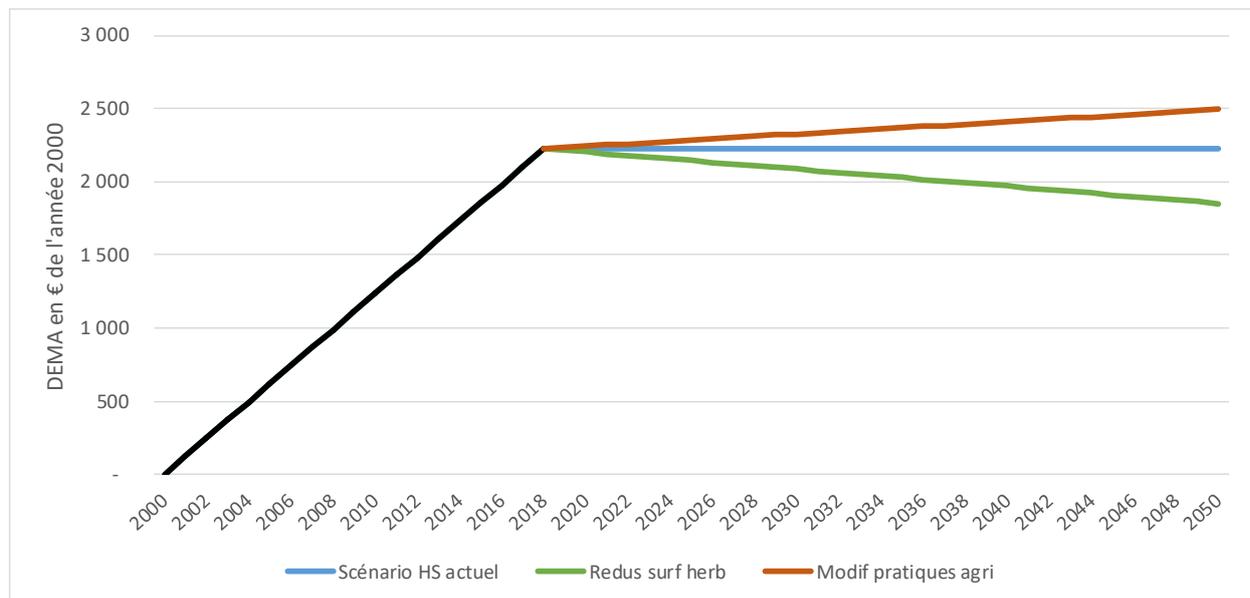


Figure 59 : Évolution des DEMA des ouvrages d'HS dans les scénarios sans et avec évolution des pratiques agricoles.

Dans ces trois scénarios, l'efficacité du programme d'investissement réalisé ces 18 dernières années est avérée avec une VAN du scénario « actu » à 21,5 M€ et un ratio bénéfice/coût de 1,95. En d'autres termes, chaque euro dépensé en ouvrage d'HS ces 18 dernières années permet d'éviter 1,95 € de dommages potentiels entre 2000 et 2050.

Les DEMA du scénario *herb* sont inférieurs de presque 17 % par rapport à ceux du scénario *actu*, et les DEMA du scénario *agri* sont supérieurs d'environ 12 %. Ces chiffres montrent l'importance de l'influence des pratiques agricoles sur les phénomènes d'inondation. Les deux indicateurs synthétiques que sont la VAN et le ratio bénéfice/coût sont assez peu sensibles à cette dynamique agricole car, selon les hypothèses fixées dans les scénarios, **c'est surtout vers la fin de l'horizon temporel de calcul (en se rapprochant de 2050) que les effets des transformations agricoles apparaissent. L'actualisation des DEMA au taux de 2,5 % tend à effacer ces effets de long terme. Néanmoins, il est essentiel de ne pas négliger ces résultats qui mettent en lumière une potentielle réorientation stratégique de l'effort de lutte contre les phénomènes d'inondation vers une maîtrise de l'évolution des pratiques agricoles.**

Pour procéder à une analyse de sensibilité des résultats à une variation du taux d'actualisation, il a été testé de passer le taux d'actualisation à zéro. Sous cette condition, la VAN et le ratio bénéfice/coût du scénario *actu* se trouvent grandement améliorés. La VAN passe à 53,4 M€ (contre 21,5 M€ avec un taux d'actualisation à 2,5 %) et le ratio bénéfice/coût passe à 2,78 (contre 1,95). Ce test illustre bien le décalage temporel entre les coûts des ouvrages (qui sont supportés surtout les premières années) et l'expression des bénéfices sur une durée bien plus longue.

Malheureusement, il n'a pas été possible, dans le cadre de cette étude, de définir ni de chiffrer les coûts de mise en œuvre de telles politiques agricoles et des actions associées (sensibilisation, formation, obligation, contrôle, financement, etc.) pouvant conduire à une amélioration des pratiques culturales au regard des enjeux hydrauliques associés. En cela, l'approche coût-bénéfice du scénario d'amélioration des pratiques est incomplète. Pour autant,

compte tenu des effets positifs potentiels, à *minima* d'un point de vue hydraulique, il semble essentiel d'étudier la question.

### 6.1.2. Analyse des résultats avec changement climatique

Comme expliqué en détail dans le paragraphe 3.1, les effets du changement climatique (CC) ont été évalués sur le scénario *actu* à partir de 2018. Pour cela, les scénarios *ref0* et *actu* ont été réévalués sous deux hypothèses de CC ; l'une moyenne et l'autre forte.

Dans les deux scénarios de changement climatique les résultats sont influencés vers la fin de l'horizon d'analyse, c'est-à-dire à l'approche de 2050. Le graphique suivant montre l'évolution des DEMA dans les scénarios avec CC en regard du scénario sans CC.

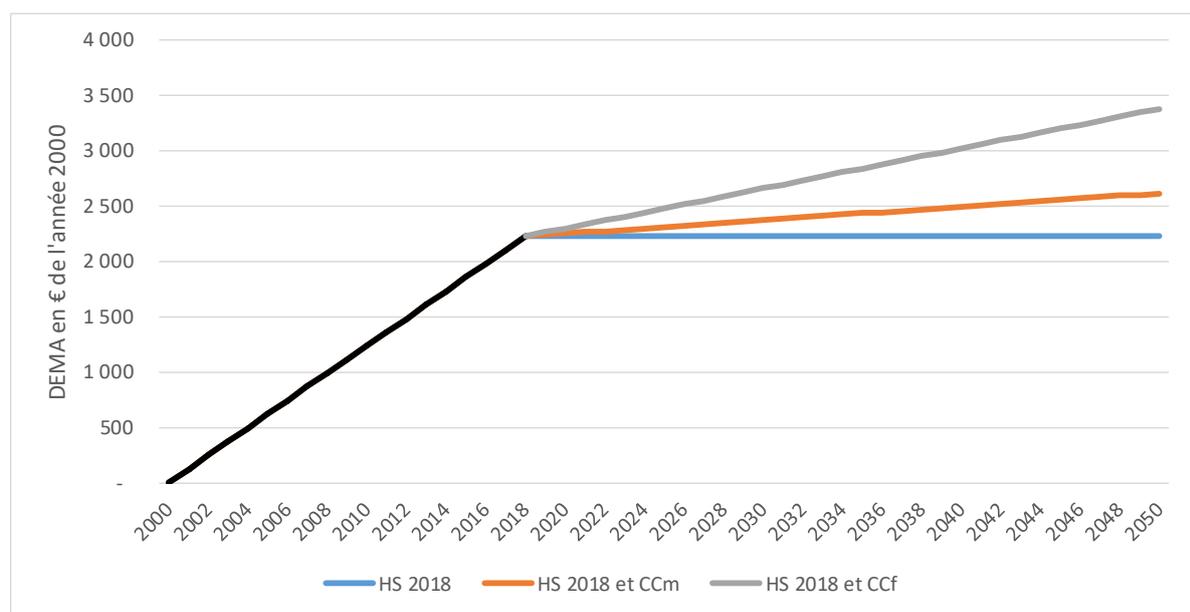


Figure 60 : Évolution des DEMA avec et sans CC.

