



HAL
open science

Evaluation de l'efficacité des politiques publiques pour les actions visant à réduire les impacts du ruissellement et de l'érosion en Haute-Normandie

Edouard Patault, Ledun Jérôme, Valentin Landemaine, Arnaud Soullignac, Jean-Baptiste Richet, Matthieu Fournier, Jean-Daniel Rinaudo, Jean François Ouvry, Olivier Cerdan, Benoît B. Laignel

► To cite this version:

Edouard Patault, Ledun Jérôme, Valentin Landemaine, Arnaud Soullignac, Jean-Baptiste Richet, et al.. Evaluation de l'efficacité des politiques publiques pour les actions visant à réduire les impacts du ruissellement et de l'érosion en Haute-Normandie. [Rapport de recherche] Université de Rouen Normandie - UMR CNRS 6143 M2C; BRGM; AREAS. 2020. hal-02958904

HAL Id: hal-02958904

<https://hal.science/hal-02958904v1>

Submitted on 6 Oct 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Projet EVAPORE

Evaluation de l'efficacité des politiques publiques pour les actions visant à réduire les impacts du ruissellement et de l'érosion en Haute-Normandie

- Rapport final -

MAI 2020

Porteurs de projet

Structure	UMR CNRS 6143 M2C – Université de Rouen Normandie
Personne(s) responsable(s)	Matthieu FOURNIER & Benoit LAIGNEL
Adresse	Place Emile Blondel 76821 Mont-Saint-Aignan
Téléphone	02.32.76.94.46
Mail	matthieu.fournier@univ-rouen.fr ; benoit.laignel@univ-rouen.fr

Structure	AREAS
Personne(s) responsable(s)	Jean-François OUVRY
Adresse	2 avenue Foch 76460 Saint-Valéry-en-Caux
Téléphone	02.35.97.25.12
Mail	jf.ouvry@areas-asso.fr

Structure	BRGM
Personne(s) responsable(s)	Olivier CERDAN & Jean-Daniel RINAUDO
Adresse	3 avenue Claude GUILLEMIN 45100 Orléans
Téléphone	02.38.64.31.55
Mail	o.cerdan@brgm.fr ; jd.rinaudo@brgm.fr

Equipe projet

Prénom, NOM	Structure	Poste
Edouard PATAULT	UMR CNRS 6143 M2C – Université de Rouen Normandie	Chargé de recherche
Jérôme LEDUN	AREAS	Chargé de mission
Jean-Baptiste RICHET	AREAS	Chargé de mission
Valentin LANDEMAINE	BRGM	Ingénieur d'étude
Arnaud SOULIGNAC	BRGM	Ingénieur d'étude

Financement du projet

Agence de l'Eau Seine Normandie	Université de Rouen Normandie
Conseil Départemental 76	AREAS
Conseil Départemental 27	BRGM

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

Patault, E., Ledun, J., Landemaine, V., Soullignac, A., Richet, J-B., Fournier, M., Rinaudo, J-D., Ouvry, J-F., Cerdan, O., Laignel, B. (2020). Evaluation de l'efficacité des politiques publiques pour les actions visant à réduire les impacts du ruissellement et de l'érosion en Haute-Normandie. Rapport final. Université de Rouen Normandie – AREAS – BRGM, 356p.

Table des matières

Introduction générale.....	1
Contexte & Problématique.....	1
Objectifs du projet EVAPORE.....	2
Découpage du rapport.....	4
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).....	5
1 Introduction du volume 1.....	7
2 Investissements induits par l'érosion, le ruissellement, et la turbidité aux captages AEP .	8
2.1 Subventions et financement des projets.....	8
2.2 Entretien des ouvrages.....	34
3 Dommages induits par l'érosion, le ruissellement, et la turbidité aux captages AEP	42
3.1 Evaluation des dommages au bâti.....	42
3.2 Evaluation des dommages aux infrastructures de transport	47
3.3 Evaluation des dommages pour l'AEP	51
4 Bilan du volume 1 : Principales conclusions & limites.....	57
Volume 2 : Modélisation des scénarios et cartographie des aléas inondations et coulées boueuses sur le bassin versant de la Lézarde	59
1 Introduction du volume 2.....	61
2 Définition des scénarios	62
2.1 Scénarios de base	63
2.2 Scénario d'aménagement ambitieux.....	63
2.3 Scénarios prospectifs à horizon 2050.....	64
3 Cartographie de l'aléa inondation par ruissellement et débordement de rivière (BV Lézarde).....	67
3.1 Modèle existant.....	68
3.2 Modèle hydrologique-hydraulique de versants	68
3.3 Modèle hydraulique de rivière	79
3.4 Couplage et calage des modèles	79
3.5 Paramétrisation des scénarios	81
3.6 Aléa modélisé par scénario.....	85
4 Cartographie de l'aléa inondation par ruissellement et coulée de boue.....	91
4.1 Construction du modèle hydraulique.....	91
4.2 Construction du modèle WaterSed	95
4.3 Calibration et validation du modèle	106
4.4 Cartographie de l'aléa inondation par ruissellement.....	113

4.5 Aléa inondation et coulée de boue par scénario.....	119
5 Bilan du volume 2	144
Volume 3 : Analyse coût-bénéfice des actions de lutte contre le ruissellement et l'érosion des sols sur le bassin versant de la Lézarde	145
1 Introduction du volume 3	147
1.1 Objectifs de l'évaluation économique.....	147
1.2 Principe de l'analyse coût-bénéfice.....	147
1.3 Vue d'ensemble de la démarche	148
2 Définition du périmètre d'analyse.....	149
2.1 Echelle spatiale et modèles physiques	149
2.2 Horizon temporel et actualisation.....	150
2.3 Types de dommages considérés.....	150
3 Détermination de l'exposition du territoire au risque	151
3.1 Modélisation des aléas et scénarios considérés	151
3.2 Caractérisation des enjeux exposés	154
4 Evaluation des dommages.....	157
4.1 Principes des fonctions de dommage.....	157
4.2 Dommages aux logements	158
4.3 Dommages aux établissements économiques	159
4.4 Dommages aux établissements publics.....	163
4.5 Coûts et bénéfices non pris en compte	164
5 Evaluation des coûts des ouvrages.....	166
5.1 Ouvrages considérés.....	166
5.2 Construction des coûts des ouvrages	167
6 Analyse coût-bénéfice	171
6.1 ACB des scénarios de débordement de cours d'eau et de ruissellement dans les talwegs principaux.....	171
6.2 ACB des scénarios de coulées boueuses	176
7 Bilan du volume 3	180
Volume 4 : Modélisation des transferts sédimentaires et des impacts économiques au captage AEP : application au BAC de Radicatel	183
1 Introduction du volume 4	185
2 Site d'étude.....	187
2.1 Le BAC de Radicatel	187
2.2 Données hydro-climatiques.....	188
3 Méthode	189
3.1 Pré-traitement des données.....	189

3.2 Modélisation couplée WaterSed/Deep Learning	190
3.3 Evaluation du modèle couplé	193
3.4 Scénarios et projections futures.....	195
3.5 Définition des pluies de projet	198
3.6 Fonction de coût de traitement de l'AEP & indicateurs économiques	199
4 Calibration & Résultats	200
4.1 Modélisation de l'érosion et du ruissellement.....	200
4.2 Réseau de neurones profond : calibrage & incertitudes.....	201
4.3 Application du modèle couplé aux scénarios	203
4.4 Analyse économique	207
5 Bilan du Volume 4.....	211
Conclusion finale : Enseignements et perspectives	213
Conclusion finale	215
Enseignements et Perspectives.....	218
Bibliographie.....	221
Liste des figures	227
Liste des tableaux	235
Annexes du Volume 1.....	239
Annexes du Volume 2.....	249
Annexes du Volume 3.....	338

Introduction générale

Contexte & Problématique

L'ex-région Haute-Normandie (qui inclut les départements de la Seine-Maritime et de l'Eure) est caractérisée par son hyper-sensibilité aux ruissellements sur tout le territoire avec des conséquences fortes. En effet, d'une part, la Région subit des inondations par ruissellement/coulées de boue dont la densité par kilomètre carré classe la région Haute-Normandie au 2^{ème} 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 la turbidité et selon les années, entre 1 000 et 20 000 habitants sont encore privés d'eau potable quelques jours par an à la suite de ces phénomènes (ARS, 2013). En outre, les questions de présence de produits phytosanitaires retrouvée dans les eaux prélevées, 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 et reconnues depuis les années 1980 (Boiffin et al., 1988 ; Papy and Boiffin, 1988). Elles résultent de la conjonction de nombreux paramètres, notamment la nature des sols, les types et systèmes d'agriculture, l'occupation des sols et la réduction de l'élevage, le sous-sol karstique qui fournit l'eau potable, la forte densité de pertes ou bétoires dans les talwegs, le développement historique des habitats et des activités humaines en fonds de vallée et le paysage d'openfield. À la suite d'une décennie de catastrophes et pollutions importantes, mais également sur la base de stratégies établies à la fin des années 90 à partir de résultats de recherches scientifiques et pratiques, des stratégies d'actions ont été développées.

Ces stratégies reposent sur plusieurs principes d'action qui fondent la politique régionale conduite depuis le début des années 2000 en Région :

- Intervenir à l'échelle pertinente et fonctionnelle qu'est le bassin versant (BV) : organisationnelle, solidarité de BV, étude de BV ;
- Intervenir de façon globale et cohérente pour traiter si possible en même temps les impacts sur les biens et les personnes, l'eau potable et l'érosion ;
- Développer les actions curatives face aux besoins et à la demande sociale tout en développant en parallèle les mesures préventives ;
- Développer des actions préventives visant à maîtriser les ruissellements et l'érosion des sols et à favoriser l'infiltration via de petits aménagements (d'hydraulique douce) sur le chemin de l'eau ;
- Développer les actions préventives avec tous les acteurs du territoire : Agriculteurs et aménageurs urbains ;
- Ces actions préventives nécessitent un fort accompagnement humain, en la présence d'animateurs sur le terrain.

La mise en œuvre et le développement des actions, ont été favorisés par la création d'outils d'accompagnement y compris financiers. 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.

Après plus de 15 années de développement d'actions préventives et correctives sur les bases établies en 2000, se pose la question de la poursuite à l'identique de ces actions : faut-il continuer exactement dans la même direction avec les mêmes objectifs et les mêmes financements ou y-a-t-il lieu de réviser les politiques ?

En effet, les conditions actuelles n'ont plus rien à voir avec celles des années 2000 :

- Les conditions économiques sont nettement moins favorables, étant donné 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) a été réalisée ;
- 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 15 années de recherches scientifiques et techniques complémentaires, avec de nouvelles connaissances, et la réalisation de centaines d'aménagements sur le terrain dans toute leur complexité (acceptation, cohérence d'ensemble, coût, entretien, évolution de l'efficacité), il est possible de réaliser un retour d'expérience solide. Néanmoins les enjeux sont toujours très présents, la pression en termes de risque de ruissellement et d'érosion est toujours forte avec notamment des impacts sur la ressource en eau.

Objectifs du projet EVAPORE

Les deux principaux objectifs de ce programme sont les suivants :

1. Réaliser une évaluation technico-économique de la politique menée depuis 2000 dans le bassin Seine-Aval (Seine-Maritime et Eure) visant à réduire le ruissellement, l'érosion des sols, les coulées de boues/inondations et la turbidité

2. Proposer une adaptation ou réorientation si besoin de la stratégie d'intervention publique au regard de différentes évolutions possibles du territoire et du climat

Pour cela, une approche pluridisciplinaire est proposée (Figure 1). Des spécialistes des sciences de l'eau et du sol développeront des outils de modélisation permettant d'évaluer l'impact des actions de prévention mises en œuvre depuis 2000. Les résultats permettront de chiffrer en termes économiques l'impact des mesures à travers : (i) la réduction de l'aléa inondation et coulée de boue, (ii) les dommages associés, (iii) la réduction de la fréquence et de l'intensité des épisodes de turbidité aux captages d'alimentation en eau potable, et (iv) les coûts de traitement associés. Les économistes évaluent le coût des dommages évités, et les comparent au coût des mesures mises en œuvre (analyse coût-bénéfice). Une évaluation globale des résultats sera enfin réalisée et pourra conduire à des recommandations pour une éventuelle adaptation de la stratégie d'action.

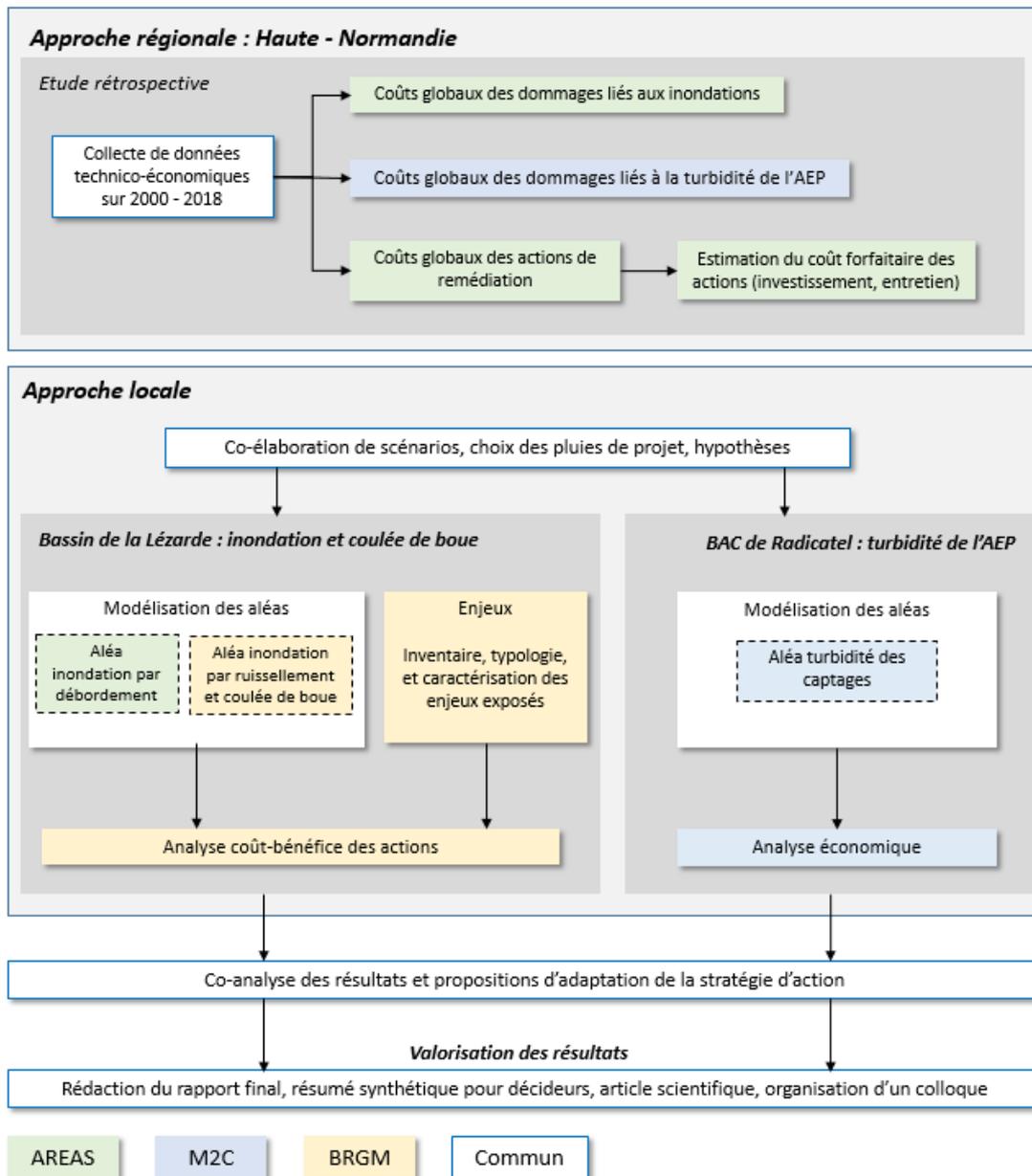


Figure 1 : Approche pluridisciplinaire proposée dans le cadre du projet EVAPORE.

Les principaux dommages pris en compte dans l'étude concernent les inondations par ruissellement / coulées de boue, et la dégradation de la qualité de la ressource en eau souterraine par la turbidité. Au regard de l'état des connaissances actuelles, les impacts sur les rivières (envasement, pollution) ne seront pas chiffrés. Par ailleurs, l'effet des autres pollutions associées au ruissellement, en particulier par les polluants issus des ruissellements agricoles (pesticides, nutriments, etc.) ou urbain n'est pas pris en compte. Actuellement, de telles études à caractère transversal (plusieurs impacts) à l'échelle des bassins versants n'ont pas encore été conduites. Ainsi la méthodologie développée pour réaliser cette analyse constitue en soi un résultat, avec le but de pouvoir être dupliquée sur d'autres territoires érosifs du territoire de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie. L'Analyse Coût-Bénéfice (ACB) complète, incluant les modélisations « inondation » et « qualité de l'eau » et l'analyse économique, nécessite de disposer de nombreuses informations préalables sur les territoires examinés. Ainsi, dans un premier temps, l'étude ne pourra porter que sur des sites d'études bien

documentés. Le choix s'est porté sur le bassin versant de la Lézarde et le bassin d'alimentation de captage de Radicatel (Figure 2).



Figure 2 : Localisation des territoires d'études. L'emprise de la Lézarde correspond au bassin versant, et l'emprise de Radicatel correspond au bassin d'alimentation de captage (Source fond de carte : BD Ortho IGN).

Un large spectre de compétences est 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), et impact régional du changement climatique.

Découpage du rapport

Le présent rapport est découpé en quatre volumes :

1. Le premier volume tend à établir une synthèse globale des investissements et des dommages induits par l'érosion, le ruissellement, et la turbidité aux captages AEP depuis les dernières décennies sur les départements de Seine-Maritime et de l'Eure
2. Le second volume s'attache à présenter la méthodologie développée pour modéliser l'érosion et le ruissellement sur le bassin versant de la Lézarde selon plusieurs pluies de projet et différents scénarii d'occupation du sol
3. Le troisième volume présente les résultats de l'analyse économique pour les différentes simulations présentées dans le second volume
4. Enfin, le quatrième volume détaille la méthodologie développée et les résultats issus de la modélisation couplée du transfert de surface/charge sédimentaire au captage de Radicatel et l'impact économique qui en résulte selon des scénarii prédéfinis

La partie 4 du volume 2, ainsi que le volume 3 de ce rapport sont également disponibles dans le rapport du BRGM : Landemaine et al. (2020).

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)

1 Introduction du volume 1

Le premier volume de ce rapport a pour objectif d'établir une synthèse technico-économique rétrospective des investissements et des dommages induits par l'érosion, les inondations par ruissellement, et la turbidité aux captages AEP depuis les dernières décennies sur les départements de la Seine-Maritime et de l'Eure.

En effet, l'hyper-sensibilité de ces territoires vis-à-vis de ces processus a pour conséquence principale d'induire des dommages au bâti, aux infrastructures de transport, et à l'alimentation en eau potable. Mais à ce jour, aucune étude n'a permis de recenser le coût de l'ensemble de ces dommages sur les dernières décennies. Les données sont le plus souvent détenues par divers acteurs (Caisse Centrale de Réassurance, Conseils Départementaux, Agences Régionales de Santé, Syndicats AEP) pour différentes applications. L'étude des dommages induits par ces processus nécessite donc de concaténer l'ensemble de ces données afin d'avoir une vision exhaustive.

D'autre part, la stratégie d'intervention publique menée depuis les années 2000 pour atténuer l'impact de ces processus (création d'ouvrages, animation, études globales, etc.) a nécessité des investissements massifs, qui sont le plus souvent soutenus par différents financeurs (Agences de l'eau, Conseils Départementaux, Conseil Régional, Etat, etc.). Les bases de données sont administrées par ces différents services et nécessitent un important travail d'homogénéisation afin de pouvoir être analysées conjointement.

En parallèle, la création des ouvrages, structurants ou d'hydraulique douce, a nécessité un entretien régulier pour assurer leur bon fonctionnement. A ce jour, il n'existe pas d'étude permettant d'évaluer l'ensemble de ces coûts sur plusieurs décennies à l'échelle de deux départements. Cette étape nécessite donc de recenser l'ensemble des fonctions de coûts disponibles dans la littérature scientifique, de recenser l'ensemble des ouvrages existants, et enfin de développer un outil pour permettre l'évaluation économique de l'entretien des ouvrages.

Cette démarche doit donc permettre d'avoir une vision claire et synthétique de l'ensemble des coûts économiques (investissements et dommages) induits par les processus de ruissellement et d'érosion depuis les dernières décennies. S'agissant d'une première évaluation de ce type, l'étude s'est focalisée sur les principaux coûts directs générés par ces processus, à travers un important travail de compilation et d'analyse des bases de données existantes, mais aussi d'enquête de terrain auprès des différents acteurs concernés.

2 Investissements induits par l'érosion, le ruissellement, et la turbidité aux captages AEP

2.1 Subventions et financement des projets

2.1.1 Collecte et préparation des bases de données

2.1.1.1 Les bases de données financeurs

Les enquêtes auprès des financeurs ont permis de collecter des fichiers sur les coûts des actions subventionnées (Tableau 1) :

Tableau 1 : Bilan des données technico-économiques collectées auprès des financeurs sur l'Eure et la Seine-Maritime (OS = ouvrages structurants, AHD = aménagements d'hydraulique douce).

Financeurs	Fichiers	Types d'actions financées				Période	Périmètre
		OS	AHD	Etudes	Animation		
AESN	Bilan des aides	✓	✓	✓	✓	2000-2017	Seine-Aval
	Invest. Inond	✓	✓	✓	x	1994-2017	76
CD76	SGEP	x	x	✓	x	2005-2018	76
	Animateurs BV	x	x	x	✓	2006-2015	76
CD27	Financement GES	✓	✓	✓	x	2003-2018	27
Région HN	Engagement CRHN	✓	✓	✓	x	2001-2009	27-76
Etat		x	x	x	x		
Feder		x	x	x	x		
Réserve parlementaire		x	x	x	x		

Ces fichiers contiennent généralement une ligne par subvention, avec l'intitulé de l'action, le maître d'ouvrage, la date, le montant total et le montant subventionné. Des données peuvent manquer dans certains fichiers, comme par exemple le montant total, ce qui a nécessité de prendre des hypothèses afin de reconstituer les données manquantes. Des tableaux de bilans financiers avec la répartition par financeur et par année pour la période 2000-2008 ont aussi été récupérés auprès des services de l'Etat. Malheureusement, il manque des informations sur le type d'actions concernées notamment, ce qui rend impossible le recoupement avec les données détaillées par actions subventionnées issues des autres financeurs.

2.1.1.2 Extraction des actions en lien avec la problématique

Les bases de données des actions financées par les départements de la Seine-Maritime, de l'Eure, et par la région Haute-Normandie, que nous avons collectées, portent exclusivement sur le ruissellement et l'érosion des sols. Il n'a donc pas été nécessaire d'écarter certaines lignes.

Cependant l'ensemble des actions financées par l'AESN, que ce soit pour la gestion des milieux ou pour la lutte contre la pollution, sont regroupées au sein d'une base de données unique nommée "Interventions". Pour les besoins de l'étude, il a été nécessaire dans un premier temps d'extraire les actions en lien avec la réduction de l'érosion, du ruissellement, et de la turbidité au captage AEP.

Pour cela, un premier filtre a été appliqué sur la base des numéros des comptes financiers sur lesquels l'action a été subventionnée. Ainsi à chaque action financée par l'AESN correspond un code lié au compte de dotation et au compte de consommation. Ce prétraitement a nécessité l'extraction d'actions dans 7 comptes de dotation différents, et 18 comptes de consommation. Les codes des comptes utilisés pour l'étude sont synthétisés dans le Tableau 2.

En parallèle, une recherche par mots-clés et une lecture des intitulés des actions a été opérée afin de s'assurer que 100% des actions financées dans la lutte contre l'érosion, le ruissellement, et la turbidité aux captages AEP étaient sélectionnées pour la suite de l'analyse.

Tableau 2 : Numéros des comptes de consommation extraits de la base de données « Interventions » de l'AESN pour l'identification des actions liées à la réduction de l'érosion, du ruissellement, et de la turbidité aux captages AEP.

Compte de dotation		Compte de consommation	
Numéro	Libellé	Numéro	Libellé
21	Gestion quantitative de la ressource	2111	Travaux sur les ouvrages structurants
		2120	Etudes en ZAR Eaux superficielles
		2121	Travaux multiples & entretien, assistance technique en ZAR
23	Protection de la ressource	2310	Assistance technique protection de la ressource
		2311	DUP, études, travaux de protection des eaux superficielles
		2312	DUP, études, travaux de protection des eaux souterraines
		2313	Etudes et actions de préservation de la ressource
		2320	Etudes d'acquisition foncières
		2321	Acquisition foncière
24	Restauration et gestion des milieux aquatiques	2330	<i>Libellé non renseigné</i>
		2414	PDRH : Travaux et études zones humides
25	Utilisation de la ressource	2510	Etudes pour l'AEP des collectivités locales
		2512	Travaux sur la qualité en AEP
		2513	Travaux sur la sécurité en AEP
29	Appui à la gestion concertée	2910	Animation des SAGE et contrats
31	Etudes	3110	Etudes générales d'orientation
32	Mesures	3210	<i>Libellé non renseigné</i>
		3211	Réseaux de mesures sur le milieu

2.1.1.3 Caractérisation des actions

Pour décrire et analyser les différentes sources de données, chaque action a été caractérisée à l'aide d'une classification harmonisée. Cette classification est commune aux deux volets qui seront développés dans ce rapport, à savoir : (i) les actions visant à réduire l'érosion et le ruissellement et (ii) les actions visant à réduire la turbidité aux captages AEP.

Une typologie a été établie pour décrire les actions menées de façon objective, en décrivant les techniques employées. Trois niveaux hiérarchiques ont ainsi été décrits, et nommés : (i) grande catégorie (GC), (ii) catégorie, et (iii) action. Les grandes catégories sont les suivantes :

1. **Ouvrages structurants** : ouvrages de génie civil pour le stockage et le laminage des crues
2. **Aménagements d'hydraulique douce** : aménagements relevant du génie écologique pour la réduction de l'érosion
3. **Aménagements d'hydraulique non précisés** : ouvrages pour la gestion des inondations dont la nature n'est pas précisée, ou opérations faisant appel conjointement à du génie civil et génie écologique
4. **Potabilisation** : réalisation en lien avec le traitement des eaux brutes avant distribution, notamment le traitement de la turbidité
5. **Gestion quantitative de l'AEP** : opération de sécurisation des infrastructures AEP afin de garantir l'alimentation en eau potable en tout temps, notamment en cas de pic de turbidité
6. **Aménagement des points d'engouffrement/bétoires** : actions sur le point de contact entre la surface et l'eau souterraine, tel qu'une bétoire

7. **Réduction de la vulnérabilité aux inondations** : actions visant à réduire la vulnérabilité des enjeux dans les zones inondables
8. **Etudes globales**
9. **Animation**

Les sept premières grandes catégories sont dites “techniques” alors que les deux dernières sont transversales. Les grandes catégories techniques présentent jusqu'à trois catégories, correspondant aux études, travaux, et entretiens. Le niveau hiérarchique “actions” permet un plus grand détail. L'intégralité de la typologie créée est ainsi disponible en annexe de ce rapport (Annexe 1.1).

La finalité des actions est codée par l'affectation de deux valeurs booléennes (0 = faux ; 1 =vrai) pour différencier les actions selon deux volets. Le premier pour les actions dont la finalité vise à réduire l'érosion et le ruissellement et le second pour celles qui visent à réduire la turbidité aux captages AEP. Une action peut être affectée aux deux volets. En règle générale, l'attribution des valeurs booléennes se fait en fonction de la côte affectée à la ligne et des détails mentionnés dans la base de données, sauf cas particuliers. Pour les actions relevant de l'animation ressource en eau et BAC, l'attribution des valeurs pour le volet érosion/ruissellement se fait selon le BAC : la valeur “1” est préférée en Seine-Maritime et “0” pour l'Eure. Ici, en première approximation, nous avons considéré que tous les programmes de protection de captages de Seine-Maritime incluent des mesures relatives à la turbidité, et aucun dans l'Eure. Pour les ouvrages structurants, la valeur “1” est donnée au volet turbidité aux captages AEP lorsque leur création entre dans un plan de protection de point d'engouffrement.

2.1.1.4 Harmonisation des bases de données

Afin d'avoir une analyse globale cohérente sur l'ensemble des fichiers financeurs, les noms des bénéficiaires ont été actualisés pour correspondre à la structure existante en 2017, en tenant compte de leurs compétences. Chaque bénéficiaire a ensuite été catégorisé (commune ; communauté de commune ; communauté d'agglomération ; métropole ; syndicat AEP ; syndicat intercommunal ; de bassin versant ; de rivière ; parc naturel régional ; établissement public et institution ; département ; association ; fédération et conservatoire ; autres). Puis les coordonnées géographiques (Lambert 93) des bénéficiaires ont été renseignées sur la base de la localisation des sièges sociaux. Enfin, les montants retenus des projets ont été harmonisés sur la base de la valeur Hors Taxe (H.T) pour standardiser l'analyse.

2.1.1.5 Croisement des bases de données des différents financeurs (actions sur l'érosion et le ruissellement)

Pour les actions sur l'érosion et le ruissellement, les financements multiples sont majoritaires (Figure 3). L'addition des montants des projets aidés par les différents financeurs surestime donc le montant total, à cause des doublons.

De plus, il est très difficile de rapprocher une à une les données des différents financeurs pour chaque action, pour plusieurs raisons :

- Le libellé d'une même action est souvent différent d'un financeur à l'autre,
- Le montant subventionnable pour une même action varie également selon les financeurs (par exemple pour le financeur A tout le projet est éligible sauf les aspects paysagés, tandis que le financeur B ne retiendra que l'assistance à maîtrise d'ouvrage),

- Un ensemble de réalisations peut avoir été présenté par le maître d'ouvrage comme un unique projet à un financeur, mais découpé en plusieurs projets pour la soumission à un autre financeur,
- Le nombre d'actions renseigné dans ces bases de données est très important.

Seule la base de données de la Région Haute-Normandie mentionne le plan de financement de chaque projet. Il est donc possible d'extraire les actions soutenues uniquement par la Région. Par ailleurs, les Départements de l'Eure et de la Seine-Maritime ne financent pas les mêmes actions (sauf cas particulier) car leurs territoires d'intervention sont distincts.

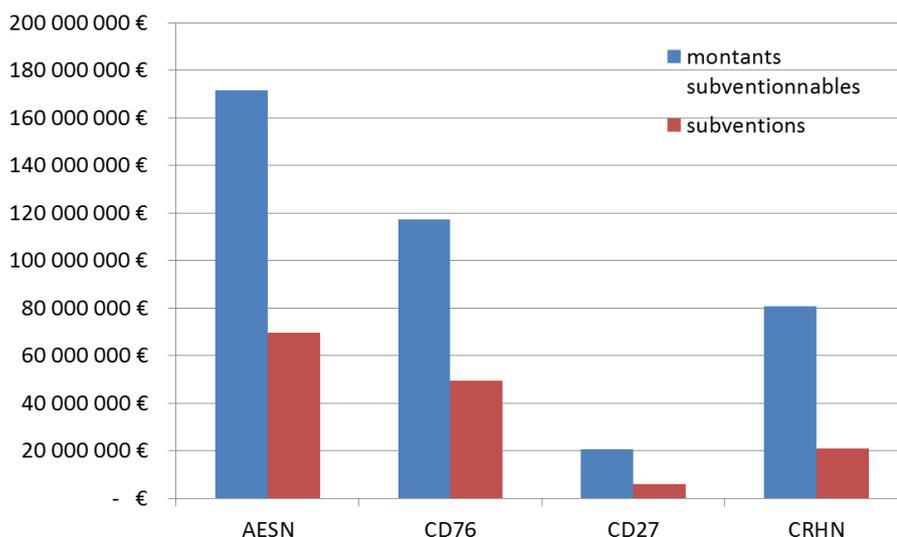


Figure 3 : Montant subventionnable des projets retenus et subventions accordées par financeur pour la période 2000-2017 sur la Haute-Normandie, pour les actions « ruissellement / érosion »

La méthode d'estimation finalement retenue consiste à encadrer le coût total des actions par deux bornes, correspondant à deux hypothèses extrêmes :

- **Hypothèse Basse** : AESN et Département ont toujours participé ensemble au financement, et donc pour le total il faut prendre le montant maximal des projets entre l'AESN et le Département (par catégorie)
- **Hypothèse Haute** : une action n'a jamais reçu d'argent en même temps de l'AESN et du Département, et il faut additionner les montants projets issus des bases de données AESN et Département

Cette méthode suppose qu'aucune action sur le terrain n'est engagée sans financement d'au moins l'un des trois financeurs AESN, Département ou Région Haute-Normandie. Cette hypothèse est confortée par l'analyse détaillée des actions menées sur le bassin versant de l'Austreberthe et du Saffimbec.