**Les bénéfices des aménagements d'HS sont significativement renforcés par la perspective d'un changement climatique.** Ces résultats sont notamment dus à la réduction des périodes de retour des différents événements considérés, avec plus particulièrement une influence forte de la variation des périodes de retour des événements fréquents face auxquels les ouvrages sont particulièrement efficaces (cf. Tableau 24).

Sans ouvrage et avec changement climatique, les DMA étant bien plus élevés, les bénéfices de la protection sont d'autant plus grands. Le changement climatique tend à renforcer la pertinence économique de l'investissement passé dans les ouvrages d'HS. Attention, avec le CC le coût des dommages sera quand même plus élevé que sans CC. Le DEMA de l'année 2050 du scénario CC modéré s'élève à 2,6 M€/an et le DEMA de l'année 2050 du scénario CC fort s'élève à plus de 1,7 M€/an.

	VAN en M€ <sub>2000</sub>	B/C
Scénario aménagement actuel (actu)	21,5	1,95
Scénario actu + CC moyen (ccm)	23,5	2,04
Scénario actu + CC fort (ccf)	27,5	2,21

Figure 61 : Résultats des deux indicateurs synthétiques de l'ACB pour les scénarios de débordement avec et sans changement climatique.

### 6.1.3. Conclusion

La rentabilité économique des ouvrages d'HS mis en œuvre ces 18 dernières années sur le bassin de la Lézarde est avérée. Néanmoins, le risque résiduel est significatif puisque dans le scénario d'aménagement actuel, le DMA est tout de même de 1,3 M€ avec notamment une crue décennale qui causerait aujourd'hui environ 5 M€ de dégâts (Tableau 32) et dont la fréquence et l'intensité seraient aggravées par le changement climatique. Ce constat rend indispensable le maintien d'un objectif de réduction du risque inondation.

Les dommages aux activités économiques représentent la majorité des coûts des dommages (autour de 70%), et sont concentrés sur les communes de Épouville, Montivilliers et Harfleur. Il paraît donc indispensable de réaliser un diagnostic de vulnérabilité ciblé sur ces zones d'activité pour vérifier la justesse des résultats de simulation hydraulique sur ce territoire sensible et, le cas échéant, considérer l'opportunité de la mise en place de systèmes de protection ciblés.

Pour obtenir un résultat conforme à cet objectif, et compte tenu de l'efficacité<sup>11</sup> des investissements passés dans l'HS, il paraît logique de poursuivre la même stratégie d'investissement. Néanmoins, il serait fallacieux de conclure que les investissements futurs seront tout autant rentables que l'ont été les précédents puisque les ouvrages les plus efficaces ont vraisemblablement déjà été réalisés. L'évaluation économique *ex ante* des futurs projets d'investissement dans des ouvrages de lutte contre les inondations reste donc indispensable.

Selon l'orientation prise, l'évolution des pratiques agricoles peut aggraver ou réduire l'intensité de l'aléa inondation et le risque associé. En même temps, le changement climatique augmente la fréquence de ces mêmes aléas, et ainsi, le risque de dommage.

**Au regard de l'influence des pratiques agricoles sur l'évolution du risque inondation, il paraît indispensable d'étudier la faisabilité et le coût d'une politique de transformation des techniques culturales en faveur de l'infiltration des eaux. L'évaluation de l'efficacité et de l'efficacité d'une telle politique et des actions associées est plus délicate que l'évaluation d'infrastructures du fait des incertitudes relatives au comportement des agriculteurs face à différentes actions selon qu'elles sont incitatives ou coercitives, mais l'éventail des bénéfices fournis est potentiellement plus large que la seule réduction du risque inondation.**

L'évaluation des coûts inhérents à une telle stratégie agricole de lutte contre les inondations dépend de la diversité et de l'intensité des actions mises en œuvre pour obtenir le changement escompté. La formation, l'information, la mise en place de règles et de contrôles, etc. sont autant d'actions possibles pour lesquelles les ressources à mobiliser et les chances de succès sont très variables.

L'évaluation des bénéfices fournis par un programme de gestion des risques inondations basé sur des changements de pratiques agricoles dépend de l'estimation des chances de succès du programme d'action mis en œuvre. Dans une telle évaluation, il faudrait également intégrer les autres bénéfices potentiellement fournis par le catalogue d'actions envisagé si d'autres objectifs sont conjointement visés comme la réduction des pollutions diffuses, la préservation des espaces naturels ou la restauration de la vie des sols.

**Au final, il est possible que la balance coût-bénéfice d'un programme de gestion des risques inondations basé sur des changements de pratiques agricoles visant, parmi**

<sup>11</sup> L'efficacité caractérise le rapport entre un résultat obtenu et les efforts fournis pour obtenir ce résultat. Le ratio bénéfice/coût est un bon indicateur de l'efficacité d'une politique, d'un programme ou d'un projet.

d'autres objectifs, la réduction du risque inondation, présente une rentabilité économique supérieure à celle de la prolongation de la stratégie d'investissement dans les infrastructures hydrauliques. Toute conclusion ferme à ce sujet ne sera possible que moyennant une évaluation économique agricole co-construite avec l'ensemble des acteurs du monde agricole local.

## 6.2. ACB DES SCÉNARIOS DE COULÉES BOUEUSES

### 6.2.1. Analyse des résultats

Cinq scénarios ont été simulés. Le scénario de référence (ref 1) ne considère que les ouvrages d'HS et exclut les ouvrages d'HD. Les scénarios *actu* et *amb* incluent respectivement les ouvrages d'HD tels qu'ils existent aujourd'hui et le développement des ouvrages tel qu'imaginé dans les programmes d'aménagement. Enfin, les scénarios *herb* et *agri* évaluent l'influence de la modification des pratiques agricoles.

Dans tous les scénarios, et pour chacune des périodes de retour simulées, le montant des dommages causés par chaque événement de coulées boueuses est très inférieur à celui des dommages causés par l'inondation par débordement ; ils oscillent entre 2,2 M€ et 2,7 M€ (entre tous les scénarios et toutes les périodes de retour simulées). On observe une **très faible sensibilité des montants de dommages** que ce soit à l'augmentation de l'intensité des événements, à l'intégration des ouvrages d'hydraulique douce (HD) ou à la modification des pratiques agricoles (Cf. Tableau 34 et Figure 62). Les variations sont tellement faibles que le DEMA maximal, obtenu avec le scénario d'amélioration des pratiques agricoles s'élève à seulement 48 K€/an avec un DMA résiduel qui reste à 2,3 M€/an.

		Coûts des dommages exprimés en K€ base an 2000				
		ref1	actu	amb	herb	agr
P10	Logements	376	376	376	383	362
	Etab. Eco.	1 586	1 586	1 586	1 603	1 584
	Etab. Publ.	188	188	188	190	187
	Parc. agri.	109	109	107	116	96
	Curr. Sédim.	18	18	11	20	10
	<b>TOTAL</b>	<b>2 276</b>	<b>2 276</b>	<b>2 268</b>	<b>2 312</b>	<b>2 239</b>
P50	Logements	431	431	428	438	411
	Etab. Eco.	1 758	1 758	1 757	1 765	1 583
	Etab. Publ.	233	233	233	233	233
	Parc. agri.	140	140	156	151	128
	Curr. Sédim.	48	47	33	50	38
	<b>TOTAL</b>	<b>2 609</b>	<b>2 608</b>	<b>2 607</b>	<b>2 637</b>	<b>2 392</b>
P100	Logements	450	450	450	464	441
	Etab. Eco.	1 768	1 768	1 768	1 769	1 767
	Etab. Publ.	249	249	249	252	233
	Parc. agri.	157	157	139	168	141
	Curr. Sédim.	52	52	41	54	48
	<b>TOTAL</b>	<b>2 677</b>	<b>2 676</b>	<b>2 648</b>	<b>2 706</b>	<b>2 630</b>
	DMA	2 418	2 417	2 409	2 455	2 370
	DEMA		0,7	9	37	48

Tableau 34 : Montant des dommages causés par les coulées boueuses.

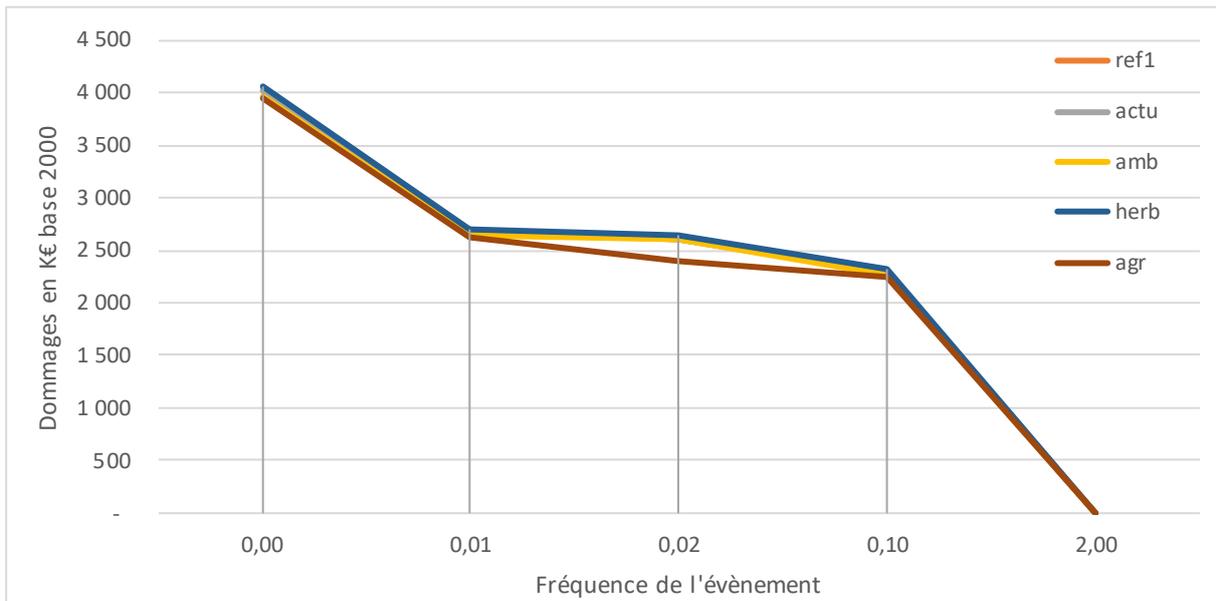


Figure 62 : Courbes fréquence-dommage pour l'aléa coulée boueuse dans les scénarios sans changement climatique.

Le budget total d'investissement et d'entretien des ouvrages d'HD actuels s'élève à 7 M€. Réparti dans le temps et actualisé, le coût total actualisé (CTA) des ouvrages est de 5,7 M€. Le budget d'investissement et d'entretien du programme ambitieux s'élève à presque 8,8 M€. Avec une répartition des investissements entre 2018 et 2040 pour suivre le même rythme de dépense que sur la première tranche d'investissement, le CTA du programme ambitieux s'élève à 4,4 M€.

Dans tous les scénarios étudiés, la VAN est extrêmement négative et correspond au montant des CTA des différents scénarios car les bénéfices totaux actualisés (BTA) ne sont pas à l'échelle des dépenses. Les résultats des simulations intégrant des effets du changement climatique ne sont pas présentés car les variations de résultats par rapport aux simulations sans changement climatique sont négligeables.

### 6.2.2. Conclusion et recommandations

Ces résultats montrent que l'HD n'a pas d'efficacité sur l'inondation du bâti, ces aménagements restent donc bien seulement des aménagements anti-érosifs et non pas anti-ruissellement. En l'état, le modèle d'évaluation économique, qui ne capte que les variations de risque inondation (aléa caractérisé par une surface inondée, une hauteur d'eau, une vitesse d'écoulement et une durée de submersion), ne permet pas de saisir les bénéfices fournis par l'HD vis-à-vis de la réduction du transport de sédiment.

Rappelons que dans le modèle économique, du côté de l'aléa, les deux variables ayant le plus d'influence sur les montants de dommage sont la surface exposée et la hauteur d'eau. Or, les ouvrages d'HD ayant peu d'influence sur les volumes ruisselés, les résultats du modèle WaterSed présentent une faible variation des surfaces et hauteurs d'eau.

La chaîne de modélisation (hydro-sédimentaire puis économique) fait apparaître des bénéfices à l'amélioration des pratiques agricoles. Cette réorientation stratégique est donc, ici encore, à approfondir. Encore une fois, le modèle d'évaluation économique appliqué ne valorise pas la réduction de la charge sédimentaire que permettent les ouvrages d'HD et qui sont très clairement mis en lumière par les résultats des simulations Watersed.

Une des limites de ce travail est que nous n'avons pas réussi à intégrer les coûts des dommages liés au dépôt de sédiments sur la voirie et dans les réseaux d'eau pluviale faute de données économiques. Les principaux gestionnaires de voirie et de réseaux d'eau pluviale ont été contactés mais ne disposaient pas de données permettant la construction d'une fonction de coût associée à ces perturbations. Pour permettre l'évaluation du coût des interventions sur ces réseaux, il serait nécessaire que les gestionnaires recensent et caractérisent l'ensemble des interventions de curage, nettoyage et évacuation rendues nécessaires par les dépôts sédimentaires (temps passés, engins, volumes évacués, destination des sédiments). Quand bien même ces impacts avaient été pris en compte, il paraît peu probable que les résultats soient significativement impactés. Pour 2018, année riche en ruissellement et érosion, le coût de nettoyage de voiries donné par le gestionnaire des routes départementales pour les secteurs de Montivilliers et Gonnevill-la-Mallet (correspondant grossièrement au BV de la Lézarde) est de l'ordre de 40 000 euros seulement.

Même si, globalement, un scénario ambitieux d'aménagement d'hydraulique douce n'est pas efficace sur les inondations, les HD peuvent être utiles localement en protection rapprochée d'enjeux tels que des voiries, des ouvrages structurants, voire du bâti, en réduisant le flux de sédiments.