2.1.1.6 Définition des ratios pour l'AEP

Les phases d'extraction et d'harmonisation des actions subventionnées en lien avec la réduction de la turbidité pour l'AEP ont mis en évidence qu'une majeure partie des investissements (~42%) était également motivée par une volonté de protection de l'AEP contre d'autres types de pollutions (nitrates, pesticides, HAP, etc.). Dans le but d'effectuer un bilan sur la partie relative à la réduction de la turbidité pour l'AEP, il convient donc d'extraire uniquement les montants relatifs à cette problématique. En concertation avec l'AESN, il a été décidé d'appliquer des ratios spécifiques sur l'ensemble des lignes d'investissements concernées (Tableau 3). Pour la grande catégorie "Animation",

la part relative à l'abattement de la turbidité est estimée à 50%, considérant que ces actions sont menées sur le territoire aussi bien pour lutter contre la turbidité que pour réduire les concentrations en pesticides et nitrates dans les eaux de captage (Figure 4). Pour les grandes catégories "Potabilisation" et "Gestion quantitative de l'AEP", la part relative a été définie à 70%, en considérant pour la première, que dans le coût des Unités de Traitement de l'Eau Potable (UTEP), le bâtiment représentait en moyenne la moitié de l'investissement total et que la filière de traitement de la turbidité représentait 20% du montant (restent 20% pour la filière de traitement des pesticides et nitrates, et 10% de frais divers). Pour la seconde, il a été estimé que la part relative était également de 70% puisque cette grande catégorie regroupe principalement des interconnexions et du suivi de la turbidité. Les entretiens avec les gestionnaires AEP ont permis de confirmer ces hypothèses. Enfin pour la catégorie "Etudes globales", le parti a été pris de ne pas définir de ratio car celui-ci serait sujet à une variabilité trop importante, compte tenu de l'hétérogénéité des actions financées et du manque d'informations sur la motivation réelle des actions.

Tableau 3 : Définition des ratios appliqués pour extraire la part du financement des actions relevant uniquement de la réduction de la turbidité aux captages AEP.

Grande catégorie	Part de l'investissement relatif à l'abattement de la turbidité
Animation	50%
Potabilisation	70%
Gestion quantitative de l'AEP	70%
Etudes globales	100%

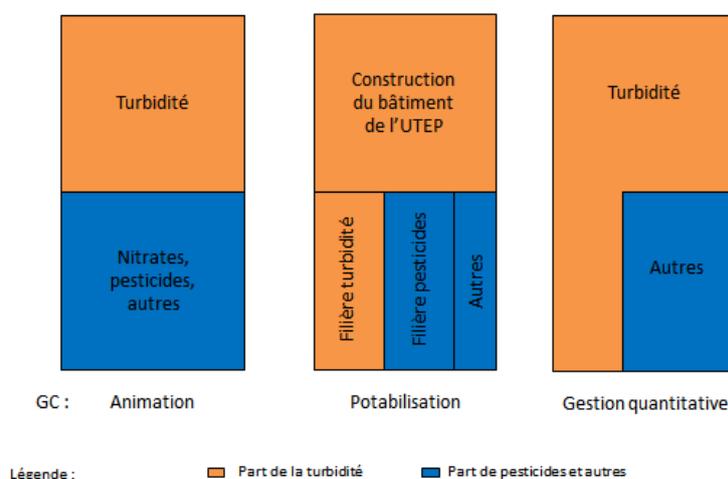


Figure 4 : Représentation schématique du mode de définition des ratios appliqués pour extraire la part du financement des actions relevant uniquement de la réduction de la turbidité aux captages AEP.

2.1.2 Analyse économique des actions de réduction de l'érosion et du ruissellement

2.1.2.1 Volume total d'investissement

Le montant d'investissement dans les actions visant à réduire le ruissellement et l'érosion en Haute-Normandie de 2000 à 2017 est compris **entre 196 et 305 millions d'euros** (Tableau 4).

Tableau 4 : Montants investis en Haute-Normandie entre 2000 et 2017 par catégorie d'action, estimation basse et estimation haute.

Grandes catégories	Catégorie	Estimation basse €	Estimation haute €
Études globales	Études globales	14 305 274	24 050 697
	Études pour ouvrage structurant	13 845 219	20 694 768
Ouvrages structurants	Travaux et réhabilitations ouvrages structurants	88 849 463	163 963 477
	Entretien ouvrages structurants	3 327 049	3 851 932
Aménagements d'hydraulique douce	Études pour aménagements hydraulique douce	3 796 670	4 577 442
	Travaux et réhabilitations aménagement hydraulique douce	21 691 344	23 416 419
	Entretiens hydraulique douce	265 570	275 880
Aménagements hydrauliques non précisés	Études préalables et maitrises d'œuvres pour aménagements hydrauliques non précisés	2 376 621	3 089 548
	Travaux de création d'ouvrage structurant et d'aménagement hydraulique douce	5 911 702	6 600 749
Aménagement des points d'engouffrement/bétoires	Études aménagements des points d'engouffrement/bétoires	537 478	602 679
	Travaux et réhabilitations des points d'engouffrement/bétoires	2 096 658	2 103 961
Réduction de la vulnérabilité aux inondations	Études pour réduction de la vulnérabilité	1 586 792	1 586 792
	Travaux et réhabilitations réduction vulnérabilité	5 457 064	5 457 064
	Entretiens réduction vulnérabilité	-	-
Animation	Animation	31 490 542	44 337 694
TOTAL		195 537 445	304 609 102

Les écarts les plus importants entre estimation haute et estimation basse se trouvent sur les lignes présentant les plus gros montants : les lignes « travaux et réhabilitation d'ouvrages structurants », « animation », et « étude globale » expliquent 90 % de l'écart entre estimations haute et basse (Figure 5 et Figure 6).

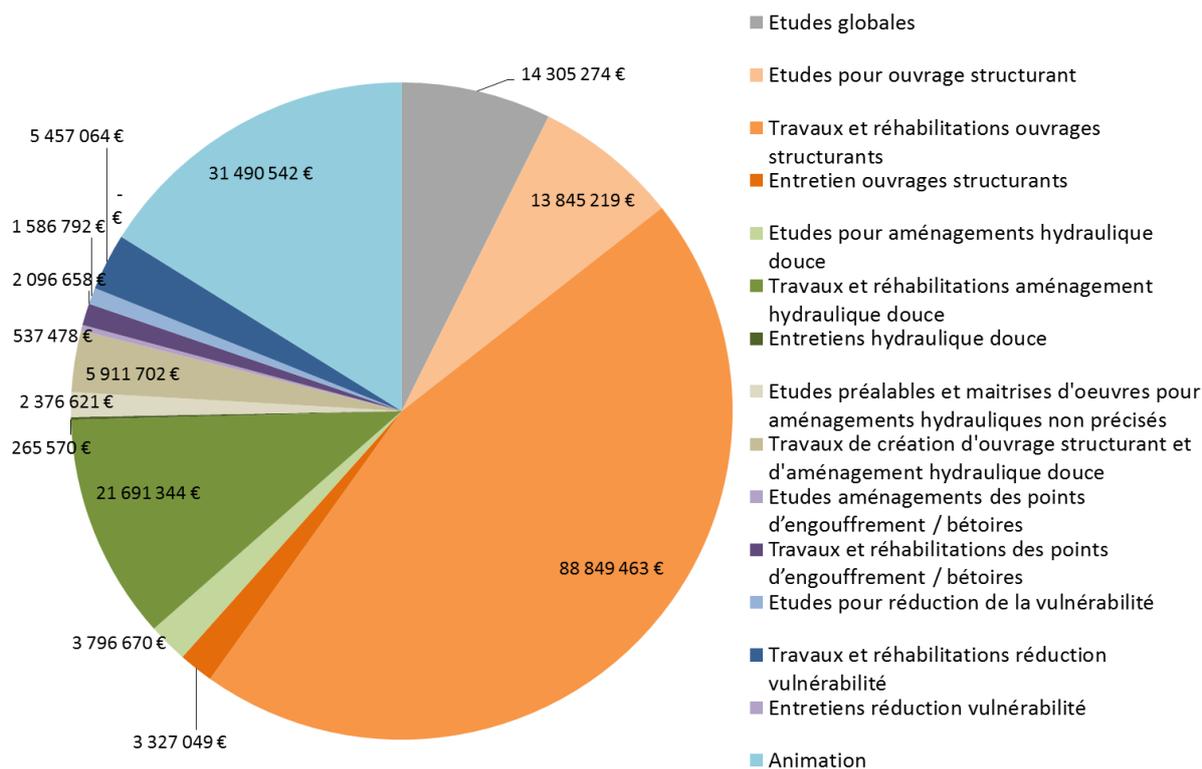


Figure 5 : Estimation basse du montant investi en Haute-Normandie entre 2000 et 2017 par catégorie d'action, 196 M€ au total.

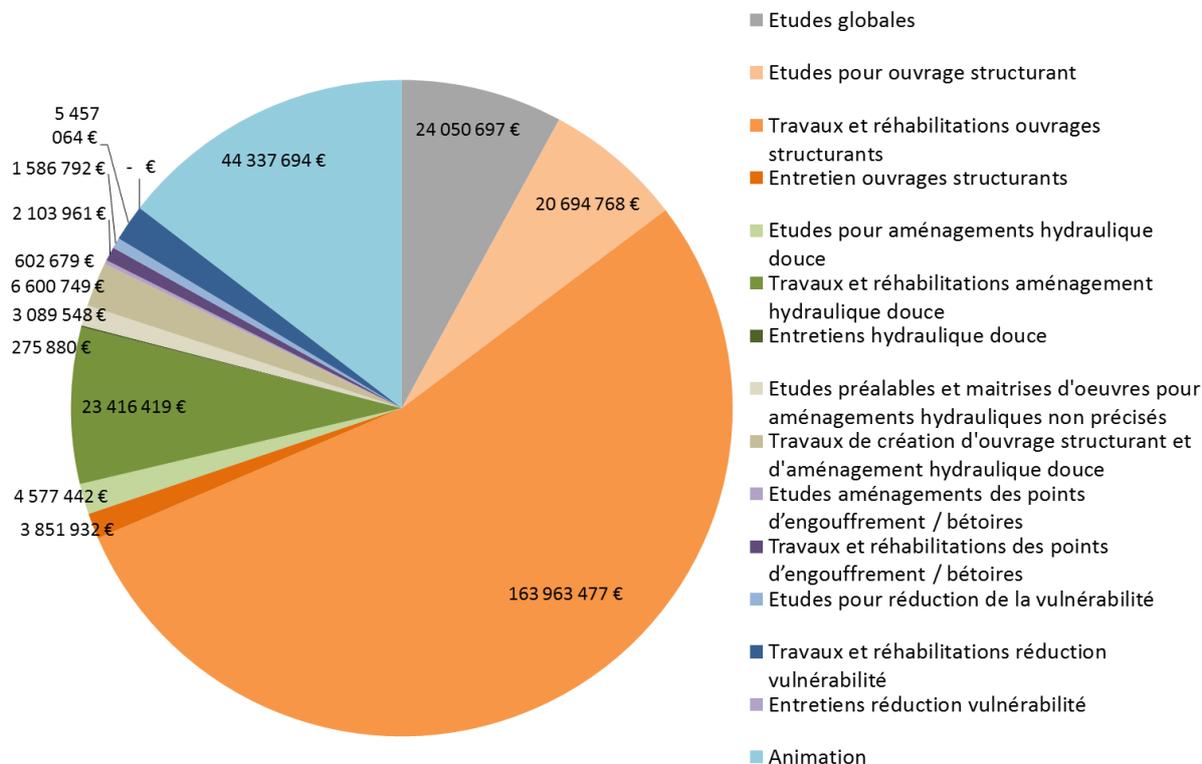


Figure 6 : Estimation haute du montant investi en Haute-Normandie entre 2000 et 2017 par catégorie d'action, 305 M€ au total.

2.1.2.2 Investissement global par catégorie d'action

Les actions liées aux ouvrages structurants représentent plus de la moitié des investissements totaux (entre 54 et 62 % selon les estimations). En y ajoutant la grande catégorie « liée aux aménagements hydrauliques non précisés », cette part passe à 58-65 %. L'ensemble des travaux et réhabilitations, quelle que soit la grande catégorie, correspond à 63-66 % du total des dépenses. L'ensemble des études : 18-19 % du total des dépenses. L'ensemble de l'entretien, quelle que soit la grande catégorie : 1 à 2 %. Animation : 15 à 16 %.

L'entretien est sous-représenté dans ce bilan, car les subventions sont généralement accordées aux investissements ou aux études. Seules quelques opérations lourdes d'entretien (curage et réhabilitation pour un montant moyen de 100 k€) ont pu être subventionnées. Les opérations d'entretien courante sont traitées dans la partie 2.2 de ce volume 1.

2.1.2.3 Dynamique temporelle par catégorie d'action

Étant donné les hypothèses pour estimer l'investissement global (fourchette par type d'action), il n'est pas aisé de ventiler l'investissement global par année. Pour représenter la répartition dans le temps, on regarde les subventions accordées (Figure 7). Le total des subventions accordées par les quatre financeurs dont nous avons les données est de 148 M€ pour des montants totaux de projet retenus compris entre 196 M€ et 305 M€.

L'année affectée par action est celle de l'accord de la subvention. La réalisation est parfois postérieure de plusieurs années.

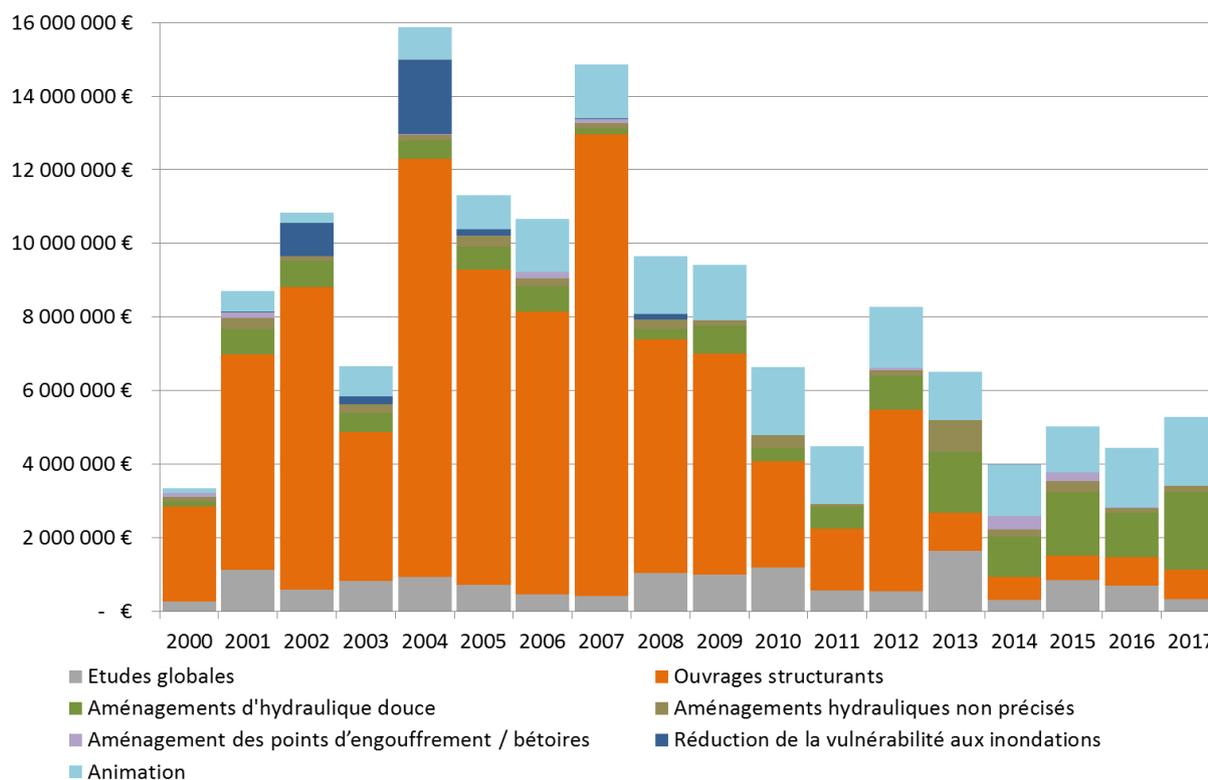


Figure 7 : Subventions accordées par catégorie et par an pour les actions « Ruissellement / Erosion » (AESN, CD76, CD27 et CRHN).

Les investissements dans les ouvrages structurants sont dominants jusqu'en 2012. À partir de 2012, les actions liées à l'hydraulique douce deviennent plus importantes, à la fois par rapport aux années antérieures et par rapport au reste des actions de chaque année.

Les besoins transversaux que sont les études globales et l'animation sont relativement stables sur la période, avec une progression du soutien à l'animation au cours des années.

2.1.2.4 Répartition par département

Dans l'Eure, l'investissement total est estimé à 28 M€ (Figure 8 et Figure 9).

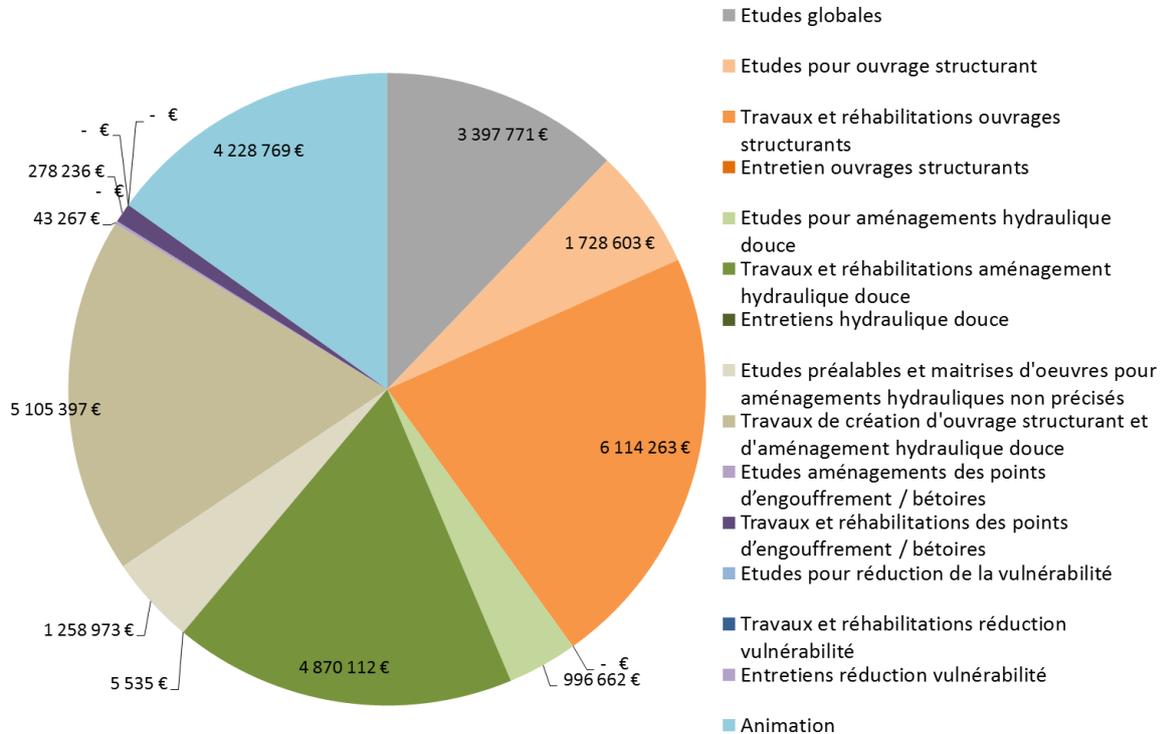


Figure 8 : Investissements dans l'Eure par catégorie entre 2000 et 2017 pour les actions « Ruissellement / Erosion » (total 28 027 586 €).

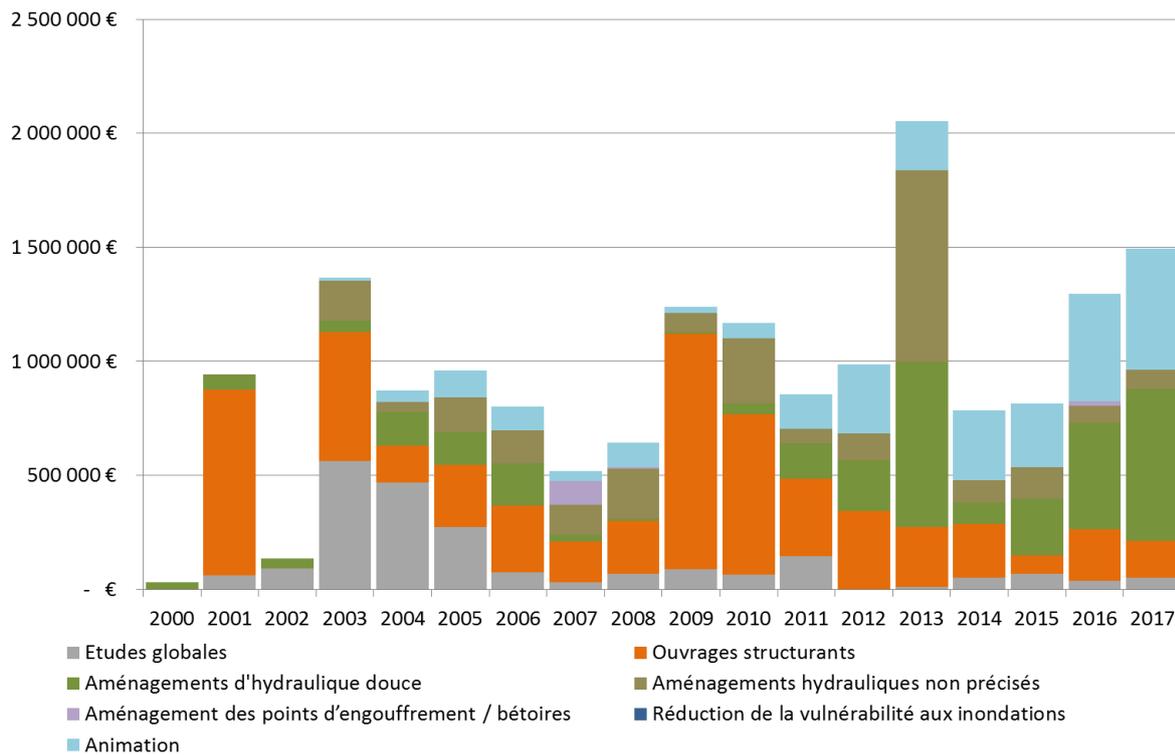


Figure 9 : Subventions accordées en Eure par catégorie et par an pour les actions « Ruissellement / Erosion » (AESN, CD76, CD27 et CRHN).

En Seine-Maritime, l'investissement est compris entre 167 et 227 M€ H.T (Figure 10 et Figure 11). Les investissements pour les ouvrages structurants représentent entre 59 et 65% du montant total pour ce département. Cela s'explique par la politique menée dans les années 2000 à la suite des inondations des années 1999, 2000 et 2003 notamment.

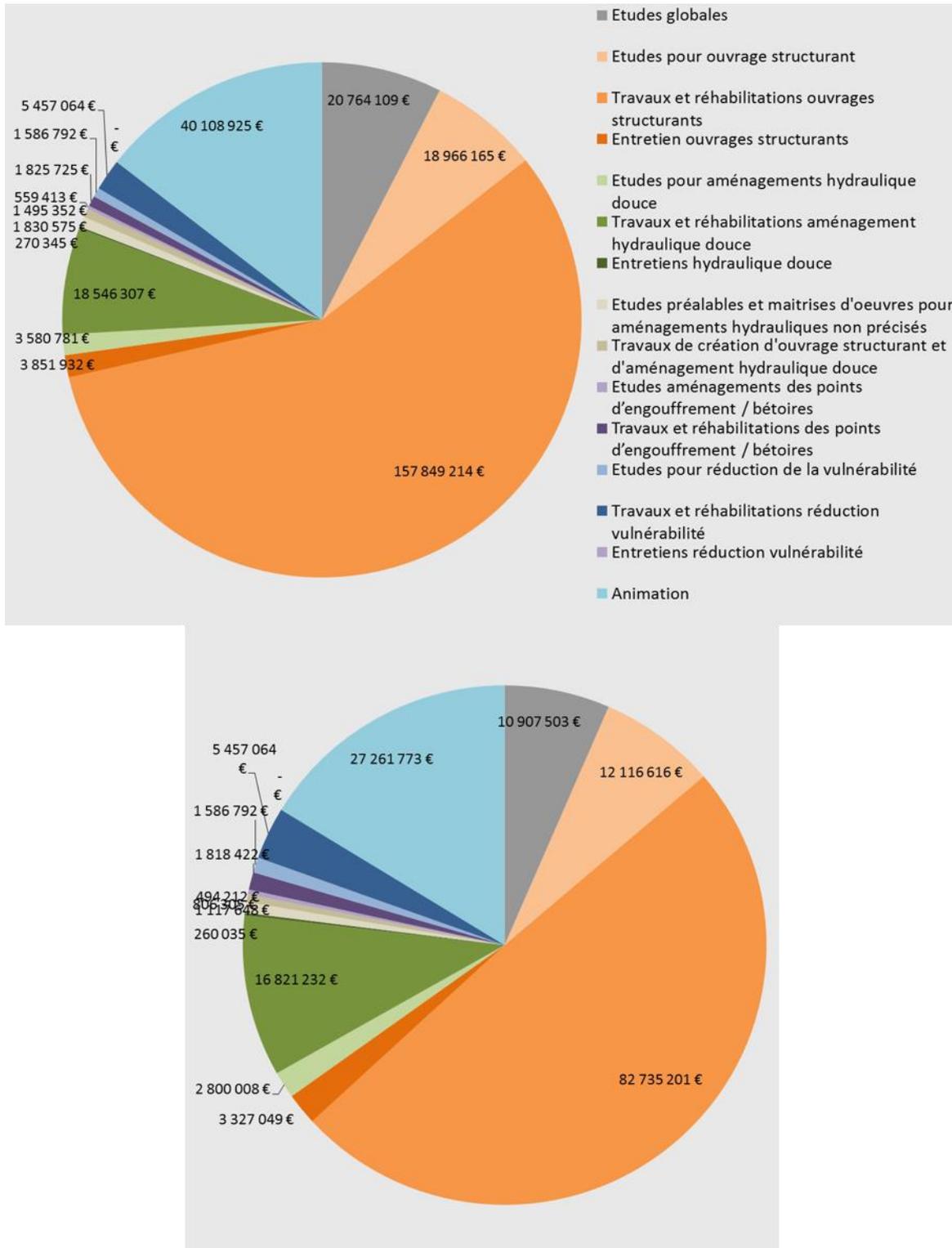


Figure 10 : Investissements en Seine-Maritime par catégorie entre 2000 et 2017 pour les actions « ruissellement/érosion ». En haut, l'estimation haute (total 227 M€ H.T.) ; en bas l'estimation basse (total 167 M€ H.T.).

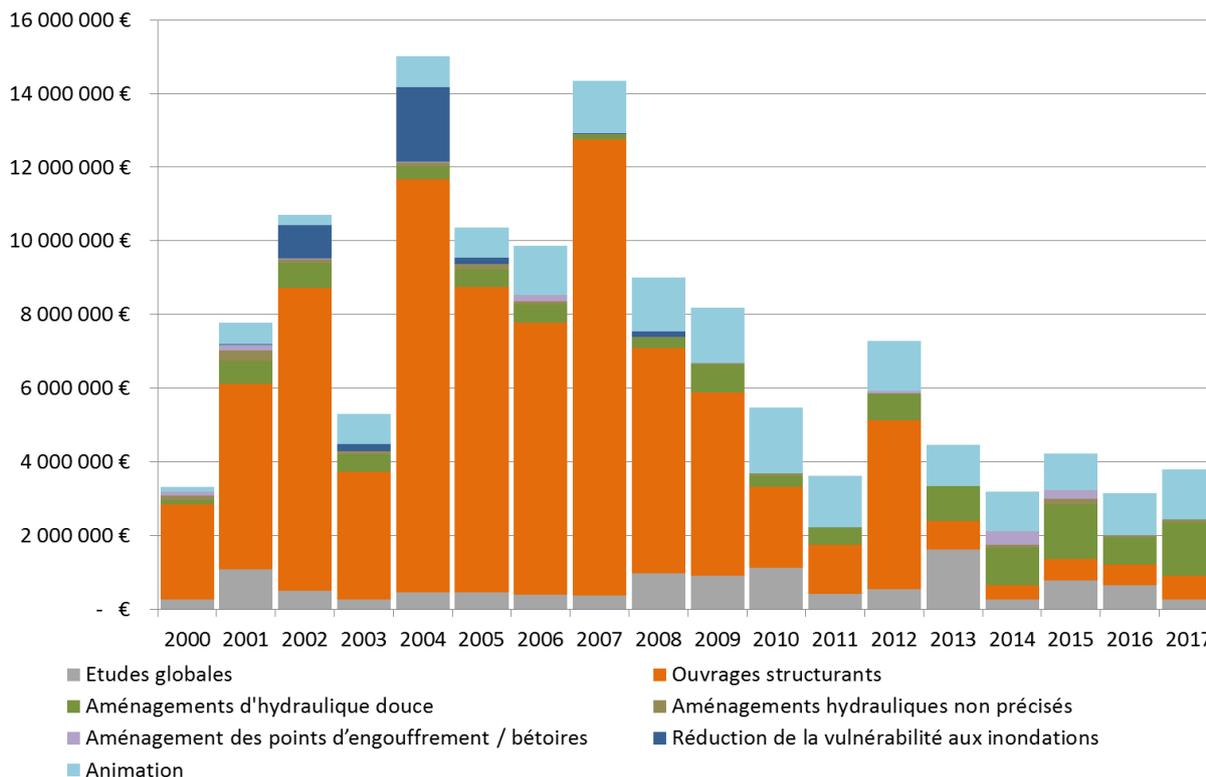


Figure 11 : Subventions accordées en Seine-Maritime par catégorie et par an pour les actions « Ruissellement / Erosion » (AESN, CD76, CD27 et CRHN).

2.1.2.4 Investissement par type de bénéficiaire

Différents opérateurs sur le terrain mettent en œuvre les actions relatives au ruissellement et à l'érosion :

- Syndicats intercommunaux de bassins versants, de rivières
- Syndicats AEP
- Départements
- Communautés d'agglomérations
- Communautés de communes
- Parc Naturel Régional
- Communes
- Associations, fédérations et conservatoires
- Établissements publics et institutions
- Autres

Les compétences exercées sont variables d'une collectivité à l'autre, et parfois variables dans le temps. Les noms des bénéficiaires ont été actualisés pour correspondre aux structures existantes en 2017. Dans l'Eure, les opérateurs des actions sont majoritairement des intercommunalités classiques ou des communes. Ces sont ces structures qui sont compétentes pour les travaux. Dans la Seine-Maritime, syndicats de bassins versants et communautés d'agglomération sont majoritaires (Figure 12).