Le rôle de l'hydraulique douce est aussi et surtout de réduire les transferts de matières en suspension vers les captages d'eau potable via le karst. Ce point est analysé dans le volume 4.

Enfin, les aménagements d'hydraulique douce peuvent présenter des intérêts complémentaires en termes de biodiversité par exemple, qui ne sont pas chiffrés ici.

Pour finir, il faut souligner que si on couple les coûts et les bénéfices des ouvrages d'HS et d'HD, la VAN reste toujours positive. Autrement dit, même en ne considérant que la lutte contre les inondations, la somme des coûts des ouvrages d'HS et d'HD est inférieure à la somme des bénéfices fournis en termes de réduction des dommages.

## 7. Conclusion de l'analyse coût-bénéfice

L'analyse coût-bénéfice des ouvrages d'hydraulique structurante et d'hydraulique douce a été réalisée sur une période comprise entre 2000 et 2050, en suivant la méthodologie proposée dans le guide du CGDD pour l'évaluation des projets de lutte contre les inondations (CGDD, 2018). Les fonctions de dommage disponibles dans le guide ont été appliquées pour évaluer les bénéfices apportés par les ouvrages en termes de réduction des aléas inondation et coulée boueuse sous différents scénarios d'aménagements, ainsi qu'avec l'intégration des effets du changement climatique et avec une modification des pratiques agricoles. Des fonctions de coûts d'investissement et d'entretien des ouvrages ont été construites en utilisant les bases de données et des publications locales.

Les résultats obtenus montrent que la performance économique des ouvrages d'hydraulique structurante tels qu'ils ont été mis en œuvre dans le bassin versant de la Lézarde est bonne ; sur un horizon temporel allant de 2000 à 2050, les bénéfices sont environ deux fois plus élevés que les coûts, même si des dommages moyens annuels résiduels persistent à hauteur d'environ 1,4 M€. La persistance du risque implique de mettre en œuvre des politiques complémentaires de maîtrise des risques et de développement de la culture du risque. La pertinence de ces ouvrages est d'autant plus importante que l'on intègre les effets du changement climatique car dans ces scénarios, les dommages évités moyens annuels augmentent mais le montant des dommages résiduels augmente aussi. L'analyse des résultats montre également que l'évolution des pratiques agricoles a un impact fort sur le risque inondation dans son ensemble. Avec une augmentation de 20 % de l'infiltration sur les terres cultivées, ce sont non seulement les dommages évités moyens annuels qui augmenteraient de 12 % par rapport à la situation avec seulement les ouvrages d'hydraulique structurante mais aussi les dommages résiduels qui baisseraient de 20 %. À l'inverse, une réduction des surfaces en herbe de 33 % augmenterait de 27 % le niveau des dommages moyens annuels et dégraderait de 17 % le montant des dommages évités moyens annuels que permettent les ouvrages. De plus, à l'échelle du bassin versant, cette réduction des capacités d'infiltration causerait une augmentation de 20 % des flux sédimentaires.

Concernant le travail réalisé sur les ouvrages d'hydraulique douce, les modélisations hydro-sédimentaires montrent que ces ouvrages influencent très peu les surfaces inondées ainsi que les hauteurs d'eau au droit des ouvrages exposés, mais ils permettent de réduire localement la charge sédimentaire des écoulements. Les fonctions de dommage utilisées n'intègrent pas de paramètre relatif à la charge sédimentaire des écoulements. Elles ne sont donc pas adaptées pour capter les principaux bénéfices de ces ouvrages. Les résultats de l'analyse coût-bénéfice ne font donc pas apparaître de réduction des dommages du fait de la mise en œuvre des ouvrages d'hydraulique douce. Cela ne signifie pas que les ouvrages d'hydraulique douce ne sont pas porteurs de bénéfices mais que le calcul économique tel qu'il est mis en œuvre dans cette étude ne permet pas de saisir ces bénéfices.

L'absence de données empiriques historiques concernant l'aggravation des dommages induits par une augmentation de la charge sédimentaire dans les eaux d'inondation ne permet pas de construire des fonctions de dommage permettant de saisir ce phénomène. Il s'agit là d'une perspective pour de futurs travaux de recherche.

Les coulées boueuses souillent les voies de circulation et colmatent les réseaux de drainage et d'évacuation des eaux pluviales. Les ouvrages d'hydraulique douce permettent potentiellement de réduire fortement ces impacts mais ces phénomènes n'ont pas pu être pris en compte car les gestionnaires des voiries et des réseaux d'eau pluviale interrogés dans le cadre de ce travail ne disposaient pas de données.

La collecte de données concernant la fréquence et les coûts des interventions de curage est un prérequis pour la construction de fonctions de coût utilisables dans une analyse coût-bénéfice. Il s'agit d'une piste d'amélioration importante pour les travaux futurs.

Les effets des ouvrages d'hydraulique douce sur la réduction de la turbidité aux captages d'alimentation en eau potable, et par voie de conséquence sur les coûts de production de l'eau potable, ont été évalués dans le Volume 4.

Compte tenu des nombreuses perspectives d'amélioration, l'équipe d'étude recommande que les gestionnaires locaux soient encouragés à collecter les données nécessaires à la constitution des fonctions de coût et de dommage manquantes. Une fois ces données disponibles en qualité et en quantité suffisante, il sera possible de réaliser une meilleure appréciation des bénéfices fournis par les ouvrages d'hydraulique douce.

## 8. Bibliographie

- André, C.**, 2013. Analyse des dommages liés aux submersions marines et évaluation des coûts induits aux habitations à partir de données d'assurance : perspectives apportées par les tempêtes Johanna (2008) et Xynthia (2010).
- ARS**, 2013. Les eaux distribuées en Haute-Normandie en 2011 - Origine, organisation, contrôle et qualité.
- Auzet, V.**, 1987. L'érosion des sols cultivés en France sous l'action du ruissellement. *Ann. Geogr.* 537, 529–556.
- Boiffin, J., François, P., Eimberck, M.**, 1988. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I. Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie* 663–673.
- CEPRI**, 2011. L'ACB (analyse coût/bénéfice) : une aide à la décision au service de la gestion des inondations 42.
- CEPRI**, 2016. Le territoire et ses réseaux techniques face au risque d'inondation 88.
- CEPRI**, 2013. Méthode d'évaluation et de caractérisation des déchets post-inondation.
- Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Govers, G., Lecomte, V., Van Oost, K., Couturier, A., King, C., Dubreuil, N.**, 2004. Scale effect on runoff from experimental plots to catchments in agricultural areas in Normandy. *J. Hydrol.* 299, 4–14. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.02.017>
- Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Souchère, V., Martin, P., Lecomte, V.**, 2002. Sediment concentration in interrill flow: Interactions between soil surface conditions, vegetation and rainfall. *Earth Surf. Process. Landforms* 27, 193–205. <https://doi.org/10.1002/esp.314>
- CESER**, 2018. Contribution au SRADDET - Pour une stratégie ambitieuse en faveur de la réduction de la consommation d'espaces agricoles et naturels. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- CGDD**, 2018. Analyse multicritère des projets de prévention des inondations - Guide méthodologique 2018.
- CGSP**, 2013. L'évaluation socioéconomique des investissements publics, Commissariat Général à la Stratégie et à la Prospective, rapport de la mission Présidée par Emile Quinet.
- Delmas, M., Pak, L.T., Cerdan, O., Souchère, V., Le Bissonnais, Y., Couturier, A., Sorel, L.**, 2012. Erosion and sediment budget across scale: A case study in a catchment of the European loess belt. *J. Hydrol.* 420–421, 255–263. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.008>
- Eleuterio, J., Payraudeau, S., Rozan, A.**, 2008. Sensibilité de l'évaluation des dommages associés aux inondations en fonction de la caractérisation de la vulnérabilité des bâtiments. *Ingénieries - E A T* 29 – 44.

- Floyd, P., Tunstall, S.**, 2005. The appraisal of human-related intangible impacts of flooding. Rep. Proj. FD. <https://doi.org/10.7423/XJENZA.2015.2.07>
- Fournier, M.**, 2006. Identification des modalités de transport et de la vulnérabilité du karst de la craie. Application de nouveaux outils statistiques s'analyse des données au système du Hannebot (Seine Maritime, France). Université de Rouen.
- Frongia, S., Sechi, G.M., Davison, M.**, 2016. Tangible and Intangible Flood damage evaluation. E3S Web Conf. 7, 4–10. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160705007>
- Hallegatte, S.**, 2008. An adaptive regional input-output model and its application to the assessment of the economic cost of Katrina. Risk Anal. 28, 779–799. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2008.01046.x>
- Hallegatte, S., Rentschler, J., Rozenberg, J.**, 2019. Lifelines, The resilient Infrastructure Opportunity.
- Hammond, M.J., Chen, A.S., Djordjević, S., Butler, D., Mark, O.**, 2015. Urban flood impact assessment: A state-of-the-art review. Urban Water J. 12, 14–29. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2013.857421>
- Institution Adour**, 2016. Démarche de lutte contre l'érosion des sols : De la préparation à la mise en oeuvre Guide pratique Erosion.
- Landemaine, V.**, 2016. Érosion des sols et transferts sédimentaires sur les bassins versants de l'Ouest du Bassin de Paris : analyse, quantification et modélisation à l'échelle pluriannuelle. Thèse de doctorat. Université de Rouen-Normandie.
- Le Bissonais, Y., Benkhadra, H., Chaplot, V., Fox, D., King, D., Daroussin, J.**, 1998. Crusting, runoff and sheet erosion on silty loamy soils at various scales and upscaling from m<sup>2</sup> to small catchments. Soil Tillage Res. 46, 69–80. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(97\)00079-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(97)00079-2)
- Le Bissonais, Y., Cerdan, O., Lecomte, V., Benkhadra, H., Souchère, V., Martin, P.**, 2005. Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. Catena 62, 111–124. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.05.001>
- Le Bissonais, Y., Montier, C., Jamagne, M., Daroussin, J., King, D.**, 2002. Mapping erosion risk for cultivated soil in France. Catena 46, 207–220. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00167-9](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00167-9)
- Lekuthai, A., Vongvisessomjai, S.**, 2001. Intangible Flood Damage Quantification. Water Resour. Manag. 114, 635–646. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1988\)114:6\(635\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1988)114:6(635))
- Maetens, W., Poesen, J., Vanmaercke, M.**, 2012. How effective are soil conservation techniques in reducing plot runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean? Earth-Science Rev. 115, 21–36. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.08.003>
- Markantonis, V., Meyer, V., Schwarze, R.**, 2012. Valuating the intangible effects of natural hazards - Review and analysis of the costing methods. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 12, 1633–1640. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-1633-2012>
- Nathan, R.J., McMahon, T.A.**, 1990. Evaluation of Automated Techniques for Base Flow and Recession Analyses. Water Resour. Res. 26, 1465–1473.

**Ouvry, J.F., Coufourier, N., Richet, J.B., Lhériveau, M., Pivain, Y., Martin, P., Lecomte, V., Barrier, C., Witkowski, D., Saint-Omer, L., Corruble, C., Luce, M., 2012a.** Maîtrise du ruissellement et de l'érosion des sols en Haute-Normandie. Expérimentations sur les pratiques culturales 2001-2010. Synthèse des résultats de ruissellement et d'érosion. Groupe Maîtrise du ruissellement par les pratiques culturales.

**Ouvry, J.F., Richet, J.B., Bricard, O., Lhériveau, M., Bouzid, M., Saunier, M., 2012b.** Fascines et haies pour réduire les effets du ruissellement érosif - Caractérisation de l'efficacité et conditions d'utilisation.

Papy F., Boiffin, J., **1988. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. II.** Evaluation des possibilités de maîtrise du phénomène dans les exploitations agricoles. *Agronomie* 8, 745–756.

**Przyluski, V., Hallegatte, S., 2011.** Indirect Costs of Natural Hazards 40.

**Richet, J.-B., Gril, J.-J., Ouvry, J., 2006.** Infiltrabilité de dispositifs enherbés du Pays de Caux , premiers résultats.

**Souadi, T., King, C., Le Bissonnais, Y., 2000.** Cartographie régionale de l'aléa érosion des sols en région Haute-Normandie. BRGM/RP-50454-FR 95.