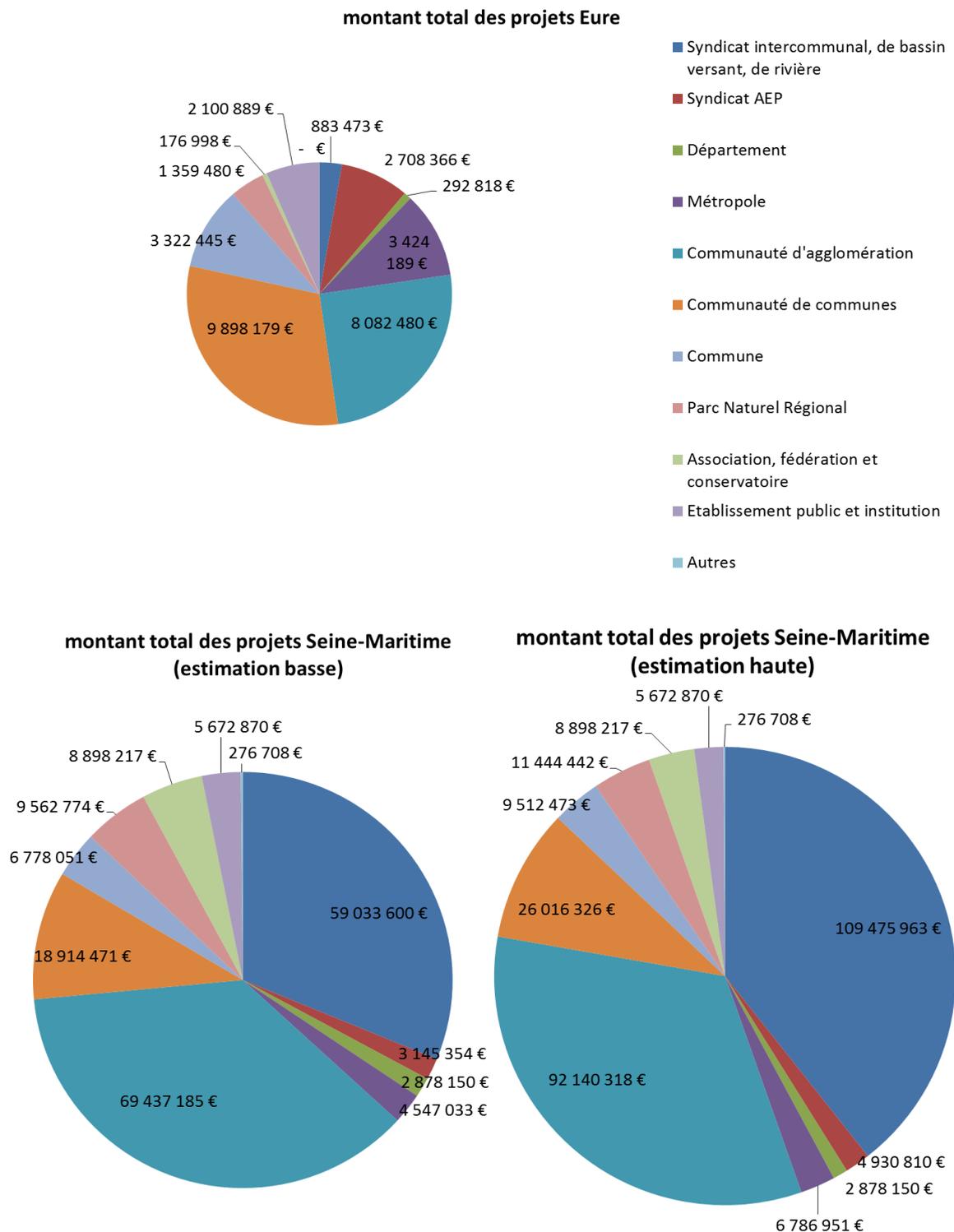


Figure 12 : Montant total des projets par département et par type de bénéficiaire pour les actions « Ruissellement / Erosion ».

2.1.2.5 Analyse des investissements liés aux aménagements d'hydraulique douce

Cette analyse est effectuée à partir des actions classées dans la grande catégorie « action liée aux aménagements d'hydraulique douce », mais bien qu'une partie des aménagements d'hydraulique douce ont été réalisés sous la grande catégorie « action liée aux aménagements hydrauliques non précisés » et « action liée aux ouvrages structurants ». Une part importante est réalisée dans le cadre d'aménagements groupés et diversifiés (type « travaux de création d'aménagements hydraulique

douce divers ») : l'hydraulique douce est bien prise comme un moyen d'aménagement du territoire, nécessitant un plan cohérent composé d'un ensemble d'aménagements individuels. L'action « réhabilitation de mare » représente une part importante aussi. Certaines opérations portant sur des montants supérieurs à 100 k€ ont été requalifiées en « ouvrage structurant ». Ces actions sont menées à part égale dans l'Eure et dans la Seine-Maritime, toujours avec le soutien de l'AESN.

Les subventions à l'implantation des cultures intermédiaires ont été intégrées dans les aménagements d'hydraulique douce, bien qu'en toute rigueur, il s'agit d'actions sur les pratiques agricoles. Elles représentent entre 12 et 13 % des dépenses liées à l'hydraulique douce, selon les estimations, pour 3,42 M€ (Figure 13). Ces financements se sont terminés en 2006.

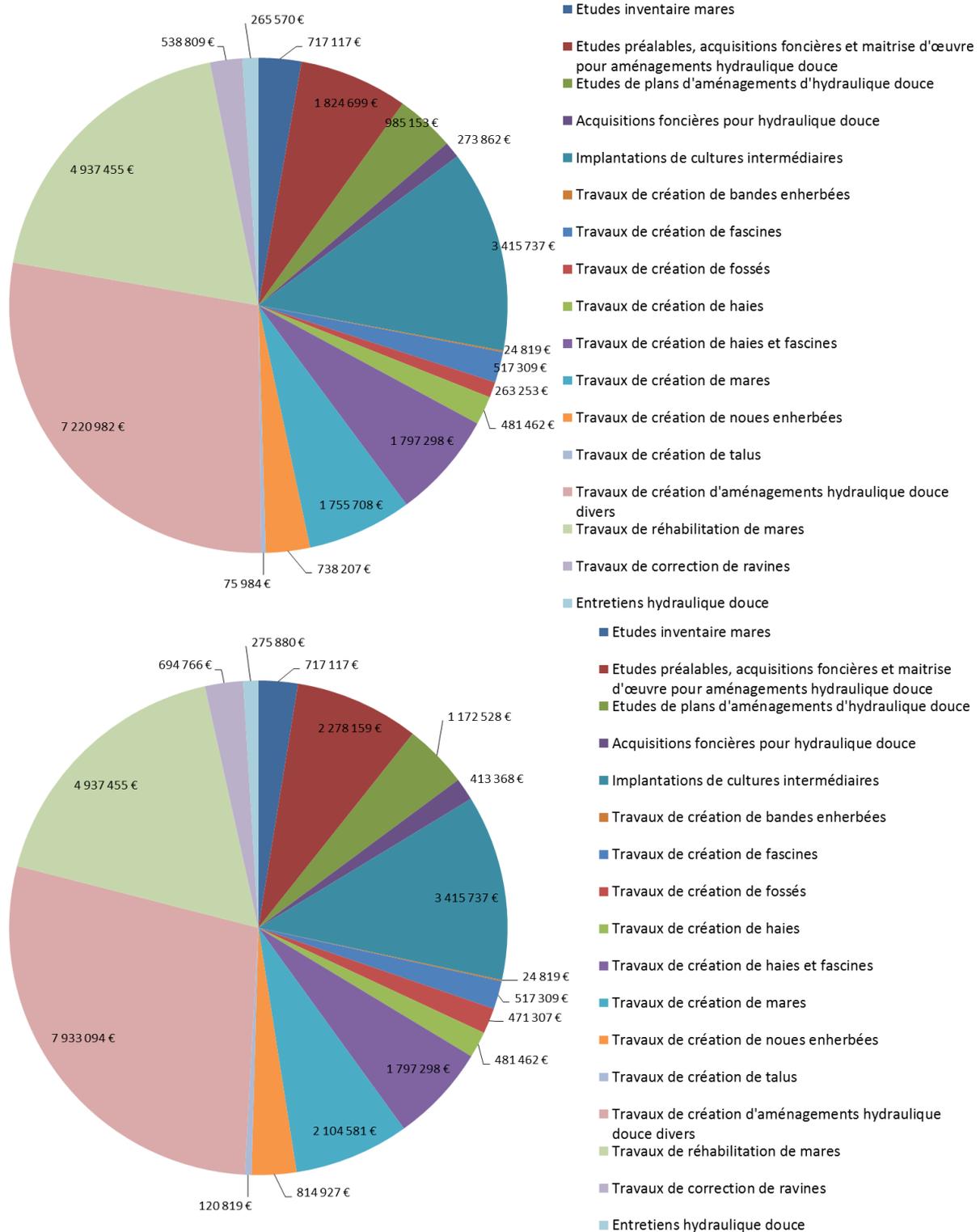


Figure 13 : Actions liées aux aménagements d'hydraulique douce en Haute-Normandie, par type, estimation basse (haut ; 26 M€ H.T) et estimation haute (bas ; 28M€ H.T).

2.1.3 Analyse économique des actions de réduction de la turbidité aux captages AEP

2.1.3.1 Volume total d'investissement

Sur les territoires de la Seine-Maritime et de l'Eure, **2321 actions** visant à abattre la turbidité de l'eau potable ont été financées et représentent un **volume d'investissement total de 180,2 M€ H.T** entre 2000 et 2017 (Figure 14). **403 actions directes** pour l'AEP (i.e. Potabilisation et Gestion quantitative de l'AEP) ont été subventionnées et représentent **48% de l'investissement global (86,4 M€ H.T)**. **1918 actions indirectes** ont été subventionnées et représentent **52% de l'investissement global (93,8 M€ H.T)**. Pour les actions indirectes, l'investissement est majoritairement réparti dans les grandes catégories suivantes : animation (16,3%), études globales (13,2%), aménagements hydrauliques (14,8%), et aménagement des points d'infiltration rapide (6,4%).

A l'échelle des départements, **l'investissement en Seine-Maritime (115 M€ H.T) est plus important que dans l'Eure (64 M€ H.T)** pour les actions visant à réduire la turbidité pour l'AEP. Les financements pour les actions directes sont globalement du même ordre de grandeur, 40,5 et 45 M€ H.T pour respectivement l'Eure et la Seine-Maritime. Le financement des actions indirectes est plus important pour la Seine-Maritime (69,8 contre 23,5 M€ H.T), du fait que le territoire est exposé à un aléa érosif plus important avec de nombreuses bêttoires connectées qui favorisent un transfert rapide et des niveaux de turbidité plus importants aux captages AEP.

Les actions relatives à la grande catégorie Potabilisation (i.e. études, travaux et réhabilitation d'infrastructures de potabilisation) sont globalement les plus coûteuses avec un coût moyen de 452 k€ H.T par action. Le coût moyen des actions liées à la gestion quantitative de l'AEP (i.e. interconnexion, instrumentations, etc.) et aux ouvrages structurants s'élève à 131 et 146 k€ H.T respectivement. Enfin, le coût moyen des actions pour les cinq grandes catégories restantes se situe dans une fourchette entre 37 et 63 k€ H.T.

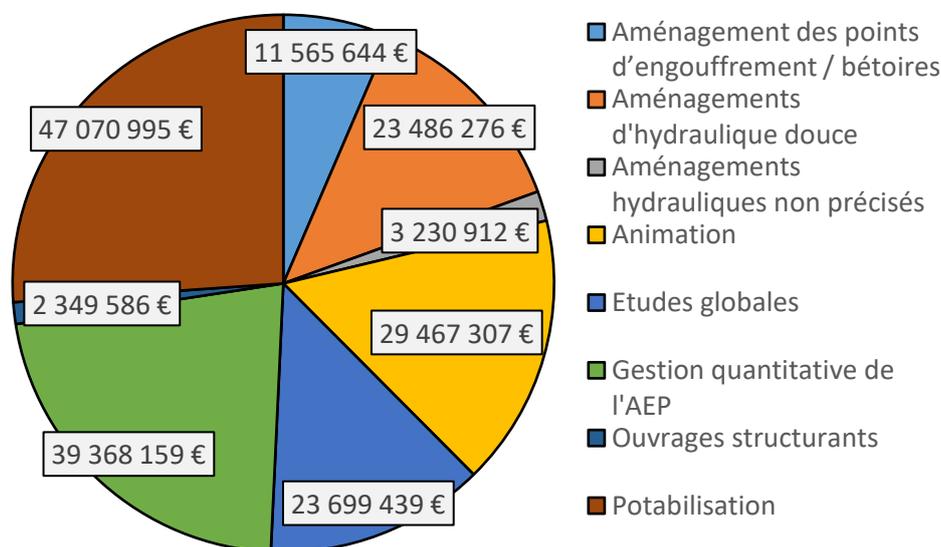


Figure 14 : Répartition par grandes catégories du volume total d'investissement (€ H.T) pour les actions visant à réduire la turbidité pour l'AEP sur les départements de Seine-Maritime et de l'Eure pour la période 2000-2017.

2.1.3.2 Variabilité temporelle des investissements

Comme évoqué ci-dessus, le volume total d'investissement pour les actions visant à réduire la turbidité aux captages AEP est de 180,2 M€ H.T entre 2000 et 2017 sur les deux territoires concernés. Ce flux d'investissement n'est pas homogène dans le temps et est réparti temporellement selon les différents programmes d'actions de l'AESN. Les **programmes VII, VIII, IX, et X de l'AESN** correspondent

respectivement à un **volume d'investissement pour les actions visant à réduire la turbidité aux captages AEP de 19,6 ; 45,5 ; 60,3 ; et 54,7 M€ H.T** (Figure 15).

Globalement, on observe que l'investissement dans les grandes catégories "Potabilisation" et "Gestion quantitative de l'AEP" a été privilégié au cours des programmes VII, VIII, et IX ceci afin de répondre rapidement à un besoin d'amélioration de qualité de l'eau potable. Le financement des actions liées à la "Potabilisation" commence à décroître en 2009 puisque les travaux de création ou de réhabilitation de station de traitement les plus importants ont été financés. Le financement des actions liées à la "Gestion quantitative de l'AEP" persiste lui au cours du programme IX et X, puisque des arrêts de distribution d'eau potable existent encore sur le territoire, et nécessitent des travaux d'interconnexions et/ou des travaux de suivi sur la qualité de l'eau potable. Faible, au cours du programme VII, on peut voir que le flux lié à l'animation augmente au cours du programme VIII avec un pic atteint au cours du programme IX en 2010 (2,6 M€ H.T). Néanmoins, l'investissement lié à l'animation est globalement stable au cours des différents programmes avec une moyenne de 1,8 M€ H.T entre 2003 et 2017. Les deux grandes catégories "Etudes globales" et "Aménagements d'hydraulique douce" voient quant à elles leur part relative d'investissement augmenter au cours des programmes IX et X. En effet, la moyenne des investissements liée aux "Aménagements d'hydraulique douce" passe de 843 k€ H.T (programme VII et VIII) à 1,6 M€ H.T (programme IX et X). Pour les investissements liés aux "Études globales", l'augmentation est du même ordre de grandeur : la moyenne des investissements est de 1 M€ H.T au cours des programmes VII et VIII, alors que la moyenne s'élève à 1,5 M€ H.T au cours des programmes IX et X. Les flux d'investissements liés aux trois dernières grandes catégories (i.e. "Aménagements des points d'engouffrement/bétoires", "Ouvrages structurants", et "Aménagements d'hydraulique non précisés") ne montrent pas de variabilité temporelle significative.

Dans le cadre des deux dernières années du **programme VII** de l'AESN (1997-2002 ; ici la base de données ne permet pas d'avoir accès à l'entièreté des investissements réalisés sur cette période), **243 actions ont été subventionnées pour un volume d'investissement de 19,6 M€ H.T**. La majorité des investissements sur cette période a été injectée dans des actions directes liées à la création, au traitement, et à la sécurisation d'installations AEP (69,5%). Sur cette période, l'investissement lié à l'animation est relativement faible (1,6 M€ H.T; 8%) puisque les structures en charge de ces problématiques viennent ou vont seulement être créées.

Pour le **programme VIII**, **648 actions ont été financées pour un total de 45,5 M€ H.T**. Là encore, une part importante des investissements est liée aux actions directes (i.e. "Potabilisation" et Gestion quantitative de l'AEP") à hauteur de 48% (21,9 M€ H.T). On note une augmentation significative de la part liée à l'animation (8,1 M€ H.T; 18%) et aux études globales (5,4 M€ H.T; 12%). Les aménagements (i.e. de bétoires, hydraulique douce, structurants) représentent presque un quart de l'investissement total sur ce programme (10 M€ H.T; 22%).

La dynamique de financement est sensiblement équivalente dans le cadre du **programme IX**, **627 actions ont été subventionnées pour un investissement total de 60,3 M€ H.T**. Les actions directes représentent 55,2% (33,3 M€ H.T) de l'investissement total dans le cadre de ce programme. La part relative à l'animation est en légère augmentation à hauteur de 19,6% (11,8 M€ H.T) alors que celle des études globales diminue (5,5 M€ H.T; 9,2%). La part relative est aux aménagements est là aussi en légère diminution (9,6 M€ H.T; 16%).

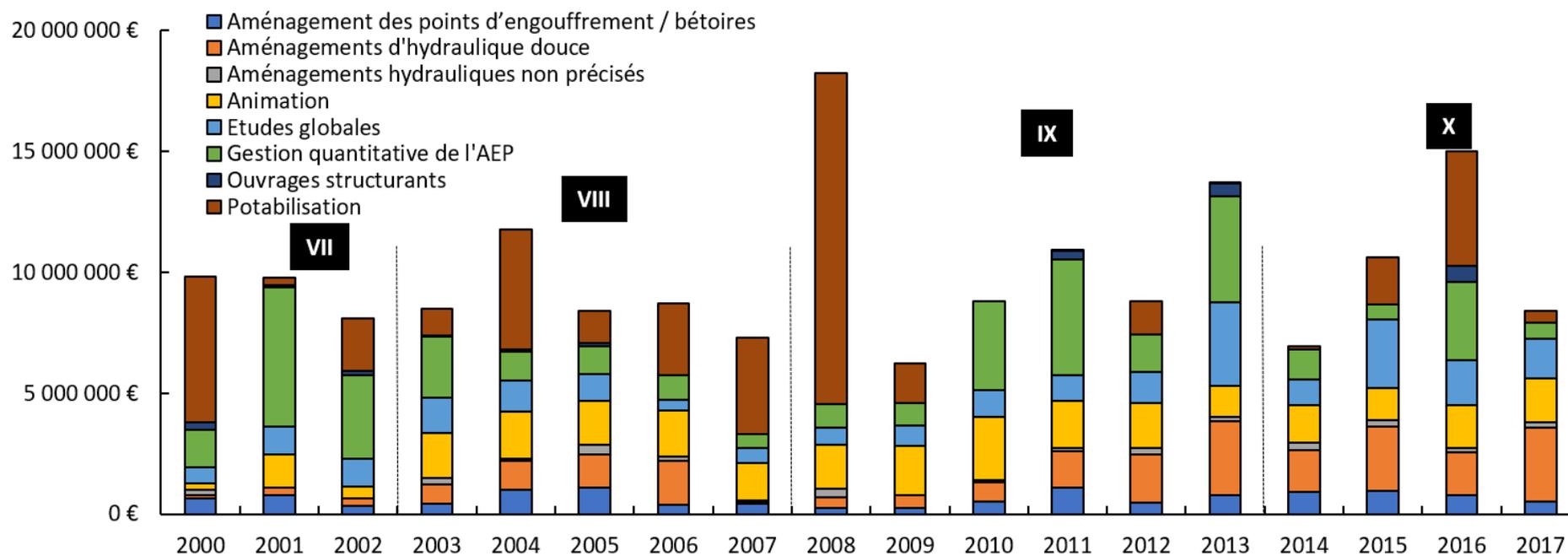


Figure 15 : Variabilité temporelle des investissements pour les actions visant à réduire la turbidité pour l'AEP par grandes catégories et par programme d'actions de l'AESN sur les départements de Seine-Maritime et de l'Eure pour la période 2000-2017.

Dans le cadre du **programme X, 803 actions ont été financées pour un investissement total de 54,7 M€ H.T.** Les financements liés aux actions directes pour la réduction de la turbidité aux captages AEP sont en nette diminution et représentent 32% (17,5 M€ H.T) du volume investi. La part relative à l'animation est également en légère diminution à hauteur de 14,4% (7,8 M€ H.T). On note une hausse significative de l'investissement lié aux études globales et aux aménagements, avec respectivement 10,8 M€ H.T (19,8%) et 18,5 M€ H.T (33,8%).

2.1.3.2 Répartition des investissements par type de bénéficiaires

Le volume d'investissement total pour le financement des actions visant à réduire la turbidité des captages AEP a été ventilé entre différents opérateurs sur le terrain. Ainsi sur la période 2000-2017, quatre opérateurs principaux ont reçus 76,2% de l'investissement total (Figure 16). Les **syndicats AEP** ont reçu l'enveloppe la plus importante à hauteur de **40,2 M€ H.T**, suivi par les **communautés d'agglomération (38,6 M€ H.T)**, les **syndicats intercommunaux (31,2 M€ H.T)**, et les **communautés de communes (27,3 M€ H.T)**. Les six autres opérateurs de terrain ont tous reçu moins de 10 M€ H.T de financements chacun, et l'enveloppe allouée à ces opérateurs représente 32,7 M€ H.T (23,8%).

Nous observons que la majorité des financements relevant de la grande catégorie "Potabilisation" ont été subventionnés auprès des EPCI (communes, communautés de communes, de communes) alors que la « Gestion quantitative de l'AEP est principalement supportée par les Syndicats AEP. L'« Aménagement des points d'engouffrement » est globalement réparti entre les EPCI et les syndicats AEP. L'« Animation » est majoritairement portée par les syndicats intercommunaux et de bassins versants même si l'ensemble des bénéficiaires a profité de subventions en lien avec cette catégorie.

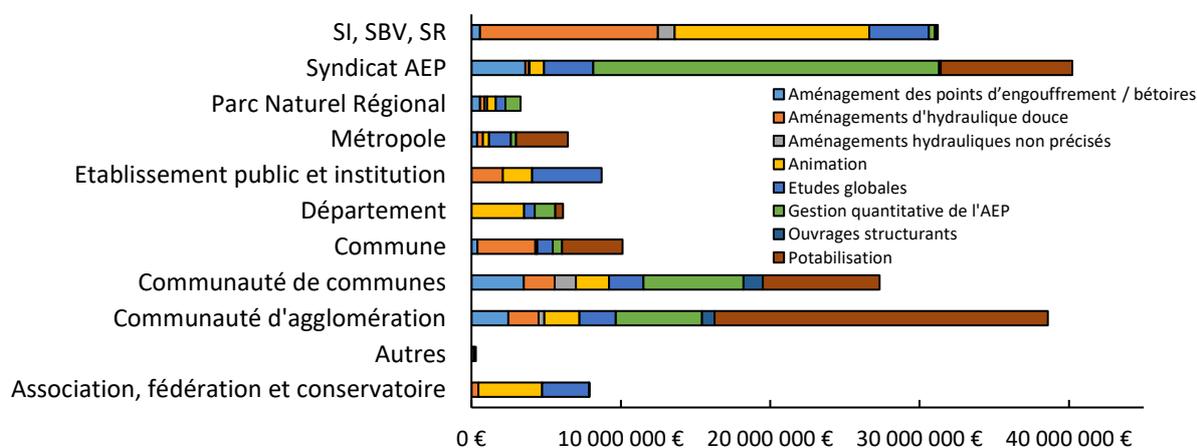


Figure 16 : Répartition du volume total investi (€ H.T) par type de bénéficiaires pour les actions visant à réduire la turbidité pour l'AEP sur les départements de la Seine-Maritime et de l'Eure pour la période 2000-2017.

2.1.3.4 Répartition des investissements par grandes catégories

L'investissement total de 180,2 M€ H.T entre 2000 et 2017 pour les actions visant à réduire la turbidité aux captages AEP a été réparti selon **8 grandes catégories**. Cette partie propose donc d'avoir une vision détaillée de la répartition des investissements par actions au sein de ces grandes catégories (hors "Aménagements hydrauliques non précisés").

- Aménagement des points d'engouffrement/bétaires

Le volume d'investissement total pour la grande catégorie "**Aménagement des points d'engouffrement/bétoires**" entre 2000 et 2017 est de **11,5 M€ H.T** (Figure 17). La majeure partie de cet investissement a été injecté dans des actions de **travaux de créations d'ouvrages de protection (5 M€ H.T; 44%)**. Une part importante de ces investissements (3,3 M€ H.T; 28,5%) a été utilisée pour l'acquisition foncière, soit pour l'aménagement des points d'engouffrement/bétoires, soit pour la protection sur le périmètre rapproché. Une portion significative de l'investissement a été dédiée aux études hydrogéologiques et traçages (1,9 M€ H.T; 16,3%) afin de privilégier une intervention sur les bétoires qui ont une connexion directe avec les captages concernés. Enfin, une faible part de l'investissement a été utilisée pour les études préalables aux aménagements de bétoires et aux indemnités pour changements de pratiques agricoles avec respectivement 0,8 et 0,4 M€ H.T (7,5% ; 3,7%).

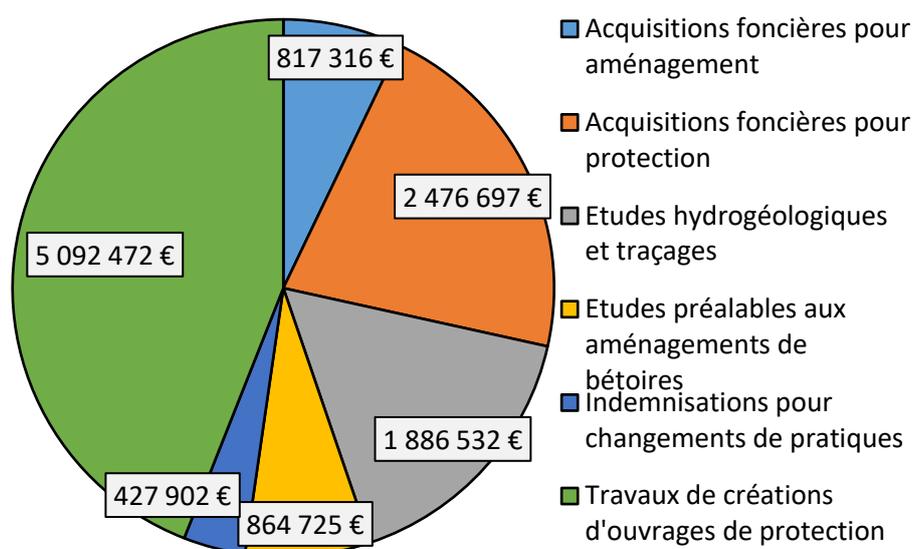


Figure 17 : Répartition par actions du volume investi (€ H.T) pour la grande catégorie « Aménagements des points d'engouffrement/bétoires » sur les départements de Seine-Maritime et de l'Eure pour la période 2000-2017

➤ Ouvrages structurants

Le volume d'investissement total pour la grande catégorie "**Ouvrages structurants**" entre 2000 et 2017 est de **2,3 M€ H.T** (Figure 18). Logiquement, ce volume d'investissement est faible puisque la vocation première de ces ouvrages est la réduction des ruissellements et l'écrtage des crues. On note néanmoins que ce type d'ouvrage est parfois privilégié ponctuellement pour réduire la turbidité aux captages AEP sur des sites spécifiques. La majeure partie de cette enveloppe totale est liée aux **travaux de création/réhabilitation des ouvrages structurants** de type barrage/bassin de retenue (**2,2 M€ H.T; 95%**). En effet, ces actions induisent des opérations de génie civil qui sont généralement coûteuses. Le reste de l'investissement a été dédié à quelques actions d'acquisition foncières et d'études préalables pour un montant relativement faible de 112 k€ H.T (5%).

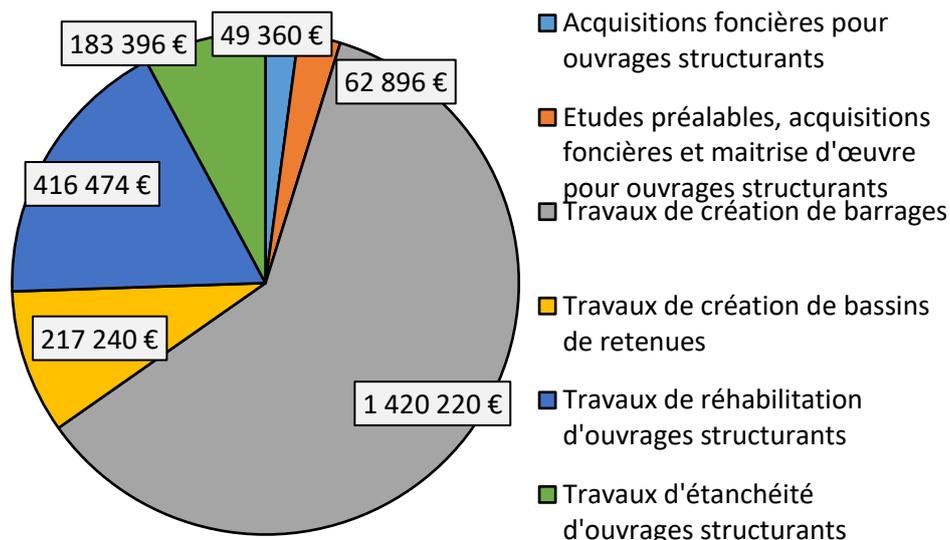


Figure 18 : Répartition par actions du volume investi (€ H.T) pour la grande catégorie « Ouvrages structurants » sur les départements de Seine-Maritime et de l'Eure pour la période 2000-2017.

➤ Aménagements d'hydraulique douce

Le volume d'investissement total pour la grande catégorie "**Aménagements d'hydraulique douce**" entre 2000 et 2017 est de **23,5 M€ H.T** (Figure 19). La majorité des investissements a été dédiée aux **travaux de création des aménagements d'hydraulique douce** (bandes enherbées, fascines, fossés, haies, mares, noues enherbées) à hauteur de **11,2 M€ H.T** (48%). Une part importante de l'investissement total a été dédiée aux **travaux de réhabilitation de mares et aux implantations de cultures intermédiaires**, avec des enveloppes respectives de **4,8 et 3,3 M€ H.T** (20,7 et 14,3%). Les études (plans d'aménagements, inventaire mares, études préalables) représentent 13,2% (3,1 M€ H.T) de l'investissement total. Enfin, une faible part du volume total investi a été dédiée à l'acquisition foncière et à l'entretien des aménagements (1% ~265 k€ H.T chacun).

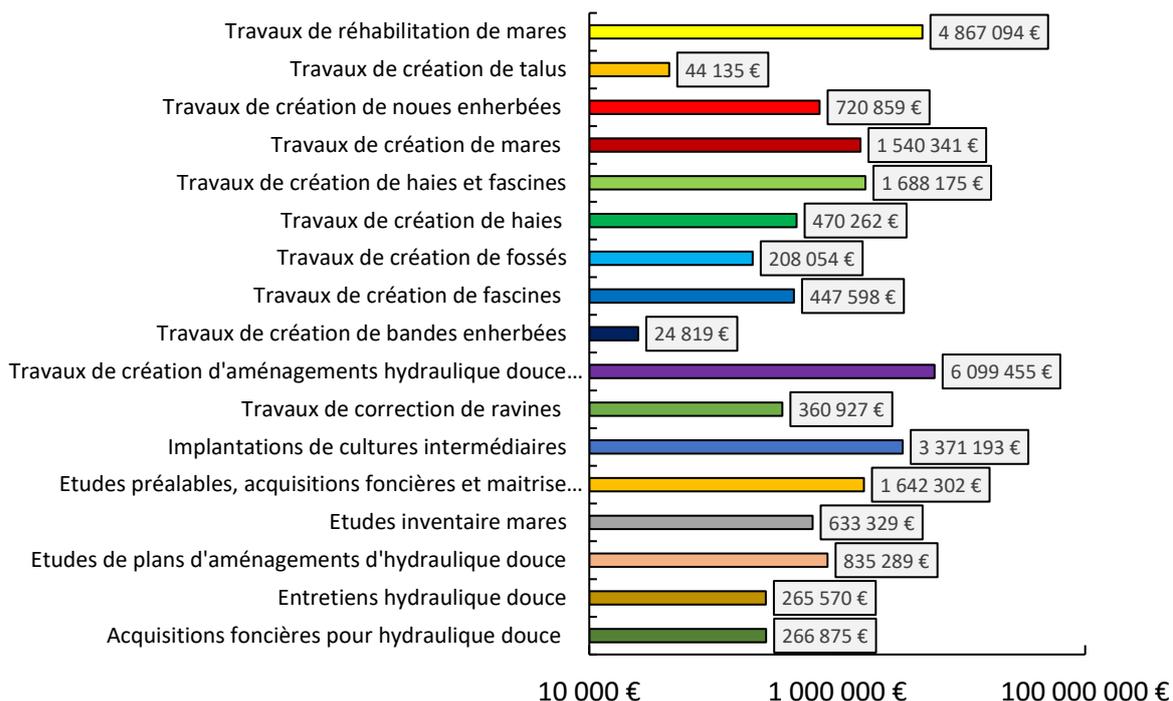


Figure 19 : Répartition par actions du volume investi (€ H.T) pour la grande catégorie « Aménagements d'hydraulique douce » sur les départements de Seine-Maritime et de l'Eure pour la période 2000-2017. Une échelle log a été appliquée sur l'axe des abscisses pour plus de lisibilité.