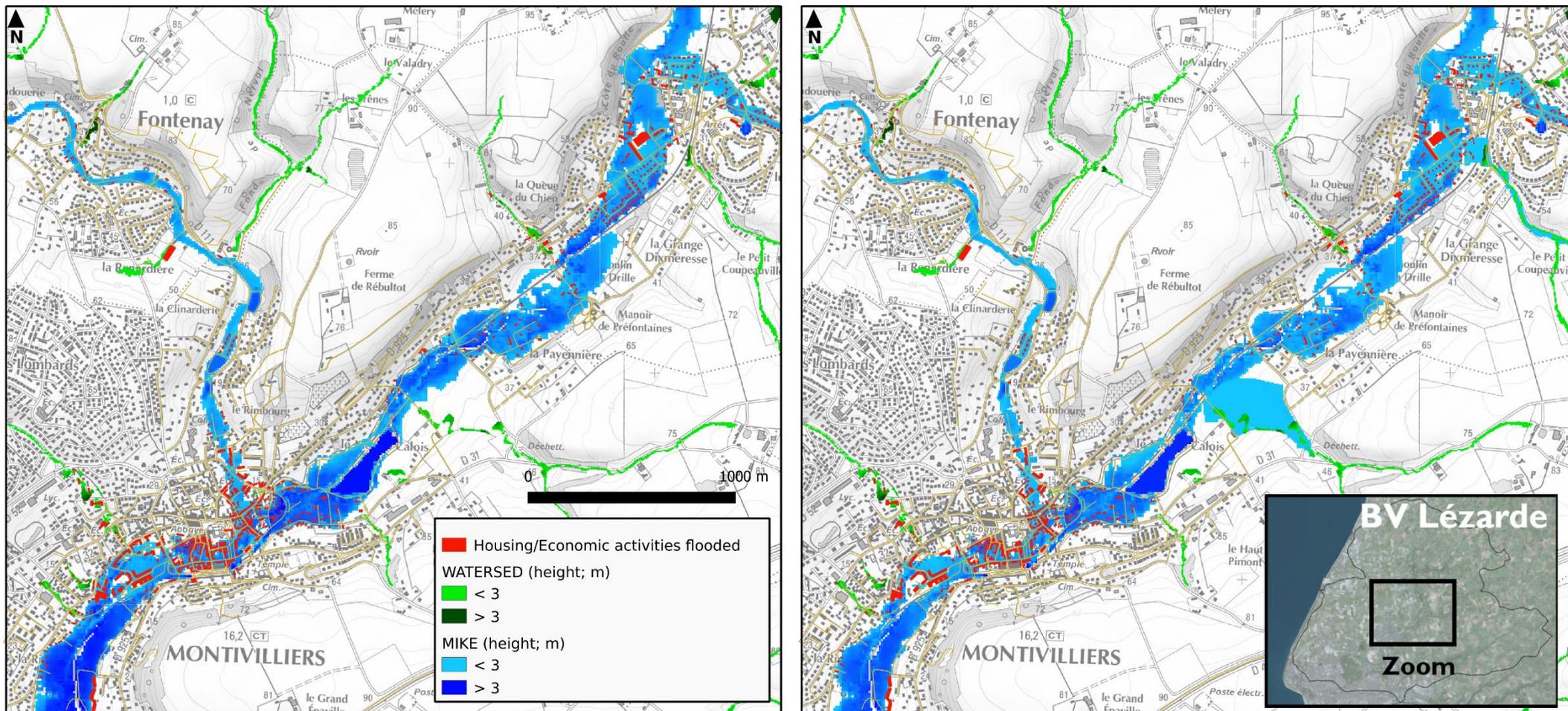
## Annexe 1

### **Extrait cartographique des résultats des modélisations Mike et Watersed pour deux scénarios**

La Figure 63 présente un extrait cartographique des résultats des modélisations Mike et Watersed pour deux scénarios. On remarque une réduction du nombre de bâtiments touchés et une légère réduction des surfaces inondées et des hauteurs d'eau.

Inversement, il arrive que ponctuellement les modèles hydrauliques fassent apparaître de fausses nouvelles zones inondées. Lorsque ces nouvelles zones inondées ne sont pas causées par la rétention d'eau due à des ouvrages hydrauliques, il s'agit d'artéfacts du modèle. Ce phénomène est très rare, les hauteurs d'eau y sont extrêmement faibles (environ 1 cm) et par chance, aucun enjeu n'est concerné.

Analyse coût-bénéfice des actions de lutte contre le ruissellement et l'érosion



Q100 \_ Scénario de référence sans ouvrages

Q100 \_ Scénario avec ouvrages d'HD et HS, et amélioration des pratiques agricoles

Figure 63 : Extrait cartographique des résultats des modélisations Miket et Watersed et identification des enjeux exposés.

## **Annexe 2**

### **Quelques tableaux de résultats intermédiaires détaillés par enjeux et communes**



## Q100\_ref0 – débordement de cours d'eau

Euros 2000 Commune	Dommages logements		Dommages entreprises		Etabl. publics	TOTAL
	Bâti	Mobilier et sous sol	Bâti	équipement et stock		
Angerville-l'Orcher	-	-	-	-	-	-
Anglesqueville-l'Esneval	-	-	-	-	-	-
Criquetot-l'Esneval	-	-	-	-	-	-
Gommerville	-	-	-	-	-	-
Graimbouville	-	-	-	-	-	-
Hermeville	-	-	-	-	-	-
Mannevillette	-	-	-	-	-	-
Rogerville	-	-	-	-	-	-
Sainneville	-	-	-	-	-	-
Saint-Gilles-de-la-Neuville	-	-	-	-	-	-
Saint-Jouin-Bruneval	-	-	-	-	-	-
Saint-Romain-de-Colbosc	-	-	-	-	-	-
Saint-Sauveur-d'Emalleville	-	-	-	-	-	-
Ecrainville	-	-	-	-	-	-
Epretot	-	-	-	-	-	-
Etainhus	-	-	-	-	-	-
Vergetot	-	-	-	-	-	-
Gonneville-la-Mallet	4 560	5 178	-	-	-	9 737
Cauville-sur-Mer	4 591	5 319	-	-	-	9 910
Saint-Aubin-Routot	5 806	9 178	-	-	-	14 984
Le Havre	800	1 265	8 575	6 510	-	17 150
Turretot	13 486	15 315	-	-	2 780	31 582
Gainneville	12 676	21 338	-	-	-	34 014
Manéglise	12 213	17 954	1 519	7 913	-	39 599
Heuqueville	16 416	19 568	2 402	24 416	-	62 803
Saint-Martin-du-Manoir	16 018	23 290	1 734	62 794	-	103 835
Saint-Laurent-de-Brèvedent	3 614	4 459	-	-	96 308	104 381
Saint-Martin-du-Bec	48 173	61 505	-	-	-	109 677
Rolleville	29 591	37 606	8 877	86 049	15 982	178 104
Fontenay	24 060	36 857	5 478	159 222	-	225 619
Fontaine-la-Mallet	93 259	133 857	3 682	9 396	-	240 195
Notre-Dame-du-Bec	102 923	133 466	3 722	4 211	-	244 322
Octeville-sur-Mer	85 961	113 349	15 093	529 629	7 959	751 992
Gonfreville-l'Orcher	201 043	294 967	150 305	928 475	82 798	1 657 589
Epouville	525 016	742 644	42 403	1 637 410	40 890	2 988 364
Montivilliers	907 002	1 334 087	1 025 921	6 300 925	401 831	9 969 766
Harfleur	457 064	612 370	475 831	9 929 590	1 089 722	12 564 577
<b>TOTAL</b>	<b>2 564 272</b>	<b>3 623 572</b>	<b>1 745 542</b>	<b>19 686 541</b>	<b>1 738 271</b>	<b>29 358 200</b>

<b>Commune</b>	<b>Domages aux cultures</b>
Angerville-l'Orcher	-
Anglesqueville-l'Esneval	-
Criquetot-l'Esneval	-
Gainneville	-
Gommerville	-
Gonfreville-l'Orcher	-
Graimbouville	-
Rogerville	-
Saint-Gilles-de-la-Neuville	-
Saint-Sauveur-d'Emalleville	-
Ecrainville	-
Etainhus	-
Vergetot	-
Harfleur	24
Saint-Aubin-Routot	71
Le Havre	79
Saint-Romain-de-Colbosc	151
Saint-Jouin-Bruneval	221
Fontenay	521
Rolleville	603
Epretot	701
Hermeville	704
Heuqueville	842
Sainneville	899
Epouville	946
Manéglise	1 006
Turretot	1 507
Cauville-sur-Mer	1 872
Mannevillette	2 225
Saint-Martin-du-Bec	2 766
Montivilliers	2 864
Notre-Dame-du-Bec	2 896
Gonneville-la-Mallet	3 610
Saint-Laurent-de-Brèvedent	4 341
Fontaine-la-Mallet	7 991
Octeville-sur-Mer	8 531
Saint-Martin-du-Manoir	11 268
<b>TOTAL</b>	<b>56 640</b>