➤ Animation

Le volume d'investissement total pour la grande catégorie "**Animation**" entre 2000 et 2017 est de **29,4 M€ H.T** (Figure 20). Une très large partie des investissements a été dédiée à l'**animation de bassins versants** à hauteur de **16,5 M€ H.T** (56,1%), suivi par l'**animation ressources en eau et BAC** (**6,7 M€ H.T**; 22,9%), et l'**animation SAGE** (**3,6 M€ H.T**; 12,2%). Une part significative de l'investissement a été consacrée à l'**animation agricole** (**1,9 M€ H.T**; 6,6%). Enfin, un très faible volume d'investissement (2,2%) a été alloué à l'animation pour les aménagements d'hydraulique douce et/ou mares, et aux colloques (respectivement 308, 226 et 104 k€ H.T).

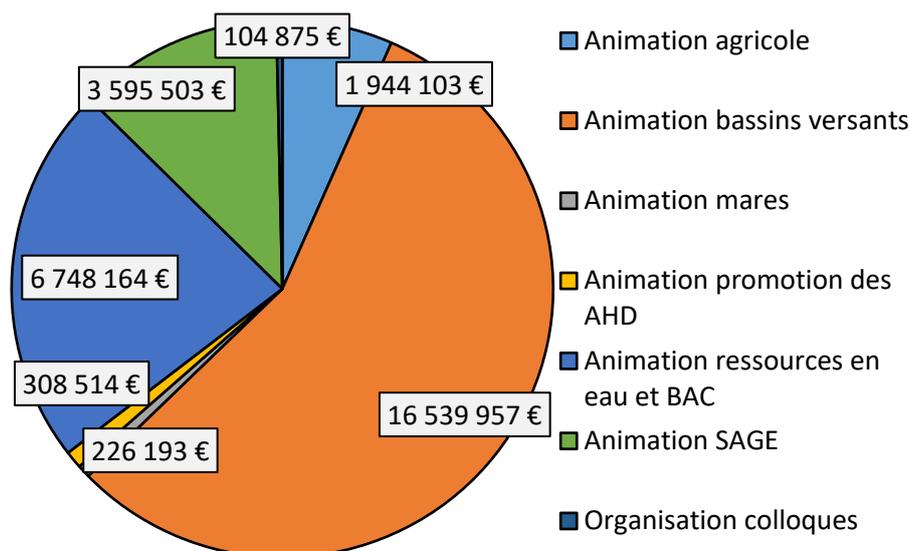


Figure 20 : Répartition par actions du volume investi (€ H.T) pour la grande catégorie « Animation » sur les départements de Seine-Maritime et de l'Eure pour la période 2000-2017.

➤ Etudes globales

Le volume d'investissement total pour la grande catégorie **“Etudes globales”** entre 2000 et 2017 est de **23,7 M€ H.T** (Figure 21). La **majorité des investissements** (91,9%) a été ventilée dans trois types d'action principaux : les **études de protection de captages AEP**, les **études hydrauliques de bassins versants**, et les **projets de recherches**. Les montants investis sont respectivement de **8,4 ; 6,6 ; et 6,7 M€ H.T**. Une part significative (5,2%) de l'investissement a été dédiée aux études d'orientation/stratégiques à hauteur de 1,2 M€ H.T. Les actions de type enquêtes publiques, dossiers loi sur l'eau, les schémas de gestion d'eau pluviale, études SAGE volet érosion, et les outils de prévention pour les inondations représentent logiquement une très faible part de l'investissement (2,8%; 655 k€ H.T). Étonnamment, les actions liées aux études d'impact représentent une infime part de l'investissement total (31 k€ H.T; 0,1%).

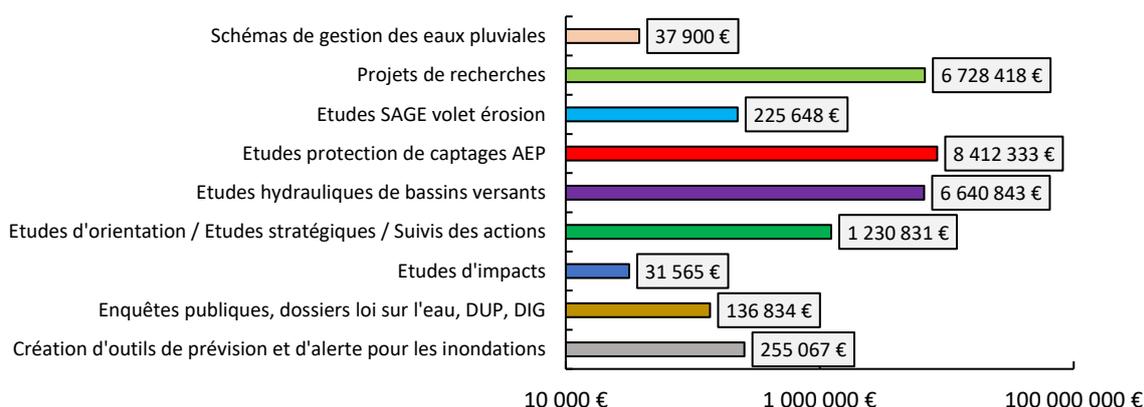


Figure 21 : Répartition par actions du volume investi (€ H.T) pour la grande catégorie « Etudes globales » sur les départements de Seine-Maritime et de l'Eure pour la période 2000-2017. Une échelle log a été appliquée sur l'axe des abscisses pour plus de lisibilité.

➤ Gestion quantitative de l'AEP

Le volume d'investissement total pour la grande catégorie "**Gestion quantitative de l'AEP**" entre 2000 et 2017 est de **39,4 M€ H.T** (Figure 22). Une très large part de l'investissement a été dédiée aux **travaux (32,9 M€ H.T)**, et plus particulièrement pour la **création d'interconnexions** afin d'assurer un service de distribution d'eau potable résilient face à la turbidité de l'eau potable (**27,5 M€ H.T**; 70%). Conjointement, d'importants **travaux d'instrumentations** pour assurer le suivi qualitatif et quantitatif ont été réalisés (**3,6 M€ H.T**; 9,2%). Une faible part de l'investissement a été dédiée à la création/réhabilitation de sources/forages/captages ce qui est cohérent avec la volonté de privilégier l'interconnexion (1,7 M€ H.T; 4,4%) malgré le fait qu'une part significative du volume d'investissement a été ventilée dans des études de diagnostic ou de recherche de nouveaux forages (6,4 M€ H.T; 16,4%).

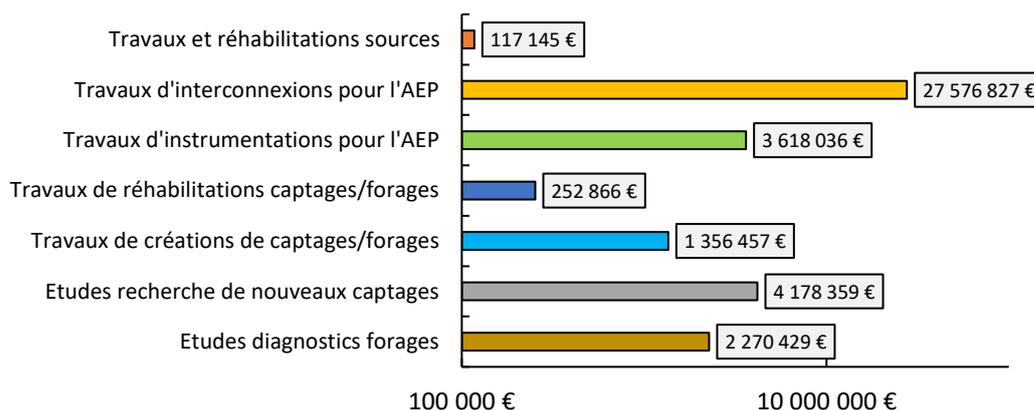


Figure 22 : Répartition par actions du volume investi (€ H.T) pour la grande catégorie « Gestion quantitative de l'AEP » sur les départements de Seine-Maritime et de l'Eure pour la période 2000-2017. Une échelle log a été appliquée sur l'axe des abscisses pour plus de lisibilité.

➤ Potabilisation

Le volume d'investissement total pour la grande catégorie "**Potabilisation**" entre 2000 et 2017 est de **47 M€ H.T** (Figure 23). Une faible part de cet investissement a été dédiée aux études préalables à la création d'unités de traitement et au suivi de la qualité des eaux (2,8 M€ H.T; 6%). Les **travaux de réhabilitation** de traitement pour l'AEP représentent 27,6% de l'investissement total (**12,9 M€ H.T**). Enfin, la majeure partie de l'investissement concerne les **travaux de création** des unités de traitement AEP, à hauteur de **31,2 M€ H.T** (66,4%).

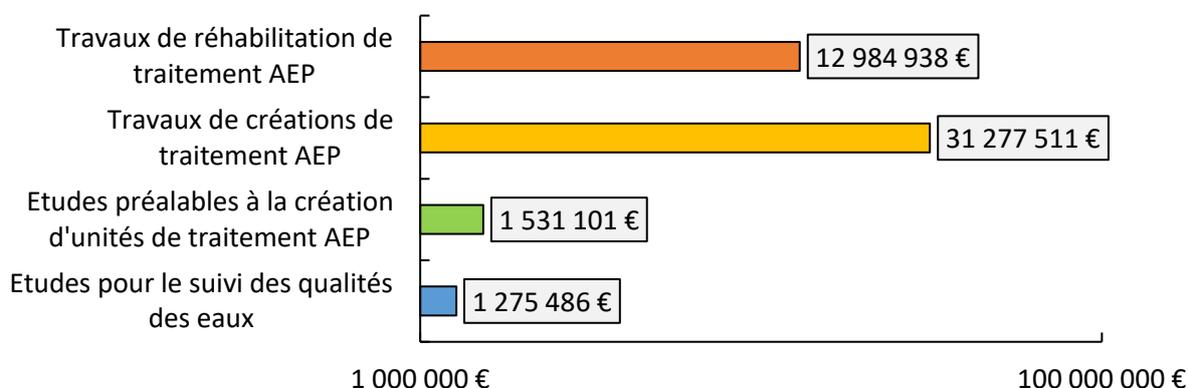


Figure 23 : Répartition par actions du volume investi (€ H.T) pour la grande catégorie « Potabilisation » sur les départements de Seine-Maritime et de l'Eure pour la période 2000-2017. Une échelle log a été appliquée sur l'axe des abscisses pour plus de visibilité.

2.1.3 Synthèse globale des investissements

Le volume d'investissement total pour les actions visant à réduire l'érosion, le ruissellement, et la turbidité aux captages AEP a pu être quantifié à travers l'analyse des bases de données disponibles issues de quatre financeurs (AESN, CD76/27, CRHN) sur les départements de la Seine-Maritime et de l'Eure entre 2000 et 2017. L'analyse suggère que **4 307 actions** ont été soutenues financièrement pour un volume total de montants de projet retenus entre **300 et 410 M€ H.T** (Figure 24 et Tableau 5).

Bilan des investissements publics pour réduire les impacts du ruissellement et de l'érosion en Haute-Normandie

Période 2000 - 2017

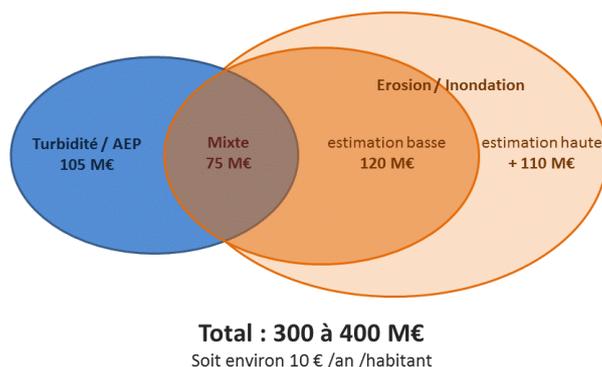


Figure 24 : Bilan des investissements publics pour réduire les impacts du ruissellement et de l'érosion en Haute-Normandie de 2000 à 2017.

Selon la fourchette haute, et en tant que financeur principal, **l'AESN a soutenu 2 699 actions** pour un volume total des montants de projet retenus de **276,7 M€ H.T**. Le CD76 a accompagné 1 236 actions pour un volume total des montants de projet retenus de **117,3 M€ H.T**. Enfin, le **CD27 et le CRHN** ont subventionnés respectivement **70 et 302 actions**, pour des volumes totaux de montants de projets retenus de **8,6 M€ et 7,4 M€ H.T**.

Les actions relevant de la grande catégorie **ouvrages structurants** représentent le volume total d'investissement le plus important, entre **106,3 et 188,8 M€ H.T**. Les actions en lien avec les **aménagements d'hydraulique douce** représentent une part de l'investissement beaucoup plus faible, comprise entre **25,3 et 27,8 M€ H.T**. Enfin, les actions pour lesquelles le type d'ouvrage concerné n'est pas précisé (généralement des projets mêlant ouvrages structurants et hydraulique douce, sans indication de la répartition) représentent un volume d'investissement compris entre 8,2 et 10 M€ H.T. Concernant les deux grandes catégories spécifiques à l'AEP (i.e. **Potabilisation et Gestion quantitative de l'AEP**), le volume d'investissement est respectivement de **47 et 39,3 M€ H.T**. La fourchette d'investissement pour les actions relevant des **études globales** et de **l'animation** se situe respectivement entre **25-35 et 29,5-42,3 M€ H.T**. Enfin, les actions qui consistent en **l'aménagement des points d'engouffrement** et de la **réduction de la vulnérabilité aux inondations** ont été sujettes à des investissements respectifs de **11,5-12,1 et 7,4 M€ H.T**.

Tableau 5 : Volume d'investissement total (€ H.T) par grandes catégories et par catégories pour les actions visant à réduire l'érosion, le ruissellement, et la turbidité aux captages AEP en Seine-Maritime et dans l'Eure.

Grande catégorie	Catégorie	Volume total d'investissement (€ H.T)	
		Fourchette basse	Fourchette haute
Etudes globales	<i>Etudes globales</i>	25 264 193	35 009 616
Animation	<i>Animation</i>	29 534 877	42 382 029
Réduction de la vulnérabilité aux inondations	<i>Etudes</i>	1 795 816	1 795 816
	<i>Travaux et réhabilitation</i>	5 559 564	5 559 564
Aménagements des points d'engouffrement et bétoires	<i>Etudes</i>	6 053 467	6 547 679
	<i>Travaux et réhabilitation</i>	5 520 374	5 527 677
Potabilisation	<i>Etudes</i>	2 806 587	2 806 587
	<i>Travaux et réhabilitation</i>	44 262 448	44 262 448
Gestion quantitative de l'AEP	<i>Etudes</i>	6 448 788	6 448 788
	<i>Travaux et réhabilitation</i>	32 921 331	32 921 331
Aménagements d'hydraulique douce	<i>Entretiens</i>	265 570	275 880
	<i>Etudes</i>	3 666 644	4 447 417
	<i>Travaux et réhabilitations</i>	21 383 175	23 108 250
Ouvrages structurants	<i>Entretiens</i>	3 006 151	3 531 034
	<i>Etudes</i>	13 735 084	20 584 633
	<i>Travaux et réhabilitations</i>	89 631 685	164 745 698
Aménagements hydrauliques non précisés	<i>Etudes</i>	2 156 717	3 274 365
	<i>Travaux et réhabilitations</i>	6 103 335	6 792 382
Total		300 115 806	410 021 194

2.2 Entretien des ouvrages

2.2.1 Recensement des ouvrages : BD CASTOR

Une grande partie des infrastructures de lutte contre l'érosion, le ruissellement, et la turbidité aux captages AEP est recensée dans la base de données CASTOR (Connaissance des Aménagements de préservation des Sols et des Terres, et des Ouvrages de ralentissement des Ruissellements¹) et offre une connaissance presque exhaustive des aménagements qui ont été créés sur les territoires des départements de Seine-Maritime et de l'Eure.

Pour les besoins de l'étude, nous avons extrait de cette base de données l'ensemble des aménagements présents sur les deux territoires d'études ($n = 4\ 809$). Afin d'évaluer le volume d'investissement total relatif à l'entretien de ces aménagements, un premier tri a été nécessaire. Nous avons été contraints d'extraire de l'analyse, les aménagements pour lesquels l'année de construction et les dimensions n'étaient pas renseignés. Nous avons également dû écarter les gabions et les boisements d'infiltration, pour lesquels les dimensions n'étaient pas renseignées ou bien les coûts annuels de maintenance ne pouvaient être déterminés. Ainsi, la base de données finale qui est utilisée pour calculer le coût économique de l'entretien des aménagements comprend 3 946 entrées. La répartition de ce pool d'aménagement par type est détaillée dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Liste d'aménagements (structurants et hydraulique douce) extraits de la BD CASTOR et localisés sur les départements de Seine-Maritime et de l'Eure.

Type d'aménagement	Nombre (n)	Dimensions
Barrage	592	4 800 344 m ³
Bassin	181	739 441 m ³
Champ d'épandage de crue	10	206,48 ha
Fascine	666	19 221,5 ml
Haie	1 033	211 234,2 ml
Mare	476	305 708 m ³
Mare/Bassin*	363	855 463 m ³
Noue/Fossé	371	100 029,43 ml
Talus	151	24 272 ml
Zone enherbée	103	77,48 ha

*Anciennes caractéristiques techniques utilisées par l'AREAS avant 2011. Les données recueillies n'ont pas permis de faire la distinction entre une mare et un bassin.

Pour chaque entrée de la base de données, le coût relatif à l'entretien a été calculé connaissant l'année de construction, les dimensions, et un coût de maintenance annuel établi à partir de : (i) le retour d'expérience des MOA, (ii) la littérature existante sur le sujet ; et (iii) la création d'un module de correction de l'inflation.

2.2.2 Synthèse des coûts d'entretien

2.2.2.1 Coût d'entretien des ouvrages structurants

Les ouvrages structurants (bassins, barrages), ont pour objectif la réduction de l'aléa inondation par ruissellement. Parmi l'ensemble des opérations d'entretien des ouvrages structurants, on distingue :

¹ <http://bdcastor.fr/>

- Ceux qui sont récurrents, réguliers et indépendants de la sollicitation des ouvrages par les ruissellements ;
- Ceux qui sont rendus nécessaires par l'activité de ces ouvrages, et qui sont nécessaires pour les remettre en état.

Afin d'évaluer les coûts de ces opérations, et leur variabilité, nous avons rencontré des gestionnaires d'ouvrages structurants sur 2 territoires en Seine-Maritime :

- L'ex-Communauté d'Agglomération du Havre (CODAH), aujourd'hui intégrée à la communauté urbaine Le Havre Seine Métropole (LHSM), a géré jusqu'en 2018 environ 150 ouvrages structurants, majoritairement dans le bassin versant de la Lézarde, pour un volume de rétention de près de 900 000 m³, avec une équipe de 5 personnes dédiée à l'exploitation des ouvrages,
- Le Syndicat Mixte des Bassins Versants de l'Austreberthe et du Saffimbec (SMBVAS), gère une quarantaine d'ouvrages structurants pour un volume de rétention total de l'ordre de 300 000 m³, avec 0,2 Equivalent Temps Plein (ETP).

2.2.2.1.1 Coûts récurrents d'entretien

Ces coûts sont indépendants de la fréquence des ruissellements et de l'érosion. Ils sont réguliers dans le temps, et prévisibles. Ils comprennent :

- L'entretien des espaces verts ;
- Les visites de routine ;
- L'entretien des clôtures ;
- L'entretien des organes de fuite et autres équipements ;
- Les visites réglementaires (visites techniques approfondies).

Coût d'entretien des espaces verts

L'entretien des espaces verts représente une part importante des entretiens récurrents.

Le SMBVAS a fait le choix de mettre en pâturage le plus d'espaces possibles, en signant une convention avec des éleveurs pour l'entretien de 80% des surfaces en herbe. Les surfaces restantes sont entretenues par des entreprises d'espaces verts :

- Tonte des zones sensibles des ouvrages hydrauliques (digues, périmètres rapprochés autour des ouvrages de fuite, etc.) ;
- Tonte des prairies inondables en amont des digues pour les ouvrages ne bénéficiant pas d'un pâturage ;
- Taille des haies et entretien des fascines présentes sur les terrains propriété du syndicat.

Le coût moyen d'entretien par une entreprise, rapporté à l'ouvrage pour un passage est de 152€ sur le BV de l'Austreberthe (2 passages par an depuis 2014).

Sur l'ex-CODAH, une part croissante de l'entretien est également assurée par pâturage. En 2017 : environ 45 ha sont entretenus par pâturage, et 68 ha entretenus par gyrobroyage. Avec deux passages par an, le gyrobroyage revient à environ 1200 €/ha/an, ou environ 520 €/an et par ouvrage. Une partie des ouvrages est entretenue par le service espace vert de la ville, pour ceux qui sont le plus en aval (ces coûts ne sont pas disponibles). L'entretien des espaces verts comprend également le bucheronnage (dont l'élimination des saules envahissants dans les ouvrages présentant un plan d'eau

permanent), l'entretien des accès, et les tontes pour quelques ouvrages particulièrement sensibles au bouchage par les déchets végétaux. Pour l'ensemble des espaces verts, le coût moyen est d'environ 1000 €/an par ouvrage.

Coût des visites de routine

Les visites de routine ont été effectuées à un rythme mensuel sur l'ex-CODAH. Ceci représente une part importante de l'activité de l'équipe, qui est composée d'un ingénieur, d'un technicien, et de trois agents de maîtrise, soit 5 ETP. Sur l'Austreberthe, le suivi des ouvrages au quotidien représente 0,2 ETP en 2017, avec trois visites par an par ouvrage.

Coût d'entretien des clôtures

Sur la CODAH, les clôtures de fil barbelé sur poteau bois sont remplacées environ tous les 10 ans, hors vandalisme ou accident de la route. Coût moyen d'environ 340 €/an par ouvrage, incluant tous types de clôtures, portails, et réparation de vandalisme.

Coût d'entretien courant des équipements

Sur la CODAH, les frais de génie civil pour entretien ordinaire et petites opérations pour optimiser la circulation de l'eau : moyenne de 650 €/an par ouvrage, dont 285 €/an et par ouvrage pour l'astreinte annuelle de l'entreprise qui intervient en cas d'urgence. L'entretien des organes de fuite est réalisé en régie pour l'essentiel (ces coûts ne sont pas disponibles).

Sur le SMBVAS, les coûts sont connus avec moins de détails. Pour la période 2008-2013, un coût moyen de 66 €/an et par ouvrage a été déterminé, hors espaces verts (frais directs uniquement, sur un parc d'ouvrages neufs). Ce syndicat constate que le parc commence à vieillir et que le coût d'entretien risque d'augmenter dans les années qui viennent.

Coût des visites techniques approfondies (VTA)

La CODAH a fait réaliser des VTA sur 10 ouvrages en 2013 pour un coût variant entre 8 500 et 12 500 €HT par ouvrage, des investigations complémentaires pour un ouvrage sur les dix inspectés (45 000€ HT) soit un coût total de 150 000€ HT pour les 10 ouvrages.

La réglementation a été modifiée par plusieurs Décrets ces dernières années. Actuellement, une Visite Technique Approfondie doit être réalisée tous les 5 ans pour les barrages de classe C, comprenant notamment les barrages de hauteur > 2m et de volume > 50 000m³ (articles R214-112 et R214-126 du Code de l'Environnement). D'après la BD Castor, cela concernerait au plus 5 barrages de protection contre les inondations par ruissellement en Haute-Normandie.

2.2.2.1.2 Coûts ponctuels de remise en état

Le suivi des ouvrages en temps de crise a été estimé à 0,08 ETP/an par le SMBVAS pour 47 ouvrages.

Les coûts ponctuels de remise en état incluent :

- Les curages,
- La réhabilitation à la suite de l'ouverture d'une bétoire,
- La réhabilitation à la suite d'un événement exceptionnel (conséquence d'une surverse sous-dimensionnée par exemple) ou à un dysfonctionnement (tel qu'un débit de fuite bouché).

Coûts de curage

Le coût du curage est très lié à la qualité de la boue, déterminée par analyse. Le coût unitaire d'évacuation des boues dépend de la destination des déchets :

- La boue est apportée en parcelle agricole : 1,51 €/m³ ;

- La boue est classée 3 et est mise en décharge : 22,86 €/m³ ;
- La boue est classée 2 et est mise en décharge spécialisée : 178,80 €/m³.

Sur la période 2011-2018, le coût moyen de curage et d'évacuation sur l'ex-CODAH est de 20 €/m³ curé. Pour un ouvrage, le curage et l'évacuation des boues classées 2 a coûté 236 €/m³. En moyenne par ouvrage, le coût moyen sur l'ex-CODAH s'élève à 510 €/ouvrage/an sur la période 2009-2018, et en excluant les boues classées 2.

Coûts de réhabilitation à la suite d'ouverture de bétoire

Le suivi de la CODAH entre 2009 et 2018 indique 18 bétoires ou suspicions de bétoires sur leur parc d'ouvrages, soit 0,013 apparition de bétoire par an et par ouvrage. Le coût moyen de réparation est d'environ 11 640 € par bétoire.

Lorsque les bétoires apparaissent sur le corps de digue, les coûts peuvent être supérieurs, comme le montre le Tableau 7.

Tableau 7 : travaux de réfection de corps de digues dus à l'apparition de bétoires, selon le CD76

Année	Nature projet	Montant subventionnable
2000	Traitement de bétoires sur le bassin de retenue "Le Cimetière" (M4)	22 771
2002	Etude pour le traitement d'une bétoire dans le bassin d'Anglesqueville-la-Bras-Long	22 608
2004	Traitement de bétoires dans le bassin d'Anglesqueville-la-Bras-Long (études)	20 750
2005	Anglesqueville-la-Bras-Long : traitement de bétoires en pied de digue	121 250
2005	Ouvrage n° 31 sur le bv de Canville : travaux complémentaires (traitement de bétoire)	34 328

Sur le bassin versant de l'Austreberthe, le SMBVAS constate en 2017 qu'environ 1/3 de ses ouvrages présente des bétoires dans la plaine inondable. Aucune réparation n'a encore été menée. L'orientation technique envisagée est le traitement de l'ensemble de la plaine inondable pour résoudre le problème de façon durable (plutôt que de mettre des rustines au coup par coup). D'après les premiers devis, le coût de traitement est comparable à celui de la création des ouvrages. Par exemple l'ouvrage MP03-4 a un devis de traitement à 200 k€, l'investissement initial a été de 161 k€. La communauté urbaine du Havre envisage aussi de traiter l'intégralité du fond de certains bassins, lorsqu'ils sont sensibles. Elle a un devis à 140 k€ pour un ouvrage.

Coûts de réparation à la suite d'un évènement

Sur la communauté urbaine du Havre, les interventions d'urgence sur les ouvrages nécessités par des dysfonctionnements en crue sont assurées par une entreprise dans le cadre d'un marché. Le coût de l'astreinte prévue par ce marché est de 60 000 €/an (montant inclus dans les coûts récurrents). Interventions d'urgence et remises en état à la suite de crues : environ 200 €/an par ouvrage.

2.2.2.1.3 Bilan des coûts d'entretien récurrents et ponctuels des ouvrages structurants

Les coûts d'entretien récurrents des ouvrages structurants ont été déterminés sur la base d'informations fournies par l'ex-CODAH et le SMBVAS (Tableau 8). On peut voir que selon les deux structures, les coûts d'entretien/ouvrages peuvent fortement varier. Ces coûts ont donc été utilisés pour déterminer une hypothèse basse et haute.

Tableau 8 : Coûts d'entretien du parc d'ouvrages structurants

	ex-CODAH	SMBVAS
Nb d'ouvrages en 2017	154	47
Temps passé au suivi ordinaire (5 ETP ² /154 ouvrages)	3750 €/an/ouvrage	40,3 €/an/ouvrage
Suivi en temps de crise (ETP)	NC	16,1 €/an/ouvrage
Espaces verts	1000 €/an/ouvrage	350 €/an/ouvrage
Entretien ordinaire	990 €/an/ouvrage	66 €/an/ouvrage
Remise en état à la suite d'inondations (dont traitement de bétoires, hors curage)	200 €/an/ouvrage	NC
Curage	940 €/an/ouvrage	NC
Total	6880 €/an/ouvrage	472,4 €/an/ouvrage

2.2.2.2 Coût d'entretien des aménagements d'hydraulique douce

Pour les ouvrages d'hydraulique douce, les coûts retenus sont issus d'une revue de la littérature existante sur le sujet (voir détails volume 3), et dont la synthèse est proposée dans le Tableau 9. Le choix de la valeur de référence s'est porté en priorité sur la fiabilité de la source. Lorsque différentes sources étaient disponibles et supposées fiables, une valeur moyenne a été définie. Une attention a également été portée aux unités d'expression des valeurs de référence, pour faciliter la correspondance avec les données de la BD CASTOR. N'ayant pas d'année de référence pour l'expression des valeurs proposées dans la littérature, et considérant que les opérateurs de terrain semblent percevoir une stabilité des prix depuis 2005, nous avons considéré en première approche que nos valeurs de référence pouvaient s'exprimer en €₂₀₁₈.

Ainsi, cette synthèse a permis de déterminer que les valeurs de référence pour les coûts d'entretien des fascines, des haies, des talus, et des noues/fossés étaient compris entre 1 et 6,5 €₂₀₁₈ H.T ml⁻¹. Les actions sont principalement liées à la taille et au fauchage, et plus particulièrement à la recharge des paquets pour les fascines. Le coût d'entretien annuel des mares est forfaitaire, quelle que soit la dimension de celle-ci, et fixé à 230 €₂₀₁₈ H.T pour des actions de fauchage. Les coûts de curage et de réhabilitation de mares, qui peuvent être élevés (de l'ordre de 10 k€/mare), ne sont pas intégrés ici. Ils ont été considérés comme des investissements, faisant généralement l'objet de subventions.

Enfin, le coût d'entretien annuel des bandes enherbées et des champs d'épandage de crue a été fixé respectivement à 889 et 460 €₂₀₁₈ H.T ha⁻¹. Les bandes enherbées sont un cas particulier dans le sens où les coûts d'entretien correspondent à des coûts d'indemnisation pour le maintien des surfaces en herbe, tenant compte des pertes de récolte.

² <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1371004>

Tableau 9 : Synthèse des coûts d'entretien retenus pour les aménagements d'hydraulique douce.

Type d'aménagement	Entretien	Coût annuel retenu (€ ₂₀₁₈ H.T)	Source
Bande enherbée	Indemnisation (perte annuelle + coûts entretien)	889€ ha ⁻¹	CA Seine-Maritime, 2019
Fascine	Taille, désherbage, rechargement des paquets	3€ ml ⁻¹	AREAS, 2011
Haie	Taille, désherbage	2€ ml ⁻¹	AREAS, 2011 ; LIOSE, 018
Mare	Fauchage	230€	Ramaekers, 2018
Talus	Fauchage	6,5€ ml ⁻¹	ZH29, 2012
Noüe/Fossé	Fauchage, curage	1€ ml ⁻¹	CA Hauts-de-France, 2018
Champ d'épandage de crue	Fauchage	460€ ha ⁻¹	CA Hauts-de-France, 2018

2.2.3 Calcul du coût d'entretien

2.2.3.1 Module de correction de l'inflation

Pour calculer le coût total lié à l'entretien d'un aménagement depuis son année de création, il est nécessaire de prendre en compte l'inflation et donc l'évolution temporelle des coûts. Pour cela, les coûts de maintenance annuels sont corrigés de l'inflation à partir de l'analyse de l'évolution des indices du coût de production des travaux publics (ICP-TP³) de 1998 à 2018 (Annexe 1.2). L'évolution de l'indice 2018 base 100 peut être déterminé et permet de mesurer la variation relative de la valeur entre l'année de base (2018) et les années passées (Figure 25). Entre 1998 et 2018, la variation annuelle moyenne est ainsi estimée à -2,10%. Cette variation annuelle moyenne a été appliquée aux années antérieures jusqu'en 1931 (date de création du plus ancien ouvrage recensé dans la BD CASTOR). Ce module permet ainsi d'exprimer le coût annuel d'entretien d'un aménagement en €₂₀₁₈ pour les années passées. L'agrégation de ces coûts dans le temps permet alors de quantifier le coût total lié à l'entretien d'un aménagement depuis sa création.

³ <https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010566988>

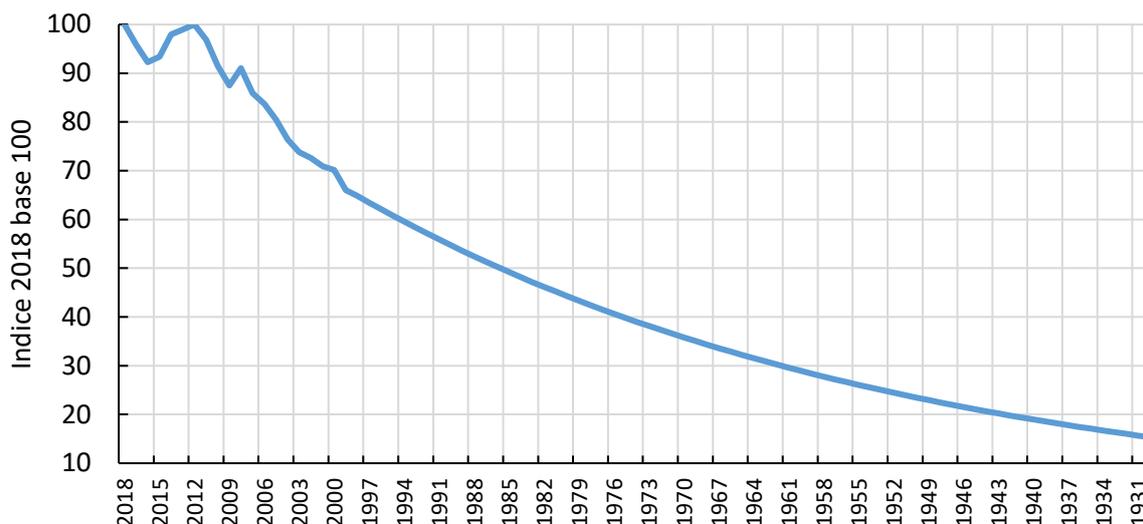


Figure 25 : Evolution de l'indice 2018 base 100 du coût de production des travaux publics (ICP-TP).

2.2.3.2 Application aux aménagements pour la Seine-Maritime et l'Eure

L'ensemble des aménagements (structurants et AHD) créés en Seine-Maritime et dans l'Eure, pour lutter contre l'érosion, le ruissellement, et la turbidité aux captages AEP, et dont l'année de création est connue, a induit un **coût total lié à l'entretien de 76,01 M€₂₀₁₈ H.T** selon **l'hypothèse haute de calcul sur l'entretien des ouvrages structurants** (Figure 26). Selon **l'hypothèse basse de calcul**, sur la base du coût forfaitaire déduit par les données SMBVAS, **le coût total lié à l'entretien s'élève à 13,9 M€₂₀₁₈ H.T**. Ce coût est principalement dû aux opérations d'entretien des ouvrages structurants (barrage et bassin). Ce type d'aménagement a été privilégié pendant des années dans un objectif de réduction de l'aléa inondation, il en résulte que l'on dénombre sur le territoire d'étude 773 aménagements de ce type (dont la date de réalisation est connue) pour une capacité totale de stockage de 5,5 M m³. Ces ouvrages peuvent nécessiter des opérations de génie civil coûteuses (curage) et des équipes de suivi dédiées. Elles représentent un coût de 66,6 M€₂₀₁₈ H.T, soit 87,7% du volume du coût total. Pour les aménagements d'hydraulique douce, les 211 km cumulés de haies anti-érosives représentent le coût d'entretien le plus important. L'entretien se résume principalement à des actions de taille et de désherbage, et il est estimé à 2,6 M€₂₀₁₈ H.T, soit 3,45% de l'investissement total. Les talus (24,2 km) et les champs d'épandage de crue (206 ha) ont un coût d'entretien relativement élevé, et le coût total lié à leur entretien s'élève respectivement à 1,79 et 1,27 M€₂₀₁₈ H.T. N'ayant pu faire la distinction mare/bassin pour 363 aménagements, nous avons appliqué le coût d'entretien annuel relatif aux mares afin de ne pas surestimer les montants. Il en résulte un coût total d'entretien de 1,15 M€₂₀₁₈ H.T pour cette catégorie d'aménagement. Les noues/fossés (100 km), zones enherbées (77 ha), et les mares (fauchage) sont à l'origine d'un coût total d'entretien estimé à 2,1 M€₂₀₁₈ H.T, soit 2,8% du coût total lié à l'entretien des aménagements. Enfin, le coût total d'entretien des fascines (19,2 km) est le moins élevé parmi l'ensemble des aménagements, à hauteur de 366,8 k€₂₀₁₈ H.T.

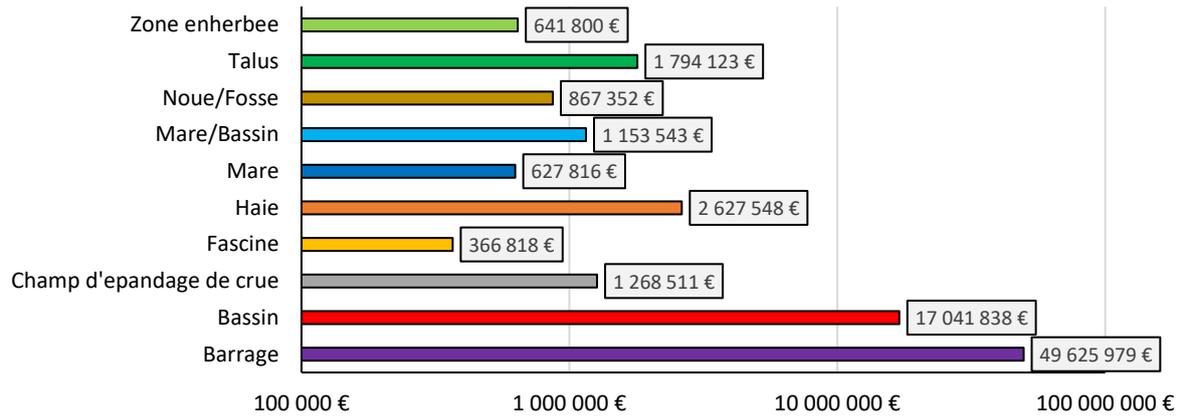


Figure 26 : Volume total des coûts d'entretien (€₂₀₁₈ H.T.) par type d'aménagement sur les départements de la Seine-Maritime et de l'Eure, selon l'hypothèse haute de calcul sur les ouvrages structurants.

3 Dommages induits par l'érosion, le ruissellement, et la turbidité aux captages AEP

3.1 Evaluation des dommages au bâti

3.1.1 Recensement des sinistralités

Le recensement des événements d'inondation par ruissellement et coulées de boues n'est pas systématique dans les communes impactées. La base de données "Gestion ASsistée des Procédures Administratives relatives aux Risques" (GASPAR), mise à jour par les services instructeurs départementaux, recense les procédures de déclaration de la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle référencées dans la base de données CatNat. Pour la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle, sont pris en compte, les dommages naturels directs ayant eu pour causes déterminantes l'intensité anormale d'un agent naturel lorsque les mesures habituelles à prendre pour prévenir ces dommages et empêcher leur survenance n'ont pu être prises. Les événements indemnisés à ce titre recensés depuis le 1er janvier 1983, doivent être la conséquence d'épisodes pluvieux d'intensité supérieure à la pluie décennale mesurée par les stations situées à proximité des communes concernées (ou par lame d'eau radar). La loi n°82-600 du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles, telles que les inondations, garantit les assurés contre les dommages directs, en contrepartie du paiement d'une surprime obligatoire de 12% à leur contrat d'assurance.

Dans le cadre de l'étude, seuls les événements faisant référence aux "inondations et coulées de boue" ont été sélectionnés. En revanche, les dossiers CatNat ne permettent pas de distinguer les coulées de boues des inondations. Un arrêté CatNat correspond à une commune et à un événement.

De 1983 à 2018, la Seine-Maritime et l'Eure ont été particulièrement impactés par des événements de type inondations et coulées de boues. On dénombre 3 864 procédures CatNat sur cette période (Figure 27). Les années 1992 à 2001 ont été particulièrement marquées par un nombre important d'événements inondations/coulées de boues recensés. L'année 1999 a été particulièrement touchée avec 1 595 procédures CatNat (toutes les communes de l'Eure et de la Seine-Maritime sans distinction ont été intégrées dans l'arrêté CatNat de décembre 1999). Par ailleurs, il a été montré que dans certaines régions, on assiste à une augmentation de la vulnérabilité des territoires en raison de l'accroissement de la population dans des zones faiblement occupées au préalable (Cerdan et al., 2009).

Néanmoins, la méthode de reconnaissance CatNat présente ses limites. Elle se base sur l'intensité de l'épisode de précipitations mesurée par les stations pluviométriques. Or, celles-ci ne se situent pas systématiquement sous les épicentres à caractère pluviogène. Selon la géomorphologie des territoires, une commune n'ayant pas connu d'épisode pluvieux significatif d'après les réseaux de mesures peut subir des dommages collatéraux issus des ruissellements générés en amont. De plus, les caractéristiques des épisodes hivernaux sur ces territoires font que de faibles précipitations précédées d'importants cumuls peuvent générer des ruissellements importants (Ouvry et al., 2003). La limite d'utilisation de cette base de données est également liée à la création de la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle. En effet, historiquement de nombreuses communes n'avaient pas connaissance de cette procédure, et d'autres ne voyaient pas l'intérêt de déclarer les sinistres survenus (Douvinet, 2008).

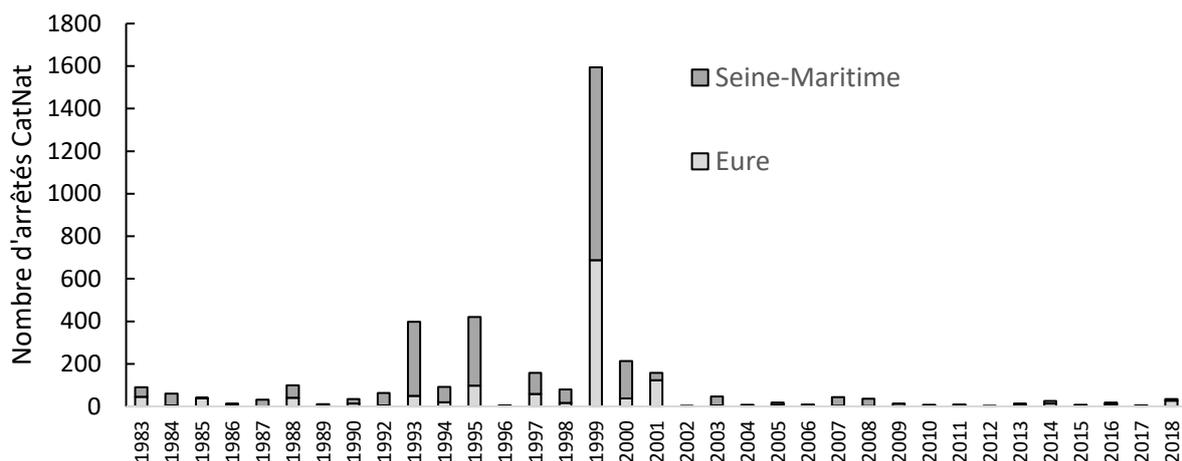


Figure 27 : Nombre de procédures CatNat par an liés aux inondations et coulées de boue sur les départements de Seine-Maritime et de l'Eure de 1983 à 2018.

En Seine-Maritime, on observe 2 périodes à fort risque de ruissellement, lorsque la proportion de sols nus est importante : en hiver (décembre-janvier) et au printemps (mai-juin). Dans l'Eure, le risque est moindre en hiver, et plus étalé en été, de mai à août (Figure 28).

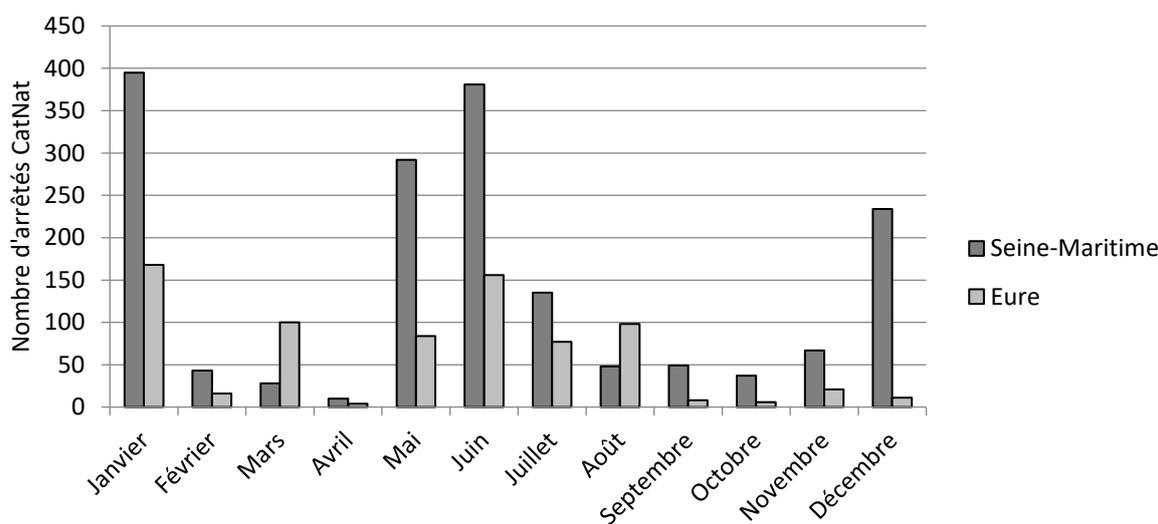
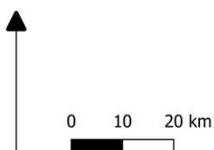
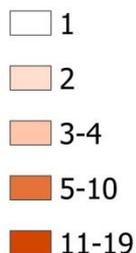


Figure 28 : Répartition mensuelle des procédures CatNat sur les départements de la Seine -Maritime et de l'Eure de 1983 à 2018 (hors 24 et 25/12/1999) – source : BD Gaspar

La carte de répartition des arrêtés CatNat inondation/coulées boueuses à l'échelle de la Haute-Normandie montre une prédominance de ces phénomènes dans le Pays de Caux, y compris dans des communes situées sur le plateau en ligne de crête (Figure 29).

Nombre d'arrêtés "Cat Nat" inondation/coulée boueuse par commune

Haute-Normandie 1983-2018



Sources : BD Gaspar, BD Carthage, IGN

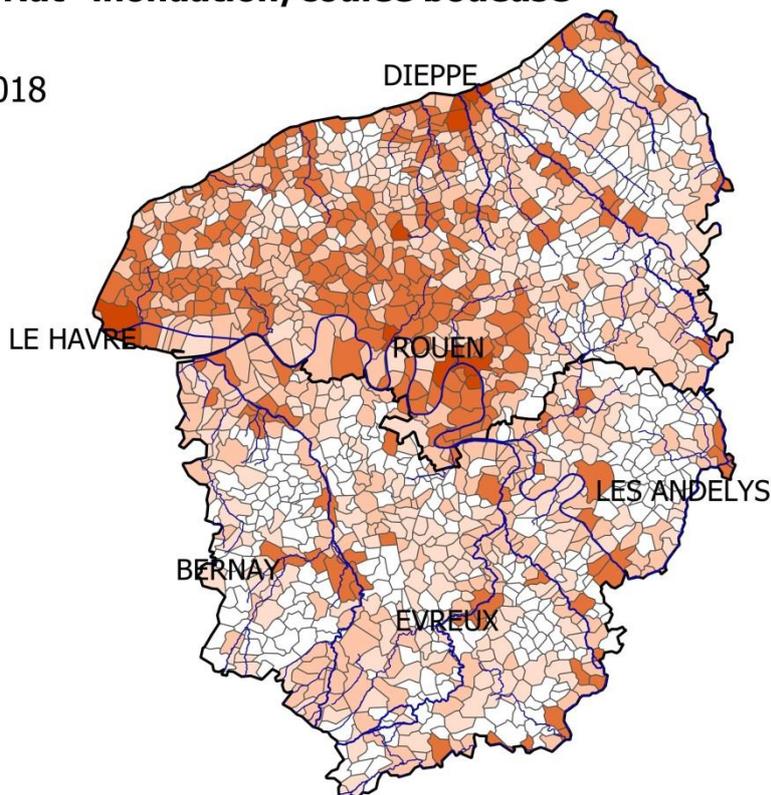


Figure 29 : Carte du nombre d'arrêtés CatNat inondation/coulée boueuse par commune en Haute-Normandie de 1983 à 2018 (BD Gaspar).

3.1.2 Estimation du coût des dommages directs

En France, depuis la mise en place du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles en 1982, la Caisse centrale de réassurance (CCR) donne accès aux couvertures de réassurance garanties par l'État en cas de catastrophe naturelle en France aux compagnies d'assurance qui en ont besoin (CCR, 2017). Parallèlement, en tant que secrétaire de la Commission interministérielle des catastrophes naturelles, la CCR gère une base de données (CatNat alias « Catastrophe Naturelle ») dans laquelle sont enregistrés tous les décrets reconnaissant la survenance d'une catastrophe naturelle. Au fil du temps, la CCR a collecté des données auprès des compagnies d'assurance qu'elle réassure dans le cadre d'accords bilatéraux afin de mieux comprendre l'exposition de la France aux catastrophes naturelles, couvrant les risques assurés (par localisation ou communes) et les sinistres encourus. Actuellement, 71 cédantes fournissent des données à l'adresse ce qui représente une part de marché de 90% en termes de primes et jusqu'à 60% pour les sinistres.

Le calcul des coûts extrapolés des sinistres par la CCR se fait au moment du chargement des sinistres. Les sinistres sont rattachés à un arrêté de la base CatNat par péril et date de survenance. La méthodologie d'extrapolation des coûts par la CCR est la suivante : la somme des sinistres d'une cédante est comparée aux données comptables annuelles et aux données de coûts par événements reçues par la CCR. Ensuite pour chaque exercice est calculé la part de marché des cédantes fournissant les données. Le nombre et le montant des sinistres reçus par exercice sont extrapolés selon un coefficient d'extrapolation. Ainsi pour chaque sinistre, les éléments suivants sont renseignés : la commune, la date, le coût initial, le coût extrapolé, le nombre de sinistres extrapolés. La garantie catastrophe naturelle prévoit la prise en charge des dommages matériels directs « nets de franchise » causés uniquement aux biens assurés. Les pertes d'exploitation consécutives aux dommages directs

sont également couvertes. Cependant, la base de données ne prend pas en compte le coût des dégâts sur les biens non assurés. Pour pallier cette limite, une évaluation des dommages réels peut être estimée en multipliant le coût extrapolé par 1,5 (CEPRI, 2019, *comm. pers.*).

L'extraction des coûts des dommages par la CCR a été réalisée sur la base du numéro des arrêtés CatNat pour dissocier les événements de grande et faible ampleur, selon une liste d'événements prédéfinie (Annexe 1.3). Les données extraites couvrent ainsi une large fenêtre temporelle, de 1998 à 2016. Les événements de 1998 et 1999 ont été ajoutés à la période d'étude puisque ce sont des années marquantes en termes d'ampleur des dommages, et cela a joué un rôle déclencheur dans la mise en place des programmes d'actions de lutte contre le ruissellement et l'érosion.

Pour les départements de la Seine-Maritime et de l'Eure, la base de données fournie par la CCR contient plus de 1377 entrées avec une distinction entre les particuliers et les professionnels. En cumulé, la somme des coûts initiaux fournie par les cédantes s'élève à 44,5 M€ de 1998 à 2016. **Compte tenu de l'extrapolation pour le nombre et le montant des sinistres pour chaque exercice, la somme des coûts extrapolés s'élève à 150,7 M€. L'évaluation des dommages réels s'élève à 226 M€.** L'évolution temporelle des coûts (Figure 30) nous montre que la grande majorité des événements se sont produits entre 1998 et 2003. Notamment au cours du mois de décembre 1999 où 505 communes ont connu des sinistres dans les départements de la Seine-Maritime et l'Eure, pour un coût réel avoisinant les 53 M€. Des orages printaniers ont également induit des dommages importants en mai 2000 et juin 2003 sur 139 communes où les coûts réels sont respectivement estimés à 35 et 70 M€. A noter que pour l'événement de juin 2003, le coût réel des dommages pour la seule commune du Havre est estimé à 59 M€ (occasionné plutôt par des ruissellements d'origine urbaine).

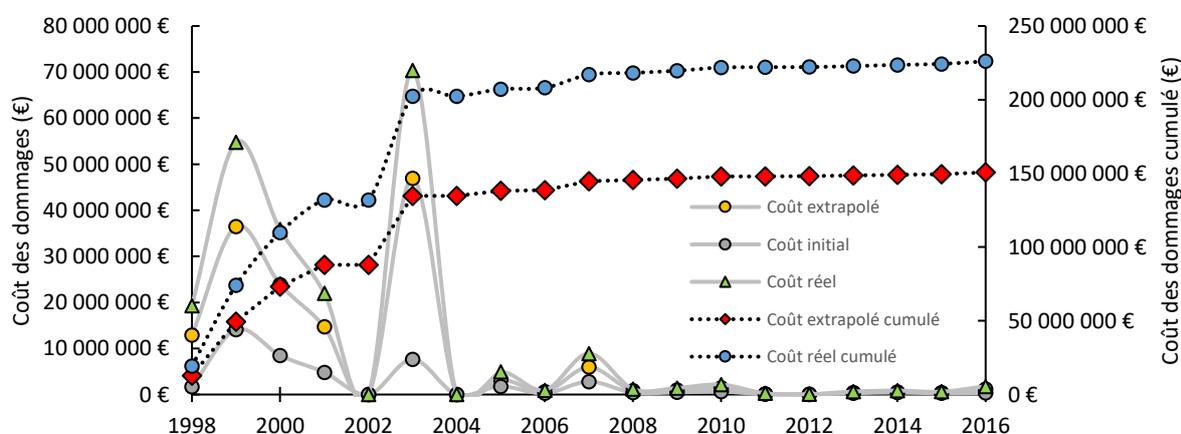


Figure 30 : Evolution temporelle du coût des dommages directs lié aux inondations et coulées boueuses, et répertoriés par la CCR sur les départements de Seine-Maritime et de l'Eure.

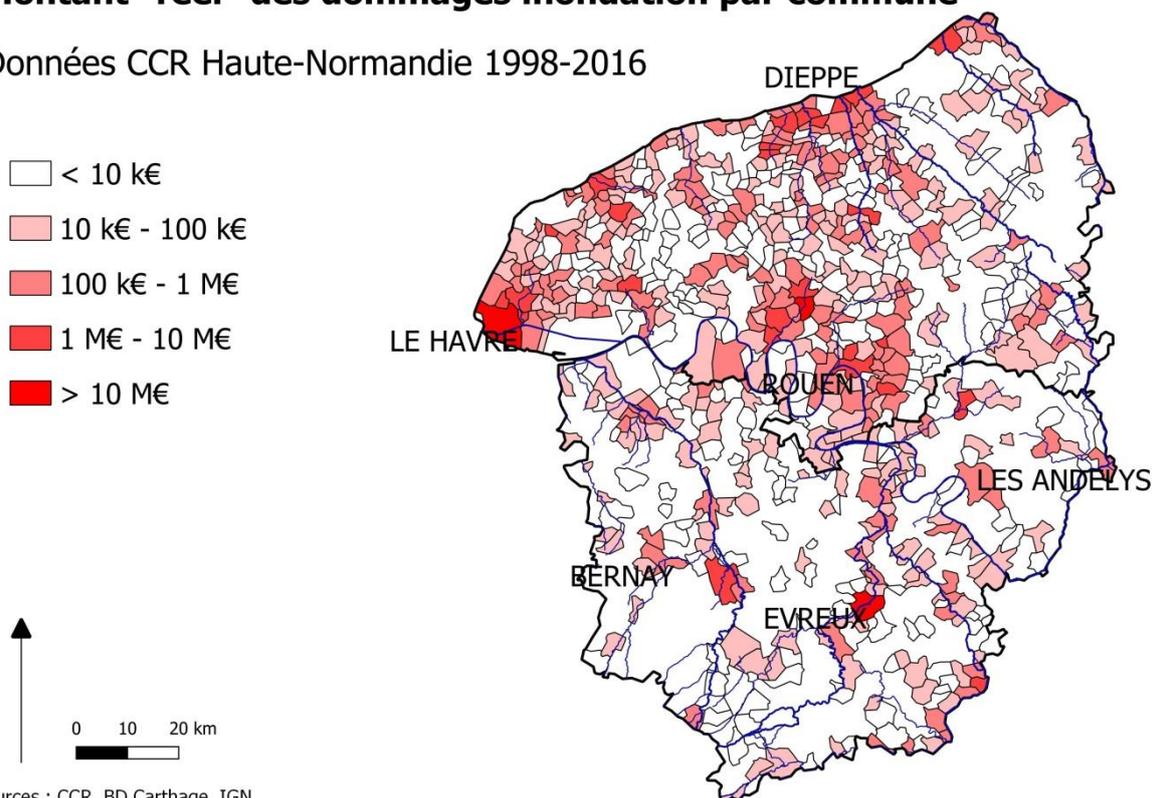
Pour la période considérée de 1998 à 2016, **le coût total réel des dommages aux particuliers est estimé à 153,1 M€ pour la Seine-Maritime et l'Eure (Tableau 10). Le coût total réel des dommages aux professionnels est quant à lui estimé à 72,9 M€ sur les deux départements.** Les dommages associés à ces phénomènes ont fait l'objet de 1 019 arrêtés CatNat sur 65 événements recensés pour cette période. Ces arrêtés totalisent 21 497 sinistres.

Le coût réel des dommages directs est significativement plus important en Seine-Maritime, que dans l'Eure, avec respectivement 195 M€ et 31 M€ de coûts de dommages cumulés (Figure 31). Néanmoins, nous observons que **le coût réel médian aux professionnels, par dossier CatNat ou par événement, est plus élevé dans l'Eure qu'en Seine-Maritime.** Le coût réel médian par commune, ou

par année et par commune, pour les professionnels est sensiblement équivalent sur les deux territoires. Nous observons toutefois, une plus grande dispersion des valeurs sur le territoire de Seine-Maritime. A titre d'exemple, même si le coût réel médian par évènement aux professionnels est plus faible en Seine-Maritime que dans l'Eure (57,7 k€ contre 82,4), l'écart-type y est beaucoup plus important (3,9 M€ contre 909 k€). Le **coût réel des dommages aux particuliers** est globalement **plus important en Seine-Maritime que dans l'Eure**, quel que soit l'indicateur choisi, et là aussi l'écart-type est beaucoup plus élevé.

Montant "réel" des dommages inondation par commune

Données CCR Haute-Normandie 1998-2016



Sources : CCR, BD Carthage, IGN

Figure 31 : Montant « réel » recalculé à partir des données CCR par commune en Haute-Normandie de 1998 à 2016.

Tableau 10 : Coût réel des dommages aux particuliers et aux professionnels sur les départements de Seine-Maritime et de l'Eure.

Coût réel (k€)	Seine-Maritime Particuliers	Seine-Maritime Professionnels	Eure Particuliers	Eure Professionnels
Médian par dossier CatNat	15,1 ($\sigma = 1\ 853$)	17,7 ($\sigma = 947$)	10,2 ($\sigma = 314$)	20 ($\sigma = 377$)
Médian par évènement	56,5 ($\sigma = 7\ 860$)	57,7 ($\sigma = 3\ 937$)	59,9 ($\sigma = 1\ 153$)	82,4 ($\sigma = 909$)
Médian par commune (1998-2016)	28,8 ($\sigma = 2\ 610$)	24,5 ($\sigma = 1\ 327$)	13,3 ($\sigma = 579$)	21,7 ($\sigma = 702$)
Médian par année et par commune	18,9 ($\sigma = 1\ 959$)	22,2 ($\sigma = 1\ 036$)	9,9 ($\sigma = 442$)	21,4 ($\sigma = 554$)
Total (1998-2016)	133 122	62 250	20 055	10 628

3.2 Evaluation des dommages aux infrastructures de transport

3.2.1 Réseau routier

Nous avons sollicité les Directions des Routes des départements de Seine-Maritime et de l'Eure afin d'obtenir des données sur les coûts des inondations et coulées boueuses sur leur réseau routier respectif. Compte tenu du patrimoine routier important que représentent ces deux départements, la prise de contact a été amorcée au niveau des Directions des Routes de ces deux départements, qui se sont chargées de récolter les informations auprès des agences territoriales. Ainsi, la Direction des Routes 76 est répartie en cinq agences territoriales (Clères, Envermeu, Forges-les-Eaux, Saint-Romain-de-Colbosc, et Saint-Valéry-en-Caux) pour 35 centres d'exploitation. Le secteur de Rouen est maintenant directement géré par la Métropole. La Direction des Routes 27 est répartie en trois agences territoriales (Brionne, Saint-Marcel, Conches-en-Ouche) pour 21 centres d'exploitation.

Les interventions à la suite d'épisodes d'inondations ou de coulées boueuses sont de plusieurs natures, à savoir :

- Les curages de bassins, fossés, et canalisations
- La réfection de chaussée, ouvrages d'art ou hydrauliques
- Les nettoyages de chaussées

Ces interventions induisent nécessairement des travaux (et donc des coûts), qui peuvent être opérés soit en régie, ou sous-traités aux entreprises.

➤ Dommages aux réseaux routiers pour la Seine-Maritime

Les données collectées par la Directions des Routes de Seine-Maritime sur les coûts de nettoyage des routes s'étendent de 2015 à 2018, mais restent partielles. De plus, elles sont basées en partie sur des hypothèses identiques quelle que soit l'année, malgré la grande variabilité des phénomènes de coulées boueuses. Les résultats de l'année 2018, pour laquelle les données sont les plus complètes, sont synthétisés dans le Tableau 11. Les données manquantes ont été estimées par extrapolation.

Le coût des interventions de curage réalisées en sous-traitance est extrapolé à partir des données de l'agence de Saint-Romain pour 2018 (seule année disponible), en fonction du linéaire de routes, avec un facteur de pondération pour les agences de Forges (en grande partie sur le pays de Bray qui est moins sensible à l'érosion) et l'agence de Rouen (plus urbanisée). L'agence de Clères a indiqué un montant de 7 000 € H.T par centre et par an, quelle que soit l'année.

Concernant les travaux en régie, l'hypothèse fournie par la Direction des Routes se base sur cinq phénomènes pluvieux orageux annuels nécessitant des interventions de nettoyage en régie, qui mobilisent deux équipes de deux personnes par centre pendant 8h sur deux jours avec deux fourgons et un tracteur, soit environ 12 000 € H.T/an/centre, quelle que soit l'année. Seule l'agence de Clères a fourni un montant différent selon l'année : 37 200 € H.T pour l'année 2018 (mais moins de 10 000 euros en moyenne pour les années 2015 à 2017).

Le Département de Seine-Maritime dépense en moyenne 208 000 € H.T/an pour le curage des bassins routiers mixtes (càd collectant à la fois des eaux de voirie et des eaux de ruissellement agricoles). Des travaux de curage exceptionnels ont dû être menés à la suite des événements de 2018 sur 14 bassins pour un coût de 250 000 € H.T.

Les ruissellements peuvent également occasionner des dommages aux voiries, qui induisent des coûts de travaux de réparation voire de réfection de voiries. Ces dommages sont évidemment

ponctuels. Nous n'avons pas de données globales sur les coûts associés, mais le coût d'une réparation peut être élevé par rapport aux opérations de curage : par exemple, des travaux de réparation sur les RD 102 et 1314 à Mesnil-Mauger en 2016 ont coûté 147 600 € H.T.

Tableau 11 : Estimation du coût global d'intervention pour le nettoyage des routes départementales de Seine-Maritime en 2018 (année érosive).