## Q100\_ref1 – coulée boueuse

Euros 2000 Commune	Dommages logements		Dommages entreprises		Etab publics	TOTAL
	Bâti	Mobilier et sous sol	Bâti	Equip et stocks		
Anglesqueville-l'Esneval	-	-	-	-	-	-
Criquetot-l'Esneval	-	-	-	-	-	-
Graimbouville	-	-	-	-	-	-
Le Havre	-	-	-	-	-	-
Notre-Dame-du-Bec	-	-	-	-	-	-
Rogerville	-	-	-	-	-	-
Saint-Aubin-Routot	-	-	-	-	-	-
Saint-Gilles-de-la-Neuville	-	-	-	-	-	-
Saint-Romain-de-Colbosc	-	-	-	-	-	-
Ecrainville	-	-	-	-	-	-
Epouville	-	-	-	-	-	-
Sainneville	260	410	-	-	-	670
Epretot	615	699	-	-	-	1 314
Hermeville	530	838	-	-	-	1 368
Manéglise	596	943	-	-	-	1 539
Gonneville-la-Mallet	1 271	2 009	-	-	-	3 279
Saint-Martin-du-Bec	1 464	2 309	-	-	-	3 773
Gommerville	1 557	2 462	-	-	-	4 019
Harfleur	2 108	2 340	-	-	-	4 449
Turretot	828	1 308	-	-	4 506	6 642
Vergetot	3 213	3 668	-	-	-	6 882
Saint-Sauveur-d'Emalleville	3 414	5 397	-	-	-	8 811
Etainhus	4 819	7 619	-	-	-	12 438
Gainneville	5 687	8 776	-	-	-	14 463
Angerville-l'Orcher	5 762	9 124	531	5 605	-	21 022
Gonfreville-l'Orcher	12 698	9 648	-	-	-	22 346
Rolleville	11 202	13 636	49	9 114	-	34 001
Saint-Jouin-Bruneval	1 735	2 742	149	30 509	-	35 135
Mannevillette	21 689	26 378	-	-	-	48 067
Saint-Laurent-de-Brèvedent	10 726	14 512	181	2 453	20 995	48 867
Heuqueville	10 016	15 460	2 298	10 796	10 466	49 036
Fontenay	-	-	762	51 828	2 149	54 739
Fontaine-la-Mallet	-	-	9 239	57 663	-	66 902
Saint-Martin-du-Manoir	2 866	4 531	649	203 152	-	211 199
Octeville-sur-Mer	18 747	24 968	1 833	119 351	208 432	373 331
Cauville-sur-Mer	-	-	1 421	582 649	-	584 070
Montivilliers	68 787	99 460	43 591	634 568	2 740	849 147
<b>TOTAL</b>	<b>190 590</b>	<b>259 237</b>	<b>60 704</b>	<b>1 707 688</b>	<b>249 288</b>	<b>2 467 507</b>

Euros 2000

<b>Commune</b>	<b>Domages aux cultures</b>
Angerville-l'Orcher	1 899
Anglesqueville-l'Esneval	4 549
Cauville-sur-Mer	6 256
Criquetot-l'Esneval	1 669
Fontaine-la-Mallet	809
Fontenay	6 846
Gainneville	978
Gommerville	4 820
Gonfreville-l'Orcher	0
Gonneville-la-Mallet	8 078
Graimbouville	5 453
Harfleur	-
Hermeville	540
Heuqueville	7 583
Le Havre	2 876
Manéglise	7 179
Mannevillette	3 986
Montivilliers	6 682
Notre-Dame-du-Bec	352
Octeville-sur-Mer	26 352
Rogerville	-
Rolleville	2 677
Sainneville	7 090
Saint-Aubin-Routot	9
Saint-Gilles-de-la-Neuville	-
Saint-Jouin-Bruneval	4 660
Saint-Laurent-de-Brèvedent	2 577
Saint-Martin-du-Bec	2 127
Saint-Martin-du-Manoir	5 587
Saint-Romain-de-Colbosc	10 322
Saint-Sauveur-d'Emalleville	1 244
Ecrainville	-
Epouville	734
Epretot	4 167
Etainhus	7 652
Turretot	3 111
Vergetot	8 176
<b>TOTAL</b>	<b>157 039</b>

## **Annexe 3**

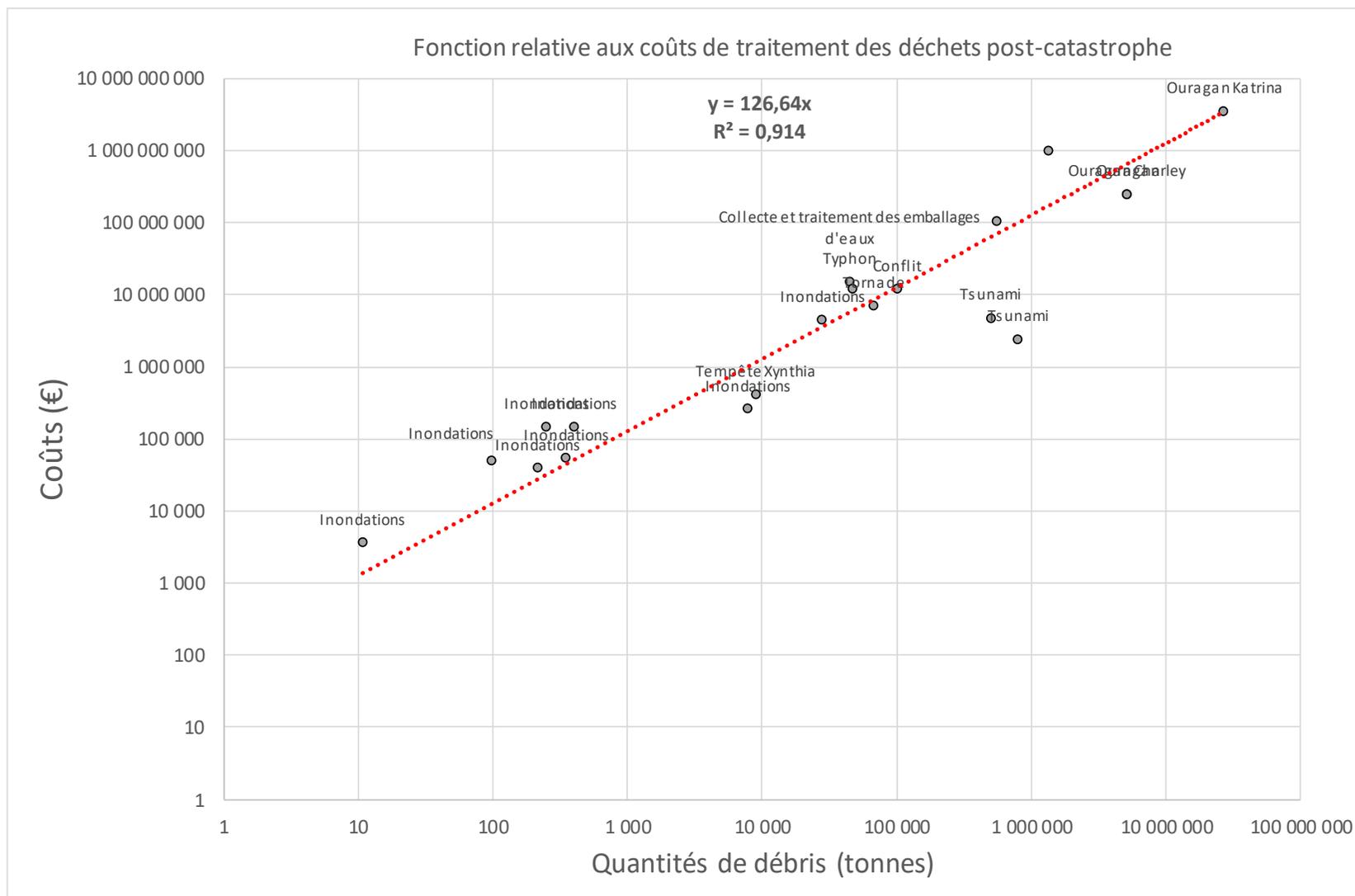
# **Construction d'une fonction de coût de gestion des déchets d'inondation**