Agence routière	Linéaire de route (km)	Travaux en régie € H.T	Sous-traitance € (H.T)
Clères	1 003	37 200	42 000
Envermeu	1 336	96 000	66 812
Forges	1 156	84 000	28 890
Rouen	774	24 000	19 358
Saint Romain	978	72 000	53 000
Saint-Valéry	1 343	96 000	67 138
Total général	6 590	409 200	277 198

Ainsi, le total des dommages liés aux coulées boueuses aux routes départementales de Seine-Maritime pour l'année 2018, particulièrement érosive, est estimé à 1 144 000 € H.T (coûts liés aux cavités souterraines non pris en compte). Ce montant est très variable suivant les années, comme le montrent les montants de travaux en régie de l'agence de Clères, pour lesquelles nous disposons des années 2015 à 2018.

➤ Dommages aux réseaux routiers pour l'Eure

Pour la direction des routes 27, le bilan financier s'étend sur la période 2014/2020 mais sans distinction entre les trois agences territoriales (Tableau 12). Lors d'épisodes de précipitations, les impacts observés sont les ruissellements, mais surtout l'ouverture de cavités karstiques sur le réseau routier. La ventilation est la suivante : cavités souterraines (958 213 € H.T) et ruissellements (195 418€ H.T). Soit en moyenne 28 k€ H.T/an rien que pour les ruissellements.

Tableau 12 : Estimation du coût global d'intervention pour les routes départementales de l'Eure en lien avec l'érosion et le ruissellement.

Années	Montants liquidés (€ H.T)	Nature des travaux
2014	38 444	• Cavités souterraines : diagnostic et comblement
2015	316 653	• Ruissellements : réfections de chaussées, ouvrages d'art ou hydraulique, terrassements/curages après sinistres
2016	160 629	
2017	35 626	
2018	145 476	
2019	246 958	
2020	209 844	

➤ Bilan des dommages aux réseaux routiers

L'ensemble de ces résultats permet d'avoir une vision globale des dégâts occasionnés par le ruissellement et l'érosion sur les routes départementales de la Seine Maritime et de l'Eure. Néanmoins, il manque des données, notamment sur la variabilité interannuelle. Il apparaît que le coût annuel des dommages liés au ruissellement et coulées boueuses sur les routes départementales de l'Eure est très inférieur à celui de la Seine-Maritime. **Enfin, de réelles difficultés d'acquisition de données, notamment de cas d'étude précis, ne nous ont pas permis de déterminer une fonction de dommage applicable pour les routes dans le cadre de l'ACB présentée le volume 3 de ce rapport.**

3.2.2 Réseau ferroviaire

Des informations relatives aux dommages subis par les infrastructures de transport ferroviaire nous ont été transmises par le pôle Environnement et Développement Durable de la Direction Territoriale Normande de la SNCF. Ces documents font la synthèse financière des dépenses engagées sur les incidents mineurs liés aux inondations, coulées boueuses et éboulements. Malheureusement, un réel problème d'acquisition et d'extraction des données a été identifié au cours de l'étude :

1. Les dossiers des affaires achevées ne sont pas gardés plus de 10 ans au sein de l'infra pôle. Au-delà, les dossiers partent en archivage et nécessitent un temps de recherche plus important que la SNCF n'a pas pu nous accorder.
2. Les données fournies par la SNCF ne prennent pas en compte les évènements exceptionnels identifiés et annoncés par Météo France, qui sont alors imputés sur un autre compte rattaché à l'évènement.
3. Certains ouvrages sensibles, connus de la SNCF, nécessitent une surveillance particulière (tournées spécifiques). Ces ouvrages sont composés de remblais/déblais qui présentent un fort risque érosif. De plus, des visites d'ouvrages sont régulièrement opérées par les agents de la SNCF (régulière, ponctuelle, astreinte). Les coûts ne sont toutefois pas répertoriés dans un compte spécifique et il n'est pas possible d'avoir une estimation de ce coût.
4. Selon la SNCF, les coulées boueuses peuvent être responsable de retards et de l'élaboration de travaux curatifs, mais le chiffrage peut s'avérer difficile car les coûts sont globalisés dans une enveloppe "maintenance" qui comprend également les coûts de curage, débroussaillage, etc. L'ouverture d'un lot et d'un compte spécifique est possible si le problème est récurrent, mais cela n'a jamais été rencontré sur le territoire de la Seine-Maritime et de l'Eure.

Les données fournies par la SNCF permettent néanmoins de recenser 42 sinistres entre 2012 et 2018, dont 14 évènements de coulées boueuses, 5 éboulements, et 23 inondations. **Le coût total supporté par la SNCF et lié à ces sinistres s'élève à 826 k€ H.T.** Le moment des dommages par sinistre est très variable, allant de quelques centaines d'euros (exemple coulée de boue entre les PK 185 et 186 sur la ligne Motteville St Valéry en 2015) à 145 k€ H.T (exemple d'une voie inondée entre Bréauté et Fécamp en 2013). On observe également des différences significatives entre les années : les années 2013 et 2018 sont particulièrement marquées avec un coût total des sinistres s'élevant respectivement à 366 et 345 k€ H.T (Figure 32). Les autres années sont moins marquées en termes de coûts de dommages avec un coût annuel allant de 4,3 à 77 k€ H.T. Les sinistres de type inondation sont les plus coûteux, avec un coût total de 569 k€ H.T, suivi des éboulements à hauteur de 175 k€ H.T, et enfin les coulées boueuses (84,5 k€ H.T). Ces coûts paraissent toutefois faibles à l'échelle des territoires de la Seine-Maritime et de l'Eure, et sont très probablement sous-estimés faute de données suffisantes. Là aussi, faute de données et de cas d'étude précis, nous n'avons pas été en mesure d'établir une fonction de dommage pertinente pour l'évaluation des dommages au réseau ferroviaire dans le cadre de l'ACB présentée dans le volume 3.

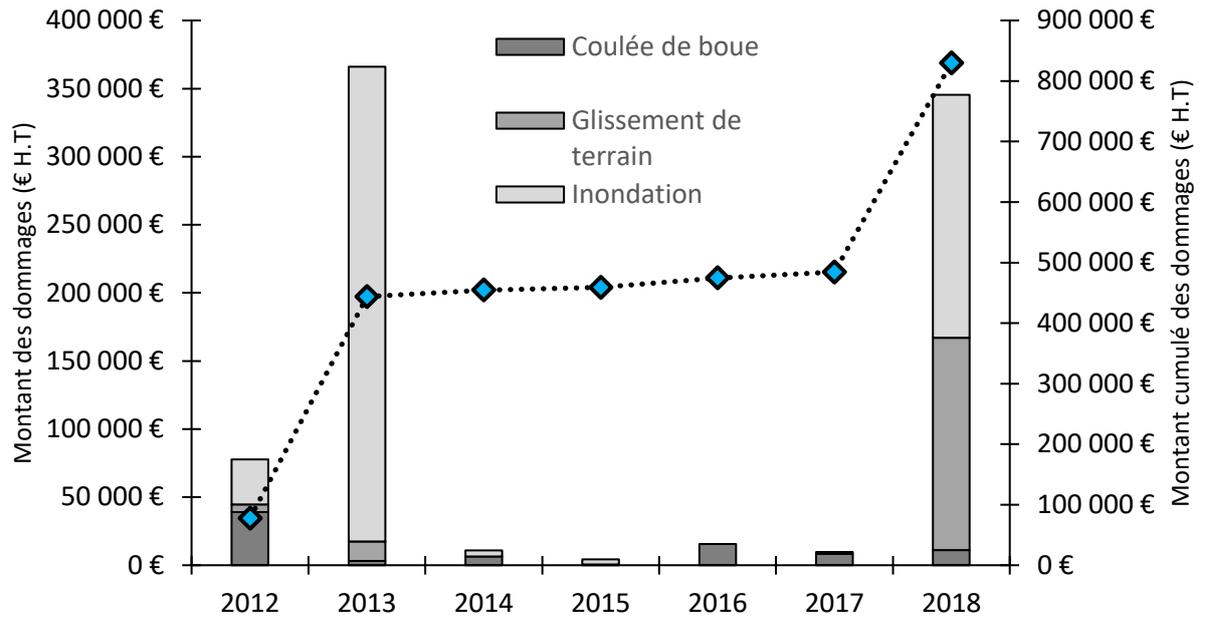


Figure 32 : Montant et montant cumulé des dommages (€ H.T.) supportés par la SNCF pour les évènements de type inondation, glissement de terrain, et coulées de boue sur les territoires de l'Eure et de la Seine-Maritime entre 2012 et 2018.

3.3 Evaluation des dommages pour l'AEP

3.3.1 Arrêts de distribution d'eau potable

3.3.1.1 Acquisition de données

Les données relatives aux arrêts de distribution de l'eau potable survenus sur les départements de Seine-Maritime et de l'Eure sont issues de données fournies par l'Agence Régionale de Santé (ARS) et de données capitalisées lors d'un stage de L3 qui s'est déroulé au laboratoire M2C sous la direction de M.Fournier. Dans cette base de données et pour chaque arrêt de distribution, plusieurs informations essentielles à l'analyse sont renseignées : date et durée de la restriction (en jours), communes et nombre d'habitants touchés. Néanmoins, l'information était parfois partielle et a nécessité un complément d'enquête auprès de l'ARS. In-fine, le jeu de données a pu être complété à hauteur de 60%, et la durée des arrêts de distribution reste manquante pour 40% des événements. Pour l'ensemble des arrêts de distribution d'eau potable intervenus dans le département de l'Eure, la durée exacte de chaque arrêt (en jours) est connue. A l'inverse, cette information est partielle pour le département de Seine-Maritime : la durée exacte n'est pas connue pour 165 épisodes. Afin d'évaluer cette durée, nous avons calculé la durée moyenne d'un arrêt de distribution sur l'ensemble des événements connus en Seine-Maritime entre 1992 et 2018. Nous avons ainsi établi que la durée moyenne d'un arrêt de distribution était de 10,5 jours. Cette valeur a donc été choisie comme valeur de référence pour les 165 épisodes cités précédemment.

Pour chaque arrêt de distribution, il est admis selon les informations fournies par l'ARS qu'il y a diffusion de l'information au public et distribution d'eau embouteillée. Ainsi, le coût économique global se répartit en trois sous-catégories : (i) les coûts de distribution de l'eau en bouteille à la population, (ii) les coûts liés à la diffusion de l'information, et (iii) les coûts de logistique.

Afin d'évaluer les coûts liés à ces trois sous-catégories, nous nous sommes rapprochés de l'ARS et de la CODAH. L'ARS a été en mesure de nous fournir un rapport interne portant sur l'impact de 8 épisodes pluvieux de décembre 1992 à 1998 qui, in-fine, nous a été très utile pour évaluer les coûts liés à la diffusion de l'information (Mansotte, 1998). Pour les deux autres sous-catégories (i.e distribution d'eau embouteillée et logistique), notre analyse s'est basée sur un tableau financier de la CODAH qui recense les dépenses engagées à la suite d'épisode de turbidité de l'eau potable datant d'Octobre 2014 (Annexe 1.4).

3.3.1.2 Evaluation des coûts

Le jeu de données final comprend 407 arrêts de distribution/restrictions d'usage sur la période 1992-2018 (Figure 33). 319 arrêts de distribution sont recensés sur le département de la Seine-Maritime et 88 sur le département de l'Eure. En cumulé, ce sont 1 581 787 personnes qui ont été touchées par les arrêts de distribution sur cette fenêtre temporelle.

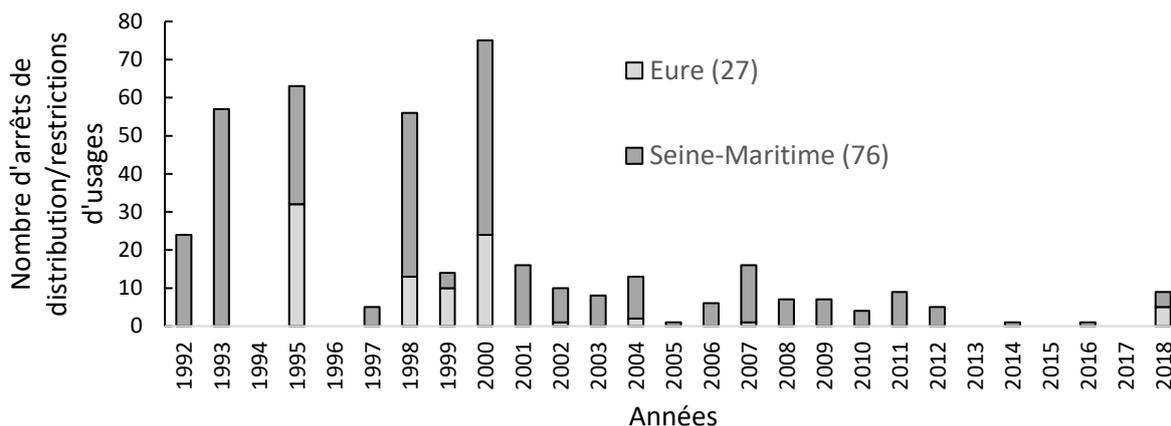


Figure 33 : Nombre d'arrêts de distribution de l'eau potable et restrictions d'usage sur les départements de l'Eure et de la Seine-Maritime pour la période 1992-2018 (données ARS).

Trois sous-périodes se distinguent et mettent en évidence les salves d'investissements réalisées à partir des années 2000 pour améliorer la qualité de l'eau potable. La première de 1992 à 2000 marquée par de très nombreux arrêts de distribution ($n = 294$) qui affectent les deux départements. La seconde de 2001 à 2012 avec un nombre d'arrêts de distribution ($n = 102$) plus faible chaque année et qui touchent essentiellement le département de Seine-Maritime. Enfin, la troisième période est marquée par des années sans arrêts de distribution (2013, 2015, 2017) mais avec un bruit de fond persistant, et des syndicats encore affectés car dépourvus d'interconnexions.

On note que en 2018, encore 9 syndicats ont été touchés par un arrêt de distribution affectant une population totale de 33 000 habitants (SAEP de la vallée de la Risle, SERPN, SIAEP de l'Andelle et ses plateaux, SIAEPA Auffay-Tôtes, SIAEPA de la région de Valmont, SIAEPA de la Vallée de la Saône, SIAEPA les Trois Sources Cailly, Varenne, Béthune).

➤ Coûts de distribution de l'eau embouteillée

Selon l'ARS, pour chaque arrêt de distribution d'eau potable, une distribution d'eau embouteillée est mise en place sur la base d'une consommation de 1,5 L/jour/pers. Connaissant la durée de chaque arrêt de distribution ainsi que le nombre de personnes affectées, il est nécessaire d'évaluer le prix d'achat d'une bouteille d'eau. Pour cela, nous nous sommes basés sur un tableau financier fourni par la CODAH qui recense les dépenses engagées à la suite d'une pollution de l'eau par la turbidité en octobre 2004 (Annexe 1.4). A la lecture de ce document, il apparaît que la dépense engagée pour l'achat de 25 palettes d'eau Cristalline (soit 12 600 bouteilles) est de 1 871,09€ H.T, ce qui nous donne un prix pour une bouteille d'eau distribuée de 0,0986 € HT L⁻¹. En tenant compte de ces informations, il est possible d'évaluer le coût de distribution de l'eau embouteillée selon la formule suivante :

$$CDE_i = (Nb_i \times t_i) \times 1,5 \times 0,0986 \quad \text{Eq. (1)}$$

Avec CDE_i le coût de distribution de l'eau embouteillée pour l'arrêt de distribution i , Nb_i le nombre d'habitants touchés par l'arrêt de distribution, et t_i la durée en jours. Selon cette approche, il est possible d'évaluer le coût total de la distribution d'eau embouteillée pour l'ensemble des arrêts de distribution survenus avec :

$$CTDE = \sum_{i=1}^n CDE_i \quad \text{Eq. (2)}$$

Ainsi, le **coût total lié à la distribution de l'eau embouteillée est évalué à 2,5 M€ H.T** pour l'ensemble des arrêts de distribution recensés sur les **départements de l'Eure et de la Seine-Maritime pour la période 1992-2018**.

➤ Coûts de diffusion de l'information

Lors de l'émission d'un arrêt de distribution de l'eau potable par le gestionnaire, l'information est systématiquement relayée aux services de l'état (ARS, Agence de l'eau, Hôpitaux, mairies, etc.) et à la population. Pour évaluer le coût économique lié à la diffusion de l'information, peu d'informations sont réellement disponibles. L'ARS a cependant été en mesure de nous fournir un cas d'étude, relativement ancien, mais très bien documenté (Mansotte, 1998). A la lecture de ce document, il apparaît que la démarche de diffusion de l'information suit un protocole précis selon plusieurs moyens de communication : (i) fax, (ii) courrier, et (iii) téléphone (Figure 34). Nous sommes conscients que ce protocole a dû évoluer avec l'avènement du numérique, mais faute d'éléments concrets à notre disposition, notre évaluation économique sera basée sur cet unique document.

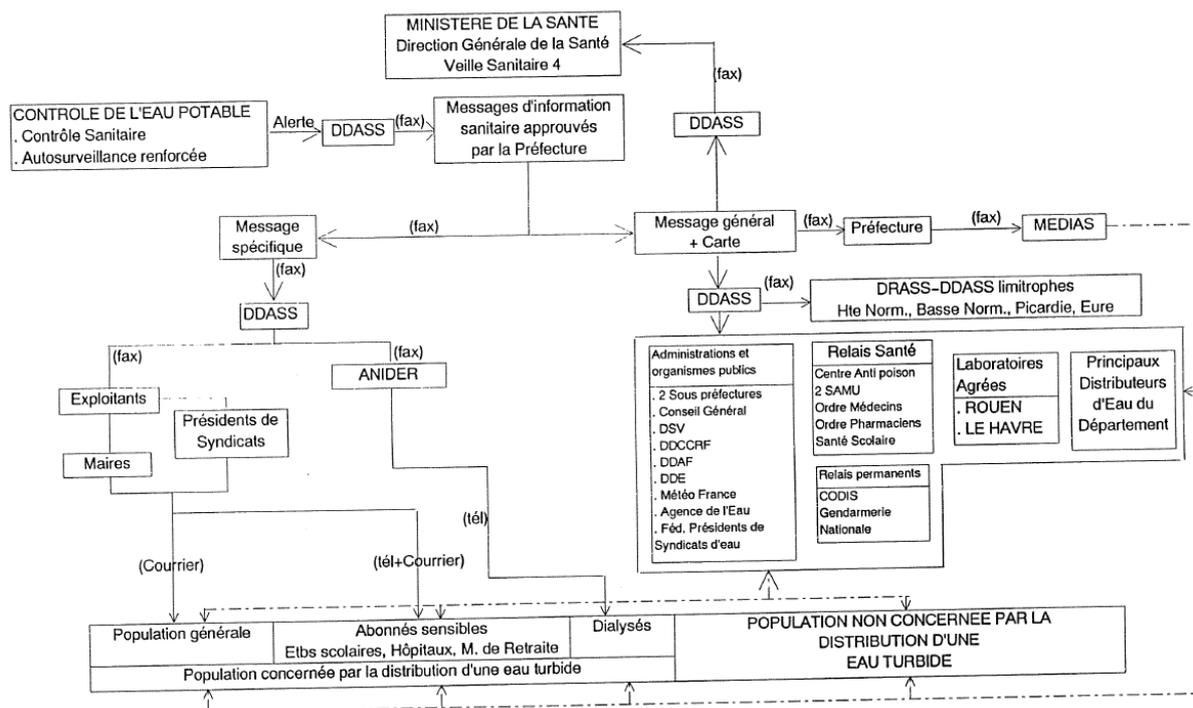


Figure 34 : Protocole de diffusion de l'information lorsque la population est impactée par un arrêt de distribution de l'eau potable (Mansotte, 1998).

Ce document concerne un événement survenu en janvier 1998 où 104 communes (dont 72 en totalité) ont été impactées par un épisode pluvieux entraînant une turbidité importante de l'eau potable et donc un arrêt de distribution. Cet épisode s'est déroulé sur 19 jours, en 2 vagues successives, et a impacté 13 unités de distribution de l'eau potable. Au total, 48 153 personnes ont été impactées. Au cours de cet épisode, la diffusion de l'information s'est déroulée de la manière suivante : (i) la DDASS a procédé à l'envoi de 720 fax, (ii) la gestion de l'événement par la DDASS a représenté

32,2 ETP sur 11 jours, (iii) 19 articles de presses sont parus et 9 reportages TV ont été réalisés, et (iv) des courriers ont été envoyés aux personnes touchées et aux abonnés sensibles.

Pour évaluer le coût économique, nous avons considéré que deux courriers ont été envoyés à chaque foyer sur les communes concernées pour prévenir du début et de la fin de la restriction d'usage de l'eau potable. Sur la base des tarifs 2019 délivrés par la Poste, le coût de l'envoi d'un courrier type "lettre verte" est de 0,88 € TTC/unité. D'autre part, en considérant qu'en France, le nombre de personnes par foyer est de 2,58 (INSEE 1975-2005⁴), alors le coût d'envoi des courriers (CEC) pour cet épisode de janvier 1998 est le suivant :

$$CEC = \frac{48153}{2,58} \times 2 \times 0,88 = 32\,848 \text{ € TTC} \quad \text{Eq. (3)}$$

La gestion de cet évènement par les ETP de la DDASS a été variable sur la durée de l'évènement. A titre d'exemple, la journée du 5 janvier a mobilisé 1,5 ETP alors que la journée du 6 janvier a mobilisé 6 ETP (Tableau 13). Le cumul du nombre d'ETP mobilisé par jour, sur la durée de l'évènement, s'élève à 32,2 ETP. Pour calculer le coût économique lié à la mobilisation du personnel il convient de prendre en compte cette variabilité. D'autre part, il est établi que la durée journalière de travail est de 7h⁵. Enfin, le coût horaire d'un personnel de l'administration publique est évalué à 44 622€/an⁶. Sur la base d'une durée effective de travail de 1 607h/an, le coût horaire d'un employé supporté par l'administration est de 27,76€/h.

Tableau 13 : Nombre d'équivalent temps plein (ETP) de la DDASS mobilisés pour la diffusion de l'information à la suite de l'épisode turbide de janvier 1998.

Jour	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	19	20	21	22	23
ETP	1,5	6	3	3	3	0,1	0,1	3	3	2	2	2	1	0,5	0,5	0,5	1

Ainsi, le coût lié à la mobilisation des ETP de la DDASS pour cet évènement est le suivant :

$$CETP = \sum_{i=1}^n (ETP_i \times 7 \times 27,76) = 6257,1 \text{ € TTC} \quad \text{Eq. (4)}$$

Avec ETP_i, le nombre d'équivalent temps plein mobilisé pour la journée i.

Les coûts liés à la rédaction/parution des articles de presse, reportage TV ne sont pas supportés par la communauté et donc non pris en compte ici. Le coût des appels téléphoniques et l'envoi des courriers aux abonnés sensibles est difficilement évaluable faute de données, et également non pris en compte ici. Ainsi, le coût total lié à la diffusion de l'information pour cette évènement de janvier 1998 s'élève à 39 117 € TTC. Le coût unitaire s'élève donc à 0,648 € H.T par habitant touché. Le coût unitaire rapporté à **l'ensemble des arrêts de distribution ayant lieu entre 1992 et 2018 sur les départements de Seine-Maritime et de l'Eure**, permet d'évaluer **un coût total pour la diffusion de l'information de 1,02 M€ H.T.**

⁴ <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1280856>

⁵ <https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/N20276>

⁶ <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1371004>

➤ Coûts de logistique

L'évaluation des coûts liés à la logistique mise en place lors d'un arrêt de distribution repose là aussi sur le tableau financier fourni par la CODAH qui recense les dépenses engagées à la suite d'une pollution de l'eau par la turbidité en octobre 2004 (Annexe 1.4). La lecture de ce document nous permet d'évaluer les frais engagés par la commune de Gonfreville l'Orcher pour l'organisation de la desserte en eau embouteillée dans les quartiers et en porte à porte sur la commune (14 170 habitants). Ils s'élèvent à 10 562,68 € HT, ce qui donne un coût unitaire de 0,74 € H.T/habitant impacté. L'application de ce coût unitaire pour **l'ensemble des arrêts de distribution survenus entre 1992 et 2018 sur les départements de Seine-Maritime et de l'Eure** nous permet d'évaluer **le coût total lié à la logistique à 1,17 M€ H.T.**

L'agrégation des trois sous-catégories mentionnées ci-dessus permet d'évaluer **un coût global lié à la gestion des arrêts de distribution d'eau potable à 4,7 M€ H.T pour l'ensemble des 407 arrêts survenus entre 1992 et 2018 sur les départements de Seine-Maritime et de l'Eure (Figure 35).** Le coût global pour le département de Seine-Maritime s'élève à 3,8 M€ H.T contre 0,9 M€ H.T pour le département de l'Eure. Le coût moyen d'un arrêt de distribution est sensiblement le même pour chaque département (Seine-Maritime = 11,9 k€ H.T; Eure = 9,9 k€ H.T), ceci s'expliquant par une durée moyenne d'un arrêt de distribution moins importante en Seine-Maritime (10,5 contre 17,6 jours) mais une population touchée plus importante (4 147 contre 2 941).

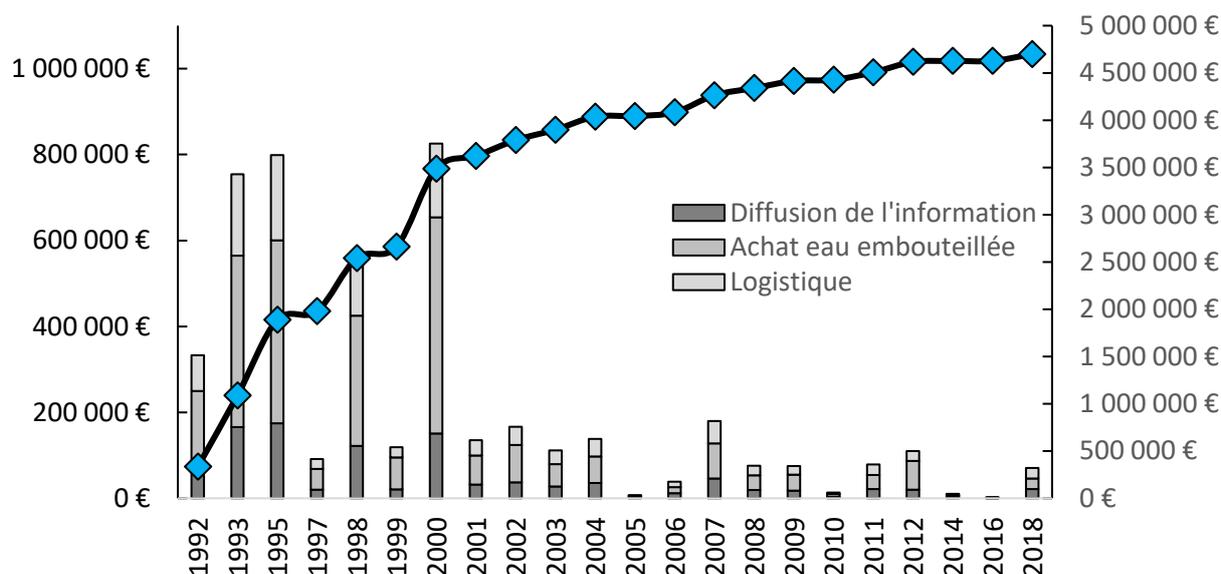


Figure 35 : Evolution des coûts induits par les arrêts de distribution de l'eau potable sur les départements de Seine-Maritime et de l'Eure entre 1992 et 2018.

3.3.2 Abandons de captages

Les données relatives aux abandons de captages ont été collectées auprès des services de l'ARS 76 et 27. Le jeu de données global référence 218 abandons de captages sur leurs territoires respectifs. Pour chaque captage est renseigné l'unité gestionnaire, le nom du captage, l'identifiant (n° BSS), la cause et la date d'abandon. Parmi ces 218 abandons, seuls 30 ont été abandonnés pour cause de turbidité récurrente (16 en Seine-Maritime et 14 dans l'Eure) entre 1970 et 2012. Les autres captages ont été abandonnés pour des causes différentes (pesticides, micropolluants, ou encore manque de productivité). Les coûts engendrés par les abandons de captage faisant suite à des épisodes de

turbidité récurrents sont donc particulièrement difficiles à évaluer, étant donné la maigre quantité de données disponibles et la faible occurrence des abandons de captages pour cause de turbidité. Une approximation de ces coûts a toutefois pu être réalisée en croisant les données récoltées en lien avec ces abandons et celles liées aux investissements rendus nécessaires pour palier à ce manque. Deux abandons de captages ont ainsi pu être analysés (n°BSS : 00751X0020 et 00743X0072), sur les communes de Bretteville-du-Grand-Caux et Cuverville, étant donné que leur date d'abandon permet d'établir une correspondance avec la fenêtre temporelle couverte par les fichiers des financeurs. Le 1^{er} captage (00751X0020) géré par la SIAEPA de Bretteville Saint Maclou, a été abandonné en 1999 pour cause d'épisodes de turbidité fréquents. Dès lors, Un nouveau forage a été créé à St Maclou la Brière. On dénombre 10 lignes de financement sur les fichiers fournis par l'AESN et le CD76 qui semblent être en lien direct avec cet abandon de captage (Tableau 14).

Tableau 14 : Subventions accordées au SIAEPA de Bretteville St-Maclou par l'AESN et le CD76 à la suite de l'abandon de captage (n°BSS : 00751X0020).

Année	Objet	Montant subventionnable (€ H.T)
1999	Etude hydraulique des bassins versants situés en amont du captage d'eau	23 353,20
2000	Interconnexion avec le SIAEP de Fécamp Sud-Ouest	154 725,61
2001	Equipement du nouveau forage et du réservoir	64 024,39
2002	Acquisition d'une parcelle de 5,5 ha dans le périmètre de protection éloigné du captage	43 626
2004	Acquisition du périmètre de protection immédiat du captage et acquisition des terrains autour des bétoires	12 655
2004	Mise en conformité – Prélèvements et stockages	31 800
2006	Turbidimètre et télégestion au forage	18 440
2006	Etude de sécurisation AEP secteur Bretteville	219 100
2011	Maîtrise d'œuvre pour les travaux de sécurisation	102 330

Les coûts supportés pour cet abandon de captage sont donc de plusieurs natures : interconnexion, acquisition foncière, sécurisation, instrumentations et études. Pour ce premier cas, la sommes des coûts induits par l'abandon et le remplacement du captage sont évalués à 670 054€. Pour le second captage (00743X0072) géré par le SIAEPA de Criquetot l'Esneval, les coûts induits sont plus difficilement évaluables. Cet abandon de captage est survenu à la suite de l'ouverture d'une bétoire sur la commune en 2010 (BRGM, 2010). Dès lors, le captage n'a pas été remplacé et depuis la commune ne possède plus de points de captage AEP. La commune est depuis desservie par le Syndicat de Fécamp Sud-Ouest. Cette ouverture de bétoire a eu un effet important sur la qualité de l'eau distribuée sur le territoire. Des phénomènes de turbidité récurrents ont été observés ainsi que des apports en pesticides et nitrates. Des travaux de sécurisation et de traitement ont été rendus nécessaires et depuis 2010, les investissements liés à cette ouverture de bétoire sont estimés à 4,689 M€.

4 Bilan du volume 1 : Principales conclusions & limites

L'objet de ce premier volume est de réaliser un bilan économique global des actions et des dommages liés au ruissellement, à l'érosion des sols et à la turbidité aux captages en Haute-Normandie, depuis les événements marquants de la fin des années 1990 et du début des années 2000.

Globalement, les données collectées auprès des différents financeurs, organismes, et acteurs régionaux sont très hétérogènes, et ne permettent généralement pas d'établir un bilan précis, année par année, pour l'ensemble de la période, et pour chaque type de coût.

Concernant les actions de réduction des impacts du ruissellement, de l'érosion et de la turbidité aux captages, nous avons pu établir des fourchettes de coûts d'investissement et d'entretien (Tableau 15) :

Tableau 15 : Bilan des coûts des actions de réduction des impacts du ruissellement, de l'érosion et de la turbidité aux captages en Haute-Normandie.

Actions	Période	Montant global (M€ H.T)	
		Estimation basse	Estimation haute
Investissements des collectivités	2000-2017	300	400
Entretien des ouvrages et aménagements	1931-2018	15	80

Pour les coûts d'investissement, nous avons fait appel aux données centralisées des financeurs intervenant sur ces thématiques. Nous avons dû mettre en œuvre des méthodologies adaptées pour analyser ces bases de données, du fait de plusieurs limites :

- Données incomplètes sur les cofinancements pouvant intervenir 7 co-financeurs différents, et en général 2 ou 3 par opération (investissements sur le volet « ruissellement / érosion »)
- Manque d'information sur la raison (ou les raisons) de la mise en œuvre des actions, permettant d'affecter les actions à la turbidité ou à un autre type de pollution (investissements sur le volet « turbidité / AEP »)

Les données sur les coûts d'entretien sont, elles, dispersées dans les différentes structures en charges de l'entretien des ouvrages et aménagements (syndicats de bassins versants, intercommunalités, voire commune). Il apparaît que les moyens affectés à l'entretien sont très variables d'une structure à l'autre.

Les dommages liés aux coulées boueuses sont bien connus lorsqu'ils rentrent dans le cadre d'une indemnisation au titre de la garantie « Cat Nat », grâce à la base de données nationale de la Caisse Centrale de Réassurance (CCR). Cela concerne les dommages aux biens assurés des particuliers et des entreprises. En revanche, les dommages consécutifs à des événements fréquents, non reconnus comme « Catastrophe Naturelle » ne sont pas renseignés. D'autre part, les données sur les coûts des dommages aux infrastructures, comme les routes, les voies ferrées, les captages d'eau potable à travers la turbidité, etc., sont détenues par les différents gestionnaires (Tableau 16). Elles sont rarement exhaustives, et ne couvrent généralement que des périodes très récentes.

Tableau 16 : Bilan des dommages connus liés au ruissellement, à l'érosion et à la turbidité aux captages en Haute-Normandie.

Enjeux	Source de données	Période	Montant estimé des dommages (M€ H.T)
Particuliers / Entreprises (Cat Nat)	CCR	1998-2016	226
Routes départementales	CD76 / CD27	2018	1,2
Voies ferrées	SNCF	2012-2018	0,8
Arrêts de distribution d'eau potable	ARS	1992-2018	4,7
Abandons de captages d'eau potable	ARS	1999-2017	5,2

Ce tableau n'est évidemment pas exhaustif :

- Pour les enjeux listés dans le tableau, tous les impacts ne sont pas connus. Par exemple, les surcoûts de traitement de la turbidité dans l'eau potable n'ont pu être estimés à l'échelle de la Haute-Normandie du fait du manque de données disponibles ;
- D'autres types d'infrastructures non listés ici peuvent être endommagés par les coulées boueuses (routes communales, réseaux d'eaux pluviales, d'assainissement, de communication...);
- Le ruissellement et l'érosion peuvent générer d'autres impacts non pris en compte dans cette étude : envasement des cours d'eau, pertes de terres agricoles...

Pour combler ces manques, une bancarisation des données sur les dommages pourrait être mise en place par les gestionnaires d'infrastructures, au moins pour celles qui sont régulièrement touchées par les coulées boueuses (routes) et la turbidité (captages).

Les données économiques collectées dans le cadre de cet état des lieux serviront aussi à alimenter l'analyse coûts-bénéfices sur les inondations et coulées boueuses dans le bassin versant de la Lézarde (Volumes 2 et 3), et l'analyse économique de la turbidité au captage de Radicatel (Volume 4).

Volume 2 :

Modélisation des scénarios et cartographie des aléas inondations et coulées boueuses sur le bassin versant de la Lézarde

1 Introduction du volume 2

Le projet Evapore a pour objectif de réaliser une analyse technico-économique des actions menées depuis 2000 en Haute-Normandie afin de réduire les impacts du ruissellement et de l'érosion. Les principaux impacts sont les inondations et les coulées boueuses (traitées dans les Volumes 2 et 3), et la dégradation de la qualité de l'eau aux captages AEP par la turbidité (traitée dans le Volume 4).

La méthodologie utilisée est celle de l'analyse coût-bénéfice (ACB), qui nécessite en entrée des cartographies de l'aléa inondation et coulée boueuse. Cette méthode permet notamment de comparer différents scénarios d'aménagement, d'évolution de l'occupation du sol, et d'évolution climatique. Elle se base sur des outils de modélisation permettant de produire des cartes d'aléa pour les différents scénarios, et ce pour plusieurs événements climatiques.

Comme il n'est pas envisageable de modéliser tout le territoire de la Seine-Maritime et de l'Eure, nous avons fait le choix de nous concentrer sur un territoire déjà documenté et sensible aux inondations par ruissellement et coulées boueuses : le bassin versant de la Lézarde (Figure 36).

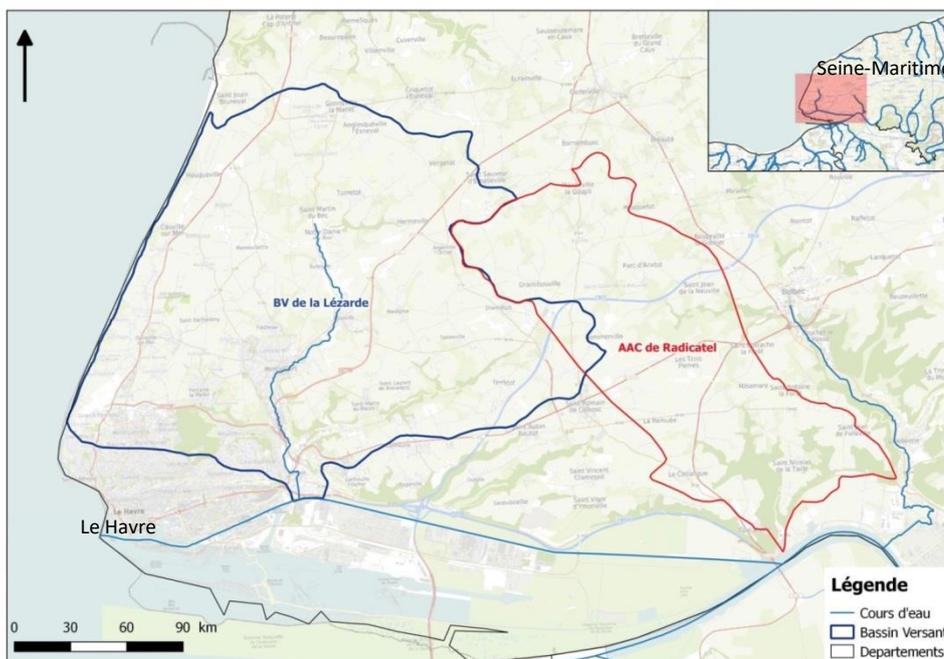


Figure 36 : Plan de situation du bassin versant de la Lézarde

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 :

- **Modélisation hydrologique / hydraulique** : aléa ruissellement dans les principaux talwegs secs et inondation de rivière (logiciel MIKE développé par DHI)
- **Modélisation des transferts hydro-sédimentaires** : aléa inondation par ruissellement et coulée de boue sur les versants et dans les talwegs (logiciel WaterSed développé par le BRGM)

Le périmètre d'application de chaque modèle est présenté sur la Figure 37 :

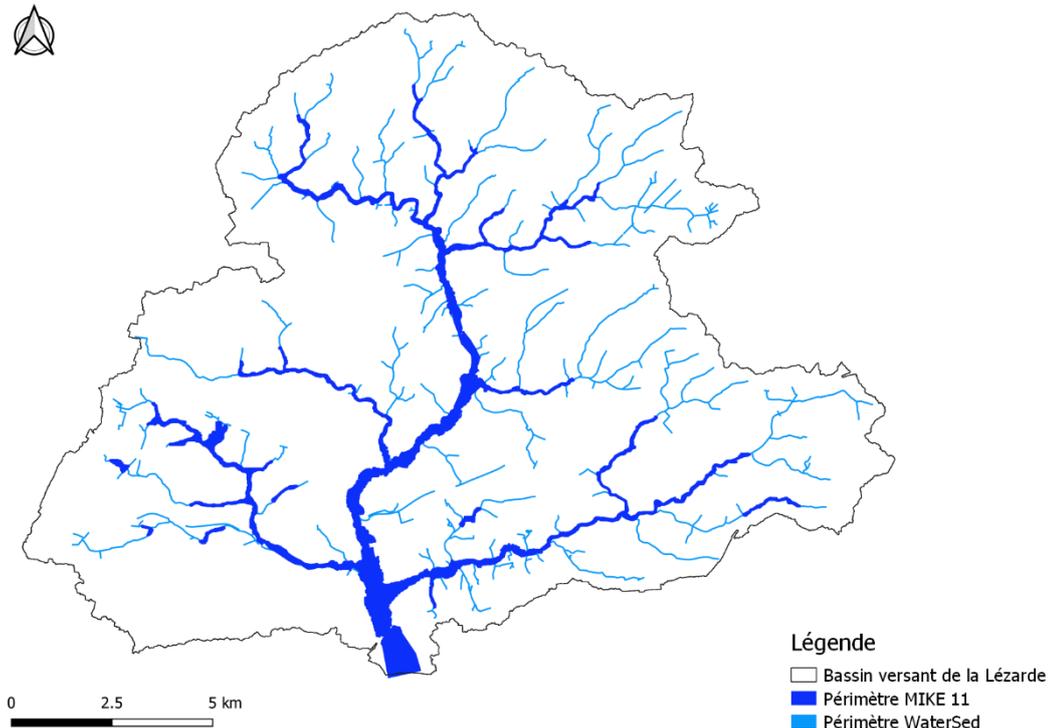


Figure 37 : Périmètre d'action du modèle MIKE et du modèle WaterSed sur le bassin versant de la Lézarde

Ces modélisations permettent de comparer plusieurs scénarios, afin d'évaluer l'effet des actions menées depuis 2000, dans le contexte actuel, et en tenant de l'évolution du climat et du territoire. L'objet de ce volume 2 est de définir les scénarios modélisés, décrire les 2 modèles utilisés et présenter leurs résultats en termes d'aléa. L'analyse coût bénéfices est développée dans le volume 3.

2 Définition des scénarios

Plusieurs types de scénarios sont présentés dans cette partie :

- **Scénarios de base** en situation actuelle avec / sans actions pour évaluer l'efficacité des actions (« ref0 », « ref1 » et « actu ») ;
- **Scenario d'aménagement ambitieux**, afin d'évaluer l'efficacité d'un programme d'aménagement d'hydraulique douce mené à terme (« amb ») ;
- **Scénarios prospectifs** avec actions : changement climatique, réduction des surfaces en herbe et amélioration des pratiques agricoles. L'objectif de ces scénarios complémentaires est d'évaluer l'efficacité des actions dans des contextes futurs possibles (« cc », « herb » et « agr »).

Le Tableau 17 indique les principales caractéristiques de ces scénarios :

Tableau 17 : Principales caractéristiques des scénarios modélisés sur le bassin versant de la Lézarde

Scenario	ref0	ref1	actu	amb	cc	herb	agr
Hydraulique structurante	0	Actuel 2018	Actuel 2018	Actuel 2018	Actuel 2018	Actuel 2018	Actuel 2018
Hydraulique douce	0	0	Actuel 2018	Ambitieux	Actuel 2018	Actuel 2018	Actuel 2018
Occupation du sol	2016	2016	2016	2016	2016	2050 -33% herbe	2050 50% pratiques agri adaptées
Climat	Actuel	Actuel	Actuel	Actuel	2050 3 hypoth.	Actuel	Actuel

2.1 Scénarios de base

Ces scénarios ont pour objectif d'évaluer l'efficacité des aménagements existants par comparaison d'un scénario avec aménagement et d'un scénario sans aménagement, toutes choses étant égales par ailleurs :

- Comparaison « ref1 » / « ref0 » : évaluation de l'efficacité des ouvrages structurants actuels en situation actuelle ;
- Comparaison « actu » / « ref1 » : évaluation de l'efficacité des aménagements d'hydraulique douce actuels en situation actuelle.

2.1.1 Ref0 : Scénario de référence sans aucun aménagement

Le scénario « ref0 » est le scénario de base sans aucun aménagement (ni ouvrages structurants, ni aménagements d'hydraulique douce), avec l'occupation du sol actuelle (2016).

2.1.2 Ref1 : Scénario de référence avec les ouvrages structurants actuels

Le scénario « ref1 » est le scénario de base avec les ouvrages structurants actuels, mais sans les aménagements d'hydraulique douce. L'occupation du sol est actuelle (2016).

2.1.3 Actu : Scénario de référence avec les ouvrages structurants et aménagements d'hydraulique douce actuels

Le scénario « actu » est le scénario de base avec les ouvrages structurants et les aménagements d'hydraulique douce actuels. L'occupation du sol est actuelle (2016).

2.2 Scénario d'aménagement ambitieux

Ce scénario vise à tester l'efficacité d'un programme d'aménagement d'hydraulique douce qui serait mené à terme. En effet, les programmes d'aménagement d'hydraulique douce en cours sont encore loin d'être réalisés entièrement, et nous ne disposons pas à ce jour d'évaluation de leur efficacité potentielle en termes technico-économiques. Sur le bassin versant de la Lézarde, le scénario d'aménagement ambitieux retenu est le programme d'aménagements d'hydraulique douce mis à jour en août 2019 par le SMBV Pointe de Caux Etretat (aujourd'hui intégré à la Communauté Urbaine Le Havre Seine Métropole). Ce programme prévoit la réalisation de 1 148 aménagements linéaires (dont 873 haies anti-érosives) et de 646 zones enherbées pour une surface de 182 ha. A titre de comparaison,

le scénario actuel (« actu ») comprend 104 aménagements d'hydraulique douce linéaires, soit un taux de réalisation actuel de moins de 10%.

2.3 Scénarios prospectifs à horizon 2050

Les scénarios prospectifs sont définis à un horizon 2050, car il est suffisamment éloigné pour impliquer des changements significatifs, et suffisamment proche pour être pris en compte dans les politiques d'aménagement. Ils ont été construits en concertation avec les financeurs du programme.

2.3.1 Elaboration du scénario CC : Modification des évènements extrêmes en lien avec le changement climatique à horizon 2050

La note de présentation complète de ce scénario, basé sur une analyse bibliographique menée par Edouard Patault de l'Université de Rouen, avec la participation de l'AREAS, est fournie en Annexe 2.1. Elle se base notamment sur les prévisions du GIEC/IPCC (2013), selon lesquelles la fréquence et l'intensité des phénomènes extrêmes vont probablement augmenter dans les régions des latitudes moyennes (Amérique du Nord et Europe). L'objectif de ce scénario est de tester l'effet d'une augmentation des évènements extrêmes en lien avec le changement climatique à l'horizon 2050, sur l'efficacité des aménagements existants aujourd'hui.

Synthèse bibliographique

Le recueil des résultats de projections climatiques ne permet pas d'avoir une réponse consensuelle en termes d'évolution des précipitations sur le territoire d'étude à l'horizon 2050. Cela s'explique d'une part par la différence des résultats entre les projections climatiques « anciennes » des GCM (modèles climatiques globaux) et des projections « récentes » des RCM (modèles climatiques régionaux). D'autre part, on observe parfois une non-convergence des résultats de modélisations qui induisent de fortes incertitudes. Les résultats issus des GCM semblent traduire une diminution des précipitations annuelles (~10% dont une augmentation en hiver et une baisse en été), alors que les résultats issus des RCM semblent plutôt converger vers une augmentation des précipitations annuelles (~5-10%). Les résultats des GCM et des RCM semblent converger vers un renforcement des précipitations extrêmes : plus marqué sur les épisodes très extrêmes et plus faible sur les épisodes modérés, et vers une diminution des périodes de retour ces épisodes. Mais les résultats des projections climatiques montrent de très fortes variabilités. Pour les débits, les résultats semblent converger vers une baisse des débits généralisée (accentuée en étiage), mais des évènements extrêmes plus prononcés. Une augmentation des débits des évènements les plus extrêmes et, par conséquent, une diminution des périodes de retour des évènements centennaux est attendue (~15-20% jusqu'à 40% pour les scénarios les plus extrêmes). Pour la paramétrisation du scénario « changement climatique » dans le cadre du projet EVAPORE il est indispensable de prendre en compte la forte incertitude liée aux projections climatiques et leur caractère, parfois, non-consensuel.

Scénario retenu

Malgré l'absence de consensus sur les projections d'évolution des pluies extrêmes avec le changement climatique, plusieurs résultats indiquent une diminution de la période de retour des évènements extrêmes en Normandie, en termes de précipitations mais aussi de débits de pointe de crue.

Pour ce scénario, trois configurations sont retenues, avec les paramétrages suivants :

1. **Hypothèse basse « ccb »** : pas d'évolution des évènements extrêmes, donc pas de modification des périodes de retour
2. **Hypothèse moyenne « ccm »** : basé sur le scénario « RCP 4.5 » du GIEC : diminution des périodes de retour des évènements modélisés (T10-> T9 ; T50 -> T45 ; T100 -> T80)
3. **Hypothèse forte « ccf »** : basé sur le scénario « RCP 8.5 » du GIEC : diminution plus forte des périodes de retour des évènements modélisés (T10-> T8 ; T50 -> T35 ; T100 -> T65)

La Figure 38 permet de visualiser ces projections avec l'exemple à la station de Rouen-Boos pour la série 1969-2007 hiver.

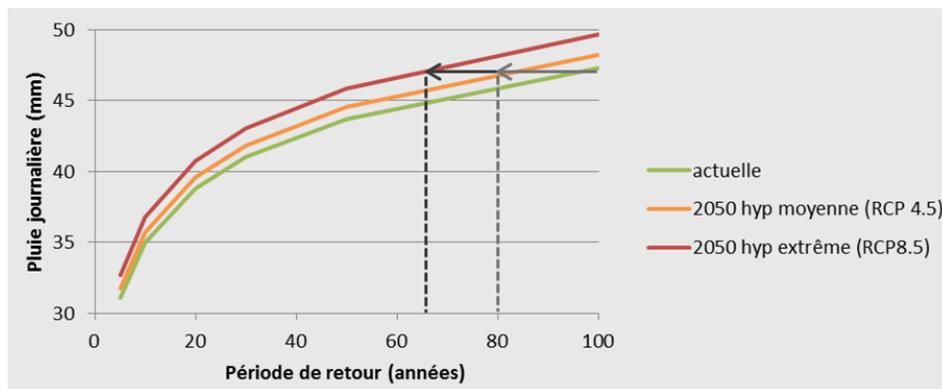


Figure 38 : Projection d'évolution des hauteurs de pluie journalières selon 2 hypothèses de changement climatique à horizon 2050 (exemple de la station Rouen-Boos pour la série 1969-2007 hiver).

Ces trois configurations présentent l'avantage de ne pas nécessiter de modélisations complémentaires, car basées sur des modifications des périodes de retour des évènements modélisés pour le scénario de base « ref0 ».

2.3.2 Elaboration du scénario HERB : réduction des surfaces en herbe à horizon 2050

La note de présentation complète de ce scénario proposé par l'AREAS est fournie en Annexe 2.2. L'objectif de ce scénario est de tester l'effet d'une poursuite de la réduction des surfaces en herbe au profit des cultures sur l'efficacité des aménagements existants aujourd'hui, à horizon 2050. Ce scénario exclut la réduction des surfaces en herbes liées à l'urbanisation : nous faisons l'hypothèse que celle-ci est systématiquement compensée. Pour ne pas alourdir le travail de modélisation, une seule hypothèse d'évolution des surfaces sera testée. Le travail d'élaboration de ce scénario consiste à choisir une hypothèse réaliste au vu des caractéristiques du territoire.

Croisement des pentes avec l'occupation du sol

Un travail de croisement cartographique à partir de la carte d'occupation du sol de la Lézarde (Oscorn 2016), et des données topographiques (RGE ALTI 5 m 2016), a permis de classer les grands types d'occupation du sol en fonction de la pente :

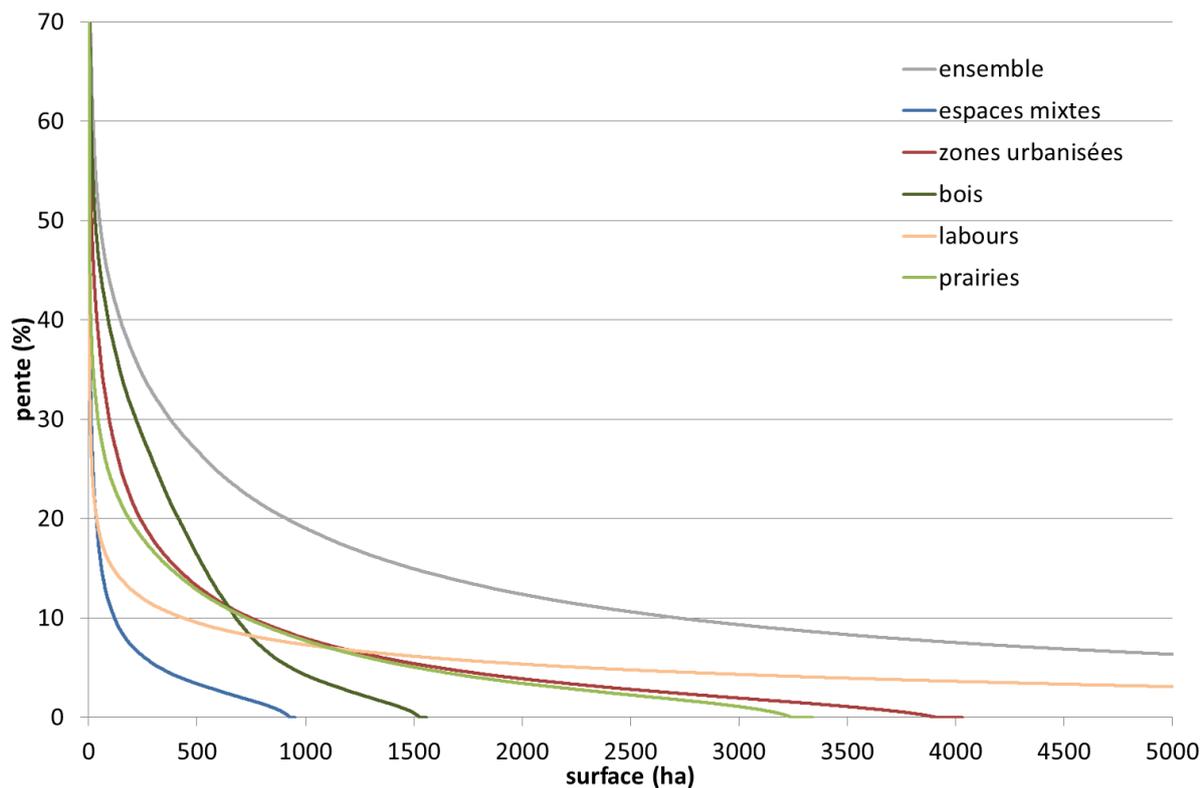


Figure 39 : Diagramme de pentes par occupation du sol sur le bassin versant de la Lézarde, pente décroissantes selon la surface cumulée ramenée à la surface totale de l'occupation du sol concernée.

La Figure 39 confirme les observations éparses dans le pays de Caux : sur le bassin versant de la Lézarde, 99,7 % des surfaces en cultures annuelles présentent une pente inférieure à 20 %. Cela signifie qu'il est presque impossible de cultiver une parcelle dont la pente est supérieure à 20%. Le croisement de la carte d'occupation du sol (Oscom 2016) avec la topographie montre que 95 % des prairies du bassin versant présentent des pentes inférieures à 20 %. **Le critère pente n'est donc pas suffisant pour élaborer un scénario d'évolution à horizon 2050.**

Méthode basée sur l'analyse des données historiques

La Figure 40 montre que la surface en herbe a diminué de moitié en 40 ans dans le pays de Caux (périmètre de la Petite Région Agricole). **Cette diminution est continue de 1970 à 2010, avec un rythme relativement constant.** Cette diminution des surfaces en herbe se poursuit actuellement. Nous nous sommes appuyés sur l'évolution passée pour construire le scénario d'évolution future à horizon 2050.

En nous basant sur les surfaces en herbe converties en cultures à l'échelle du pays de Caux sur la période 1970 – 2010 (données RGA – DRAAF), le scénario retenu est celui d'une réduction de près d'1/3 de la surface en herbe sur le bassin versant pilote de la Lézarde à horizon 2050.

Sont conservées les prairies protégées par le règlement du PPRi (zones roses) et celles destinées à être urbanisées (dans les documents d'urbanisme des communes de l'ex Codah), en se basant sur la couche d'occupation du sol « Oscom 2016 » et du RPG 2016. En dehors de ces zones, nous proposons de ne conserver les surfaces en herbe que là où les pentes sont les plus élevées, et donc où les contraintes de mise en culture sont les plus fortes. Cela correspondrait à un seuil de pente d'environ 2%, d'après la Figure 39.

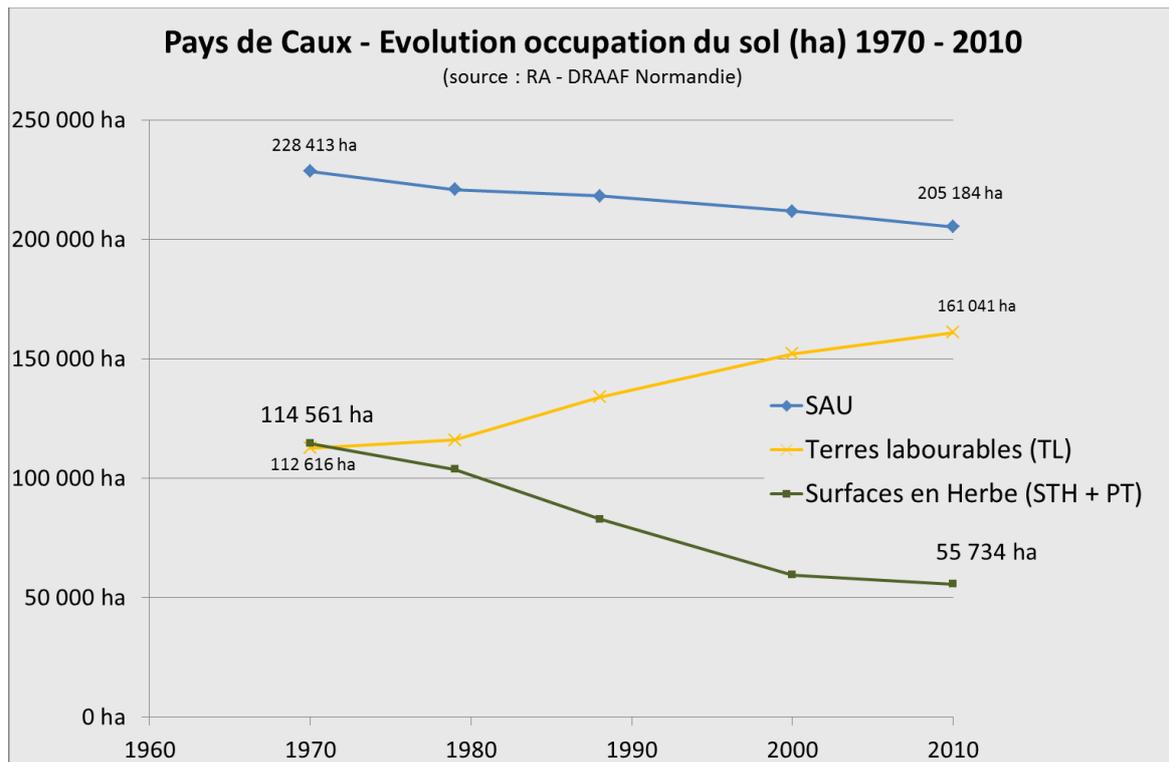


Figure 40 : Evolution de l'occupation du sol de 1970 à 2010 dans le Pays de Caux (source : RA-DRAAF Normandie)

Remarque : En 2010, la STH a été recalculée en tenant compte du changement de dénomination d'une partie des prairies permanentes en « prairies temporaires », en lien avec une modification du règlement de la PAC (Politique Agricole Commune).

2.3.3 Elaboration du scénario AGR : Adoption de pratiques agricoles limitant le ruissellement sur 50% des surfaces en culture à horizon 2050

L'objectif de ce scénario est de tester l'effet de l'adoption par les agriculteurs de pratiques limitant le ruissellement sur 50% des surfaces en culture, à horizon 2050.

La modification des pratiques agricoles est un des leviers d'action, que la collectivité peut encourager notamment par un travail d'animation, afin de réduire le ruissellement à la source. Pour ne pas alourdir le travail de modélisation, une seule hypothèse sera testée. Le travail d'élaboration de ce scénario consiste à choisir une hypothèse réaliste au vu des caractéristiques du territoire. Les deux modèles utilisés (MIKE et WaterSed) ne représentent pas l'infiltration et le ruissellement de la même façon. Les paramètres utilisés pour ce scénario par chacun des deux modèles sont différents, mais l'objectif reste le même.

3 Cartographie de l'aléa inondation par ruissellement et débordement de rivière (BV Lézarde)

La Lézarde a fait l'objet d'une étude hydrologique et hydraulique en 2006, portée par DHI. Cette étude comprenait une modélisation hydraulique de la Lézarde et de certains de ses affluents (la Rouelle, le Saint-Laurent, la Curande). Cette nouvelle étude a pour but d'intégrer les thalwegs secs et d'avoir une étude hydrologique plus détaillée sur l'ensemble du territoire. Cette modélisation, réalisée par DHI, couvrira différents scénarios permettant d'apprécier l'impact des 53 ouvrages dont la capacité de rétention est supérieure à 5 000 m³, en situation actuelle et en situation future selon des scénarios

de changement d'occupation du sol ou de changement climatique. Les variantes des scénarios sont étudiées à partir de trois pluies de projet, basées sur l'événement historique de 2003.

3.1 Modèle existant

Le périmètre d'étude couvre tout le bassin versant de la Lézarde qui fait l'objet d'un découpage en neuf bassins versants, divisés eux même en sous bassins versants (Figure 41). La surface totale du bassin versant est de 206 km². A chaque bassin versant correspond un modèle hydraulique 1D dont les débits de sortie sont injectés en entrée du modèle existant. Ce modèle existant, appelé aussi modèle global, issu de l'étude de 2006 et réalisé sous MIKE, a été adapté pour prendre en donnée d'entrée les résultats des modèles hydrauliques des sous bassins versants.

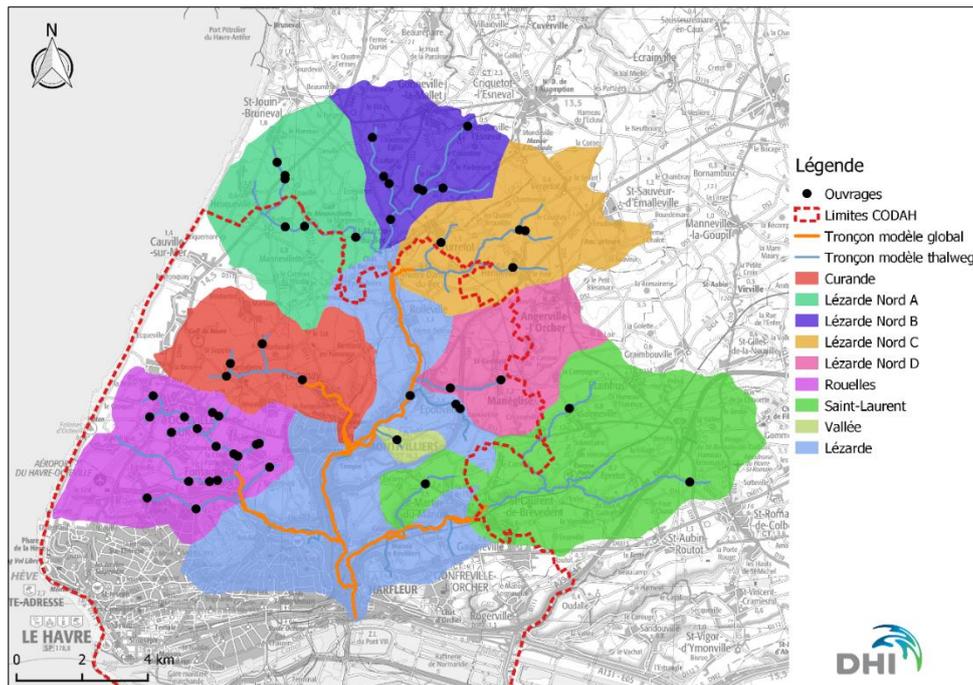


Figure 41 : Découpage du bassin versant de la Lézarde en neuf bassins versants.

3.2 Modèle hydrologique-hydraulique de versants

3.2.1 Données pluviométriques

Les données pluviométriques disponibles sont celles de la station du Cap de la Hève et celle de Goderville. La localisation des stations est présentée dans la Figure 42.