## Analyse coût-bénéfice des actions de lutte contre le ruissellement et l'érosion

Source de données					Evènements quantifiés							
Auteur	Titre	Année	Journal / Type	Lien	Année	Désastre	Lieu	Quantité de débris (tonnes)	Coût (\$)	Coût (€-2018)	Coût de la tonne de débris (€)	Remarques
Basnayake, B., Chiemchaisri, C., Visvanathan, C.	Wastelands: clearing up after the tsunami in Sri Lanka and Thailand	2006		<a href="https://waste-management-world.com/a/wastelands">https://waste-management-world.com/a/wastelands</a>	2004	Tsunami	Sri Lanka	500 000	5 500 000	4 840 000	10	Aux US, FEMA (2007) estime que les coûts liés aux opérations de gestion des débris représentent 27% des coûts pour la remise en état entre 2002 et 2007
Basnayake, B., Chiemchaisri, C., Visvanathan, C.	Wastelands: clearing up after the tsunami in Sri Lanka and Thailand	2006		<a href="https://waste-management-world.com/a/wastelands">https://waste-management-world.com/a/wastelands</a>	2004	Tsunami	Thaïlande	800 000	2 800 000	2 464 000	3	
Brown, C., Milke, M., Seville, E.	Disaster waste management: a review article	2011	Waste Management	10.1016/j.wasman.2011.01.027	2004	Typhon	Japon	44 780	17 500 000	15 400 000	344	
Brown, C., Milke, M., Seville, E.	Disaster waste management: a review article	2011	Waste Management	10.1016/j.wasman.2011.01.027	1999	Conflit	Kosovo	100 000	13 700 000	12 056 000	121	
Brown, C., Milke, M., Seville, E.	Disaster waste management: a review article	2011	Waste Management	10.1016/j.wasman.2011.01.027	2009	Ouragan	Floride, US	5 130 000	286 000 000	251 680 000	49	
Brown, C., Milke, M., Seville, E.	Disaster waste management: a review article	2011	Waste Management	10.1016/j.wasman.2011.01.027	1998	Tornado	Osceola County, US	67 500	8 000 000	7 040 000	104	
Bommelaer, O., Devaux, J.	Le financement de la gestion des ressources en eau en France	2012	Etudes & Documents - Commissariat général au développement durable	<a href="http://dise.seine-maritime.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/financement_eaujanv2012_cle061fe6.pdf">http://dise.seine-maritime.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/financement_eaujanv2012_cle061fe6.pdf</a>	Annuel	Collecte et traitement des emballages d'eaux	France	47 160		12 000 000	254	Basé sur un poids moyen de 30g d emballage pour une bouteille d'eau plastique + un coût de collecte et traitement d'environ 250€/tonnes
CEPRI	Gestion des déchets post-inondation - approche pour une méthodologie d'élaboration de plans de gestion	2012	Les guides du Cepri	<a href="https://cepri.net/tl_files/pdf/rap.%20gestion%20dechets%20post%20cat.pdf">https://cepri.net/tl_files/pdf/rap.%20gestion%20dechets%20post%20cat.pdf</a>	juin-10	Inondations	Var	28 000		4 500 000	161	
CEPRI	Gestion des déchets post-inondation - approche pour une méthodologie d'élaboration de plans de gestion	2012	Les guides du Cepri	<a href="https://cepri.net/tl_files/pdf/rap.%20gestion%20dechets%20post%20cat.pdf">https://cepri.net/tl_files/pdf/rap.%20gestion%20dechets%20post%20cat.pdf</a>	Non renseigné	Inondations	Angleterre (Hull City Council)	7 800		261 719	34	8000 habitations + 1300 batiments commerciaux et industriels
ADEME	Intégration des déchets en situation exceptionnelle dans les Plans de prévention et de gestion des déchets non dangereux et dangereux	2013	Mémo pratique	<a href="https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/20131101_integrat%20dechets%20plans_prevention_gestion.pdf">https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/20131101_integrat%20dechets%20plans_prevention_gestion.pdf</a>	févr-10	Tempête Xynthia	Vendée	9 000		420 000	47	
Groupement d'Expertise e	Les déchets des inondations du 28 mai au 5 juin 2016 dans les bassins amont de la Seine et de la Loire	2017	Rapport	<a href="http://www.robindesbo">http://www.robindesbo</a>	2016	Inondations	Gidy	350		55 000	157	
Groupement d'Expertise e	Les déchets des inondations du 28 mai au 5 juin 2016 dans les bassins amont de la Seine et de la Loire	2017	Rapport	<a href="http://www.robindesbo">http://www.robindesbo</a>	2016	Inondations	Charny-Orée-de-Puisaye	98		51 000	520	
Groupement d'Expertise e	Les déchets des inondations du 28 mai au 5 juin 2016 dans les bassins amont de la Seine et de la Loire	2017	Rapport	<a href="http://www.robindesbo">http://www.robindesbo</a>	2016	Inondations	Melun	214		39 955	187	

Source de données					Evènements quantifiés							
Auteur	Titre	Année	Journal / Type	Lien	Année	Désastre	Lieu	Quantité de débris (tonnes)	Coût (\$)	Coût (€-2018)	Coût de la tonne de débris (€)	Remarques
Groupement d'Expertise e	Les déchets des inondations du 28 mai au 5 juin 2016 dans les bassins amont de la Seine et de la Loire	2017	Rapport	<a href="http://www.robindesbo">http://www.robindesbo</a>	2016	Inondations	Chartrettes	11		3 668	343	
Groupement d'Expertise e	Les déchets des inondations du 28 mai au 5 juin 2016 dans les bassins amont de la Seine et de la Loire	2017	Rapport	<a href="http://www.robindesbo">http://www.robindesbo</a>	2016	Inondations	Morin	400		150 000	375	
BFM TV	Crues de la Seine: 250 tonnes de déchets retenus par une écluse dans les Yvelines	2018	Article de Presse	<a href="https://www.bfmtv.com">https://www.bfmtv.com</a>	févr-18	Inondations	Méricourt	250		150 000	600	déchets accumulés à l'amont d'un barrage. Traitement par VNF
FEMA	Hurricane Charley Recovery - by the numbers	2009	Article de presse	<a href="https://www.fema.gov">https://www.fema.gov</a>	2004	Ouragan Charley	USA	5 130 000	286 000 000	252 485 090	49	
Lorca, A., Celik, M., Ergun,	A decision-support tool for post-disaster debris operations	2015	Process Eng	<a href="https://doi.org/10.1016">https://doi.org/10.1016</a>	2005	Ouragan Katrina	USA	27 000 000	4 000 000 000	3 531 260 000	131	
UNEP	Managing post-disaster debris: the Japan experience, report of the international expert mission to Japan, Geneva, Switzerland	2012	Article de conférence	<a href="http://postconflict.unep">http://postconflict.unep</a>	2011	Tsunami	Japon	547 000	120 000 000	105 937 800	194	
UNEP	Managing post-disaster debris: the Japan experience, report of the international expert mission to Japan, Geneva, Switzerland	2012	Article de conférence	<a href="http://postconflict.unep">http://postconflict.unep</a>	2011	Tsunami	Japon	1 350 000	1 150 000 000	1 015 237 250	752	





Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique  
Direction des Risques et Prévention**

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34

[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)