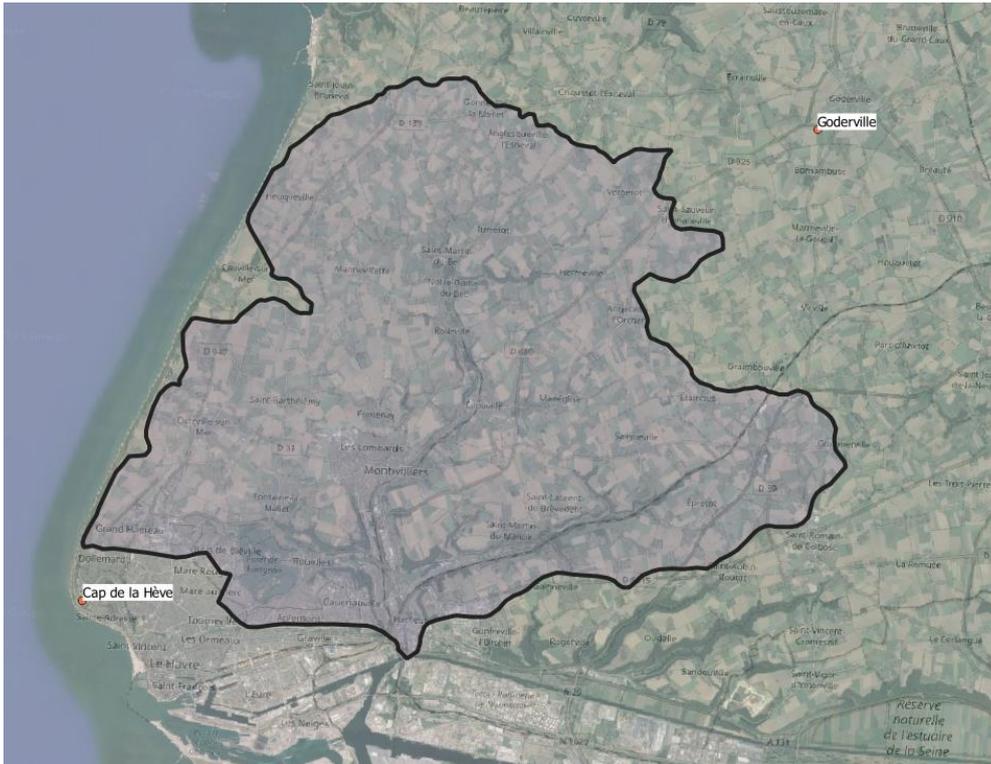


Figure 42 : Localisation des stations pluviométriques. En noir, les limites du bassin versant de la Lézarde.

La station du Cap de la Hève a été choisie pour la suite de l'étude. Ne disposant pas de données couvrant l'ensemble du territoire, la pluie de la station du Cap de la Hève est considérée homogène sur l'ensemble des bassins versants dans un premier temps. Il faut cependant noter que l'événement de 2003 étant un orage, la pluie est fortement spatialisée.

3.2.2 Evènement historique de référence

En juin 2003, un orage provoque deux épisodes successifs (Figure 43) :

- Le 01/06/2003 à 5 h, un épisode d'une durée de cinq heures et d'un cumul de 52,0 mm ;
- Le 01/06/2003 à 15 h, un épisode d'une durée d'une heure avec un cumul de 35,0 mm.

Au total, le cumul est de 87,0 mm sur une durée de 10 h.

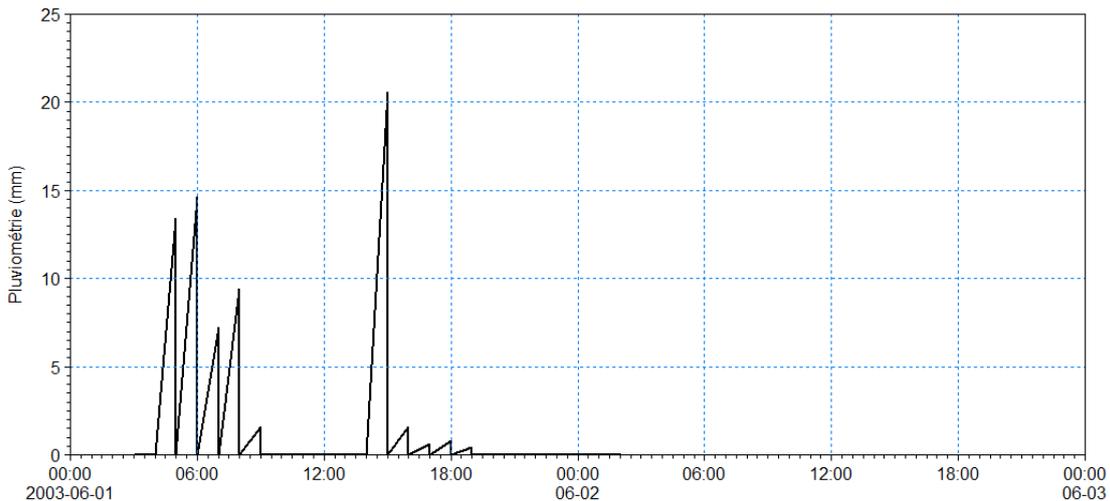


Figure 43 : Pluviométrie mesurée à la station du Cap de la Hève pour l'évènement de 2003.

Il en résulte un débit mesuré à la station de Montivilliers atteignant $12,90 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figure 44). Le temps de réponse du bassin versant est relativement rapide (moins de 3 h). Cet événement peut être considéré comme événement centennal dont le volume ruisselé mesuré au cours de l'évènement a été de $880\,000 \text{ m}^3$.

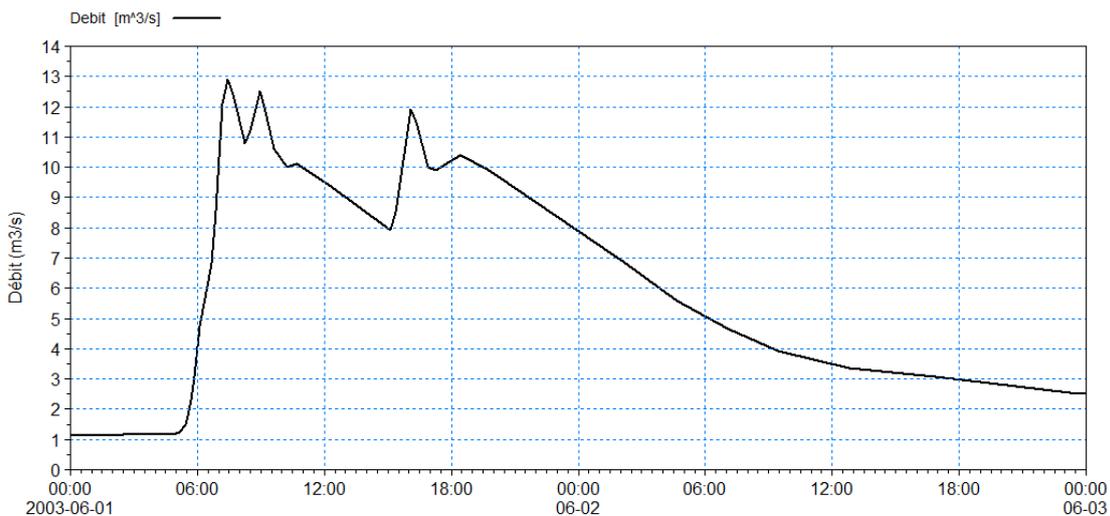


Figure 44 : Débit mesuré à la station de Montivilliers pour l'évènement de 2003

D'après Emmanuel Hauchard de la Communauté Urbaine Le Havre Seine Métropole :

- Le débit de pointe mesuré le 1^{er} juin 2003 à la station de Montivilliers ($13 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une surface de BV de 110 km^2) serait sous-estimé car une partie du débit est en réalité passée par la voie ferrée. Le débit réel est certainement très supérieur au débit mesuré. A titre indicatif, le pont situé à l'exutoire au niveau d'Harfleur (surface de BV de 210 km^2), dont la capacité est estimée à $40 \text{ m}^3/\text{s}$, était pratiquement en charge.
- La pluviométrie mesurée par Météo France le 01/06/2003 aux stations du Cap de la Hève ($90 \text{ mm}/24 \text{ h}$) et d'Octeville ($71 \text{ mm}/24 \text{ h}$) situées sur la côte est également inférieure aux relevés réalisés par des particuliers sur le bassin versant de la Lézarde, indiquant un cumul de pluie plus proche de 120 mm sur 24 h .

- La période de retour de l'évènement du 1^{er} juin 2003 serait donc en réalité supérieure à 100 ans.

Malgré ces remarques, les modèles d'inondation par ruissellement et débordement de rivière développés dans le cadre du programme Evapore ont été calés sur le débit mesuré à la station de Montivilliers pour l'évènement du 1^{er} juin 2003, considéré comme centennal. Les données pluviométriques utilisées en entrée du modèle sont celles de Météo France, en tenant compte de la répartition spatiale de la pluie grâce aux lames d'eau radar. Il est possible effectivement que les données de mesure utilisées soient sous-estimées, comme c'est souvent le cas lors d'épisodes extrêmes, mais ce sont les seules données dont nous disposons. En l'occurrence, les erreurs sur les valeurs de pluie, de débit et de période de retour vont toutes dans le même sens. Enfin, l'objet du programme Evapore est avant tout de comparer plusieurs scénarios sur une même base.

3.2.3 Définition des pluies de projet

Trois pluies de projet sont considérées dans cette étude, la décennale, la cinquantennale et la centennale (Tableau 18). Les pluies de projet sont construites à partir de l'évènement de 2003 : un coefficient est appliqué aux valeurs de hauteur mesurées pour avoir un cumul correspondant à la période de retour choisie, sur la durée de 10 h. Les courbes Hauteur-Durée-Fréquence (HDF) de Météo France présentent le cumul statistique par période de retour (ou fréquence) et par durée (Figure 45) :

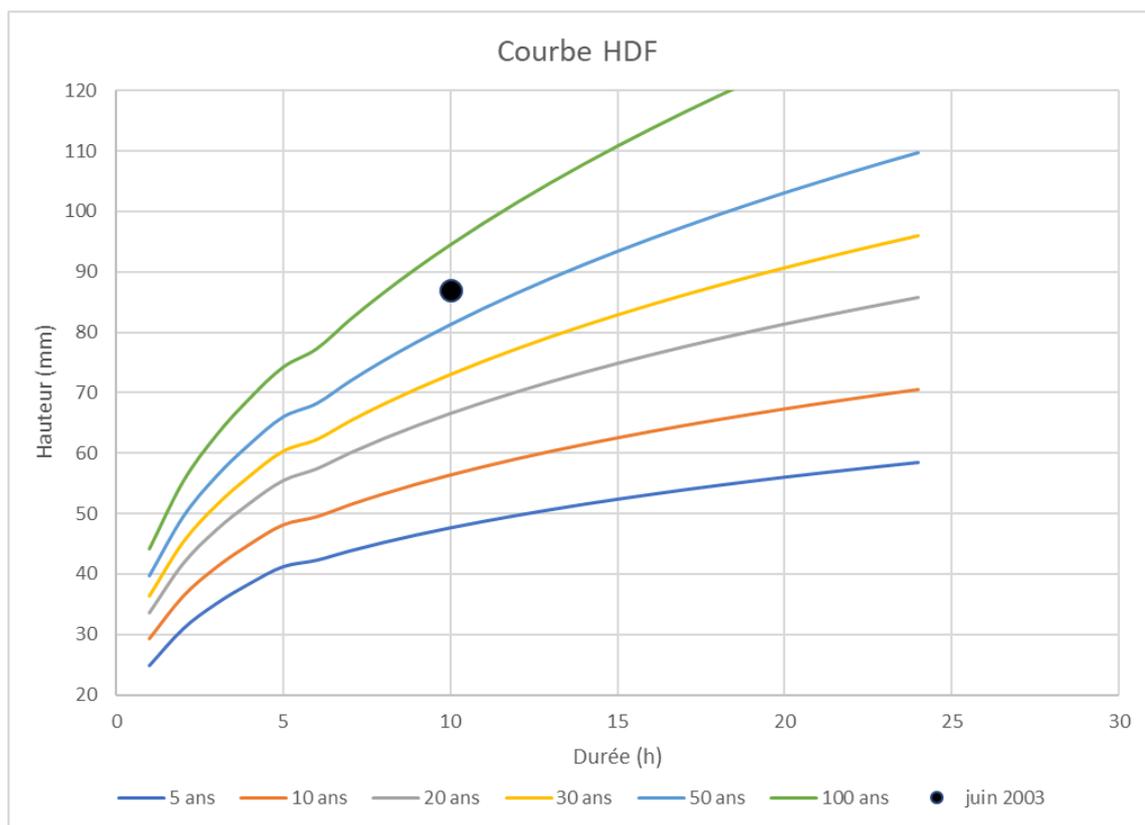


Figure 45 : Courbes HDF sur la période 1996-2006 à la station Cap de la Hève. Source : Météo France

L'évènement de juin 2003 est pris comme évènement de référence pour l'évènement centennale. Les ratios de cumul statistique fournis par Météo France permettent d'ajuster les cumuls des pluies de projet.

Tableau 18 : Cumul des pluies de projet.

Période de retour	Cumul statistique	Ratio par rapport à T100	Cumul choisi
T10	56,4 mm	0,60	51,9 mm
T50	81,2 mm	0,86	74,8 mm
T100	94,5 mm	1,00	87,0 mm

Ainsi, les pluies de projet ont la forme suivante (Figure 46) :

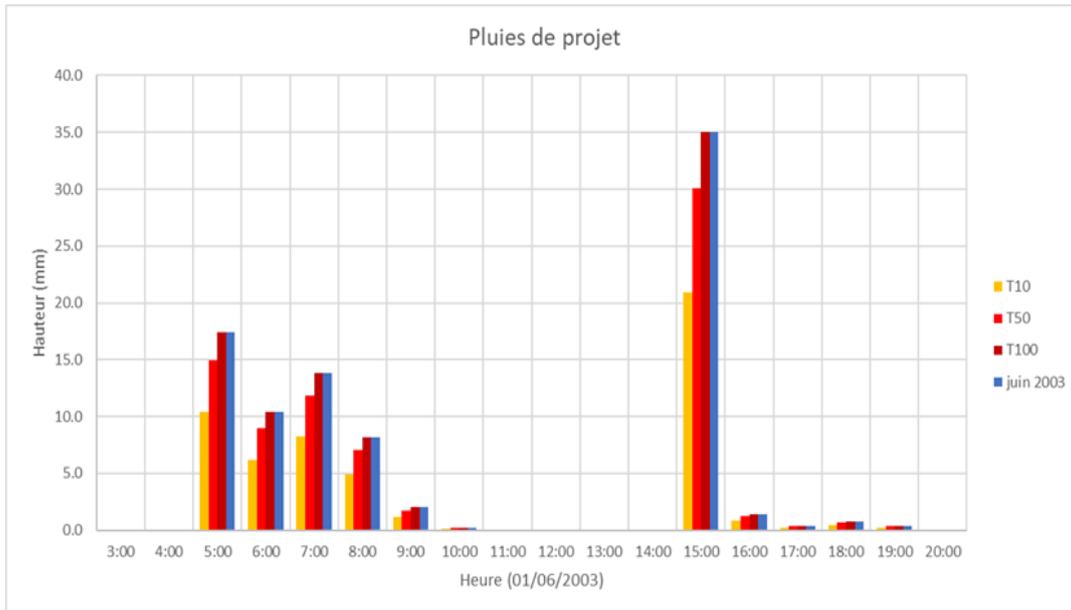


Figure 46 : Hyétoqrammes des pluies de projet et de la pluie de juin 2003.

3.2.4 Abattement de la pluie

L'abattement de la pluie est pris en compte dans le modèle global, qui comprend tous les bassins versants et le fonctionnement hydraulique de la Lézarde. Cet abattement a fait l'objet de scénarios d'ajustements et a été calibré en fonction des débits connus sur la Lézarde. Un coefficient d'abattement spécifique à chaque bassin versant est appliqué à chaque valeur de pluie par unité de temps sur la pluie d'entrée.

3.2.5 Le modèle pluie-débit

Chaque bassin versant est découpé en sous bassins versants en fonction de la topographie et de l'emplacement des ouvrages. La méthode pluie-débit utilisée sur chacun de ces sous bassins versants est la méthode **Unit Hydrograph Method** (UHM) développé par le Soil Conservation Service (SCS). Le modèle Unit Hydrograph Model (UHM) est adapté quand le mécanisme de production du ruissellement est de type hortonien sur la grande majorité du bassin versant et où les mécanismes de ruissellement par saturation des bas-fonds n'existent pas. La capacité d'infiltration des formations superficielles détermine les volumes ruisselés comme le représente la Figure 47 ci-dessous :

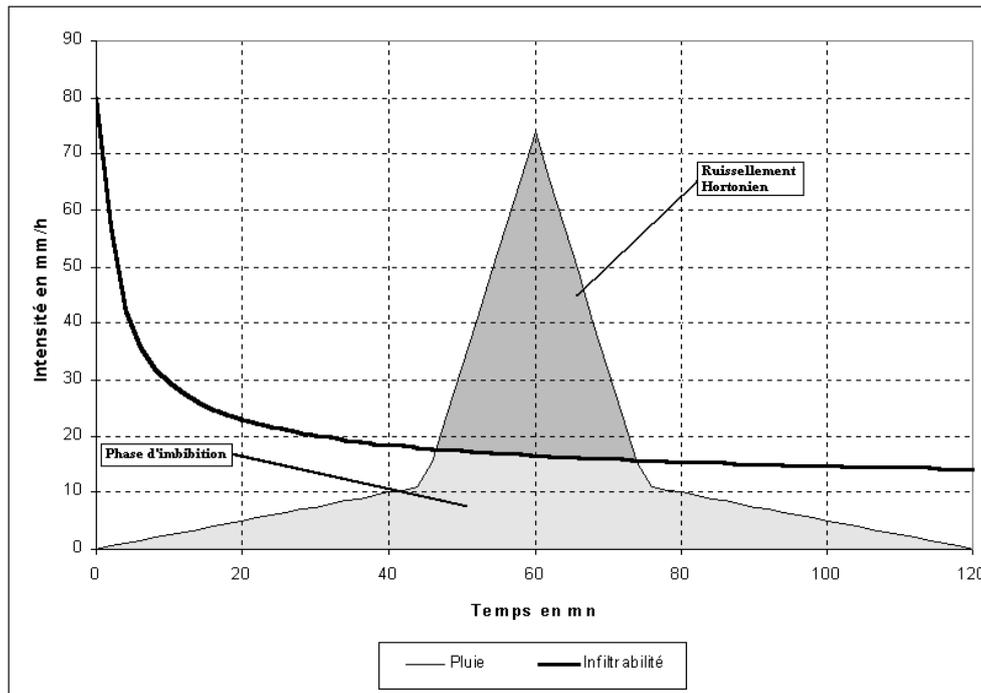


Figure 47 : Description du mécanisme de production de ruissellement.

La méthode UHM faisant intervenir un *Curve Number* a été élaborée par le SCS (Soil Conservation Service). La lame d'eau ruisselée totale sur le bassin versant est donnée par la formule suivante (Eq. 5) :

$$LR = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)} \quad \text{Eq. (5)}$$

Où LR est la lame d'eau ruisselée en mm ; P est la pluie totale en mm ; et S la détention superficielle en mm. S est donné par la relation suivante (Eq. 6) :

$$S = \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \times 25,4 \quad \text{Eq. (6)}$$

Avec CN le Curve Number qui est un nombre compris entre 0 et 100 déterminé à partir de l'occupation du sol, des antécédents hydrologiques et la texture des sols. Le hétérogramme de pluie efficace est déterminé à partir des pertes initiales et des pertes distribuées selon le principe schématisé ci-dessous dans la Figure 48 :

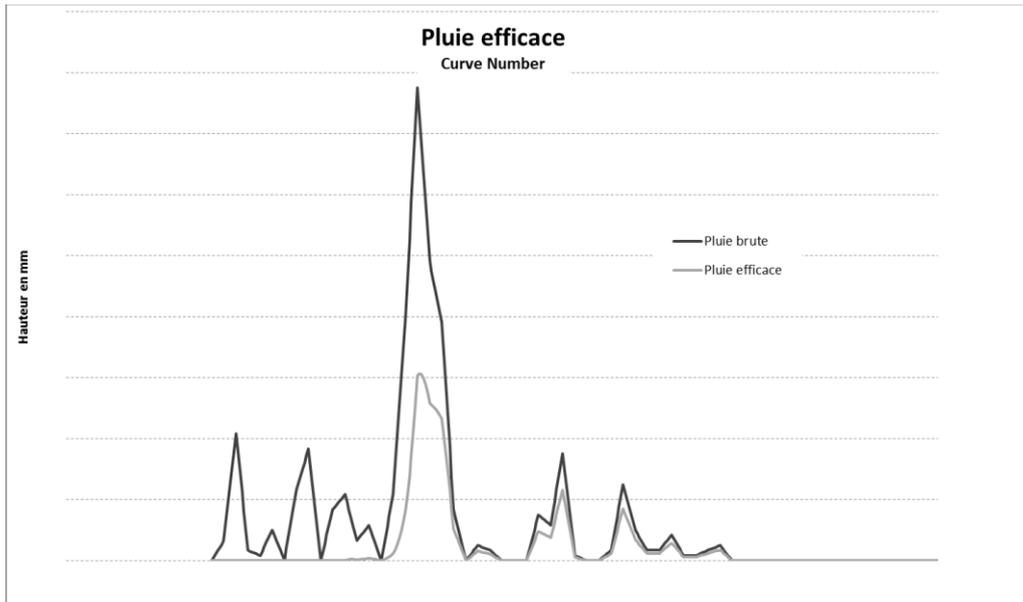


Figure 48 : Mécanisme de pluie brute et pluie efficace.

Le routage de l'hydrogramme dans le bassin versant est assuré par la formulation du double réservoir linéaire (Figure 49). La mise en œuvre de ce modèle consiste à calculer un débit intermédiaire et ceci à partir de la pluie nette. Ce débit donnera naissance au débit ruisselé à l'exutoire du bassin :

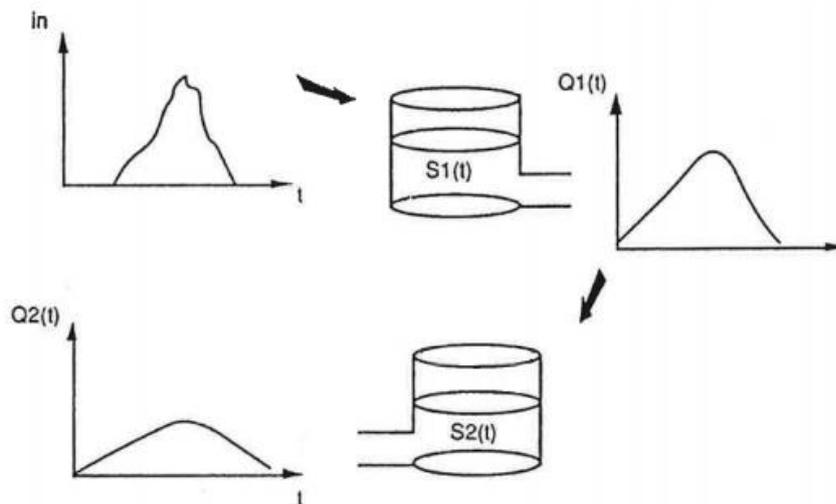


Figure 49 : Illustration de la méthode du double réservoir linéaire (extrait du document : « adaptation de MOUSE à l'hydrologie française », avril 1992).

Les paramètres de routage sont déterminés à partir des temps de concentration des différents bassins versant. Le SCS a établi une méthode de calcul du temps de concentration selon l'équation 7 :

$$Tc = 0,023 \times L^{0,8} \times \frac{(S + 1)^{0,7}}{\sqrt{I}} \quad \text{Eq. (7)}$$

Où Tc est le temps de concentration en heure, L est le plus long chemin hydraulique en mètre, I est la pente du bassin versant en %, et S est la détention superficielle en mm.

Le temps de concentration est un paramètre qui permet de rendre compte de la dynamique de production du ruissellement du bassin versant. Il représente le temps que met une goutte d'eau pour parcourir le plus long chemin hydraulique. Ce temps est calculé par la méthode SCS avec comme données d'entrée la longueur du plus long chemin hydraulique et la pente correspondante. Les valeurs de *Curve Number* (CN) ont été fournies par l'AREAS (Tableau 19) à partir des observations sur le Pays de Caux.

Tableau 19 : Valeurs du Curve Number pour chaque type d'occupation du sol sur le périmètre d'étude.

Type de sol	CN
Bois	43
Prairies	50
Cultures	68
Zones urbanisées	87
Plans d'eau	100

Les valeurs de CN peuvent différer selon le moment de l'année, notamment pour les cultures. Les valeurs utilisées correspondent à des valeurs estivales, l'événement de référence s'étant déroulé en juin. Le CN d'un bassin versant est alors obtenu par moyenne pondérée par la proportion de chaque occupation du sol. Les données d'occupation du sol proviennent de l'Observatoire des Sols à l'échelle Communale (OSCOM) et datent de 2016 (Figure 50).

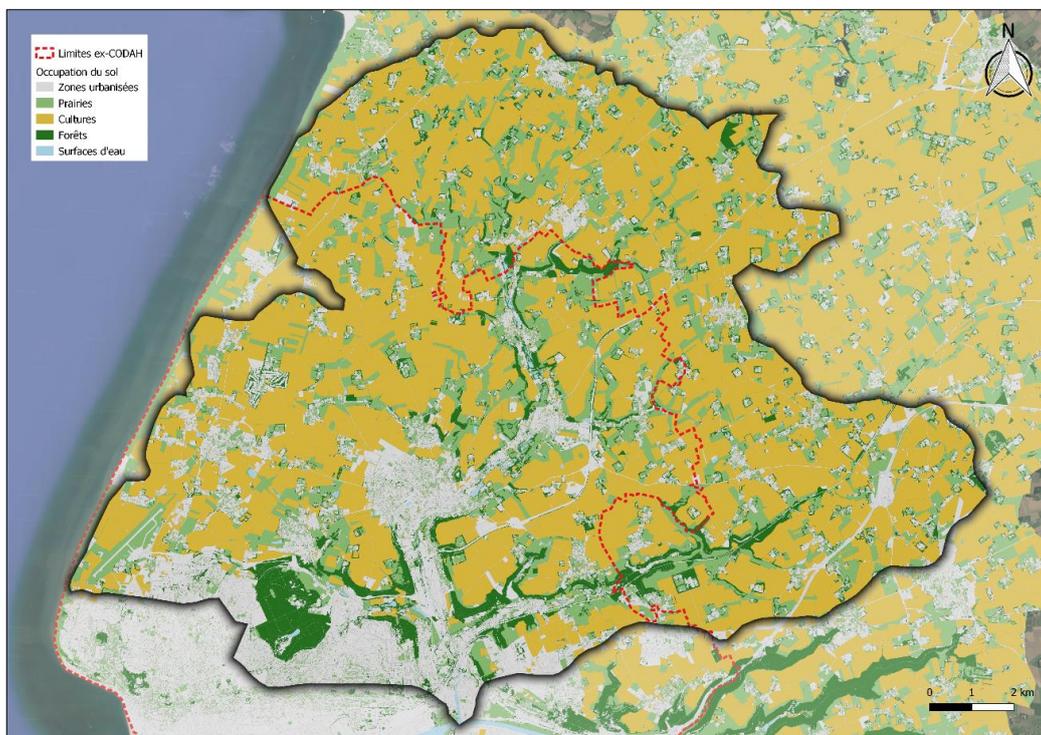


Figure 50 : Occupation du sol sur le bassin versant de la Lézarde.

3.2.6 Décomposition en sous-bassins versants

La localisation, la surface, la proportion de chaque type d'occupation du sol, la valeur du *Curve Number* et les ouvrages de rétention structurants en situation actuelle pour chaque sous chaque bassin versant sont présentés dans le Tableau 20 et la Figure 51. Le détail par bassin versant élémentaire est fourni en annexe 2.3.

Tableau 20 : Caractéristiques des sous bassins versants pris en compte dans la modélisation (situation actuelle).

Nom BV	code	Surface ha	Bois	Surfaces en herbe*	Cultures	Urbain	Plan d'eau	CN moyen	Ouvrages de rétention > 5 000m ³		
									Nb	Vol m ³	Vol m ³ /ha
Coupeauville	CPV	386	4%	19%	51%	25%	1%	69	3	62 936	163
Curande	CUR	1 893	5%	16%	64%	15%	0%	67	6	89 813	47
Lezarde	LEZ	3 977	13%	17%	29%	40%	1%	70	0	0	0
Lezarde Nord A	LNA	2 280	4%	21%	65%	11%	0%	65	6	169 450	74
Lezarde Nord B	LNB	1 572	5%	22%	62%	11%	0%	65	8	111 800	71
Lezarde Nord C	LNC	2 318	7%	20%	62%	11%	0%	65	4	44 000	19
Lezarde Nord D	LND	1 540	4%	18%	49%	29%	0%	69	2	23 682	15
Rouelles	ROU	2 435	6%	19%	41%	33%	1%	70	19	394 859	162
Saint-Laurent	STL	4 068	9%	18%	55%	18%	0%	66	4	49 640	12
Vallée	VAL	151	5%	14%	66%	14%	0%	67	1	5 620	37
Total		20 620	7%	19%	51%	23%	1%	67	53	951 800	46

* les surfaces en prairies et en espaces verts non agricoles (Oscorn 2016) ont été regroupées dans le modèle MIKE (même Curve Number)

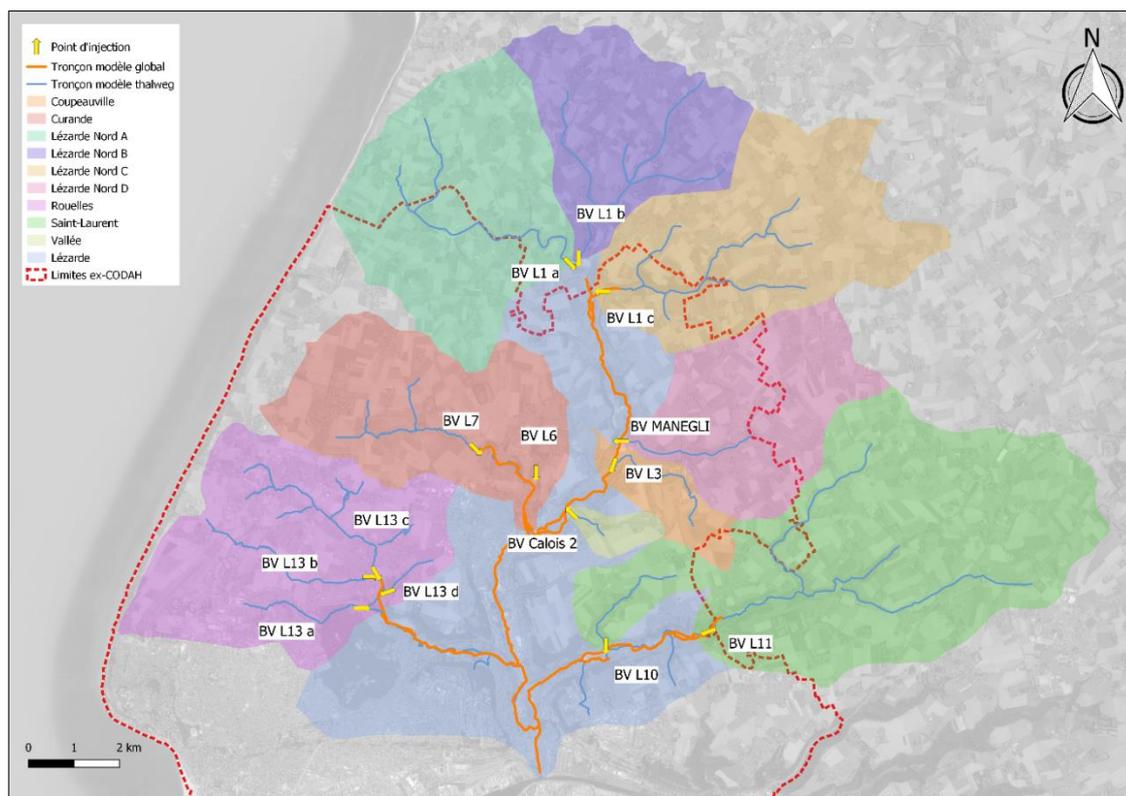


Figure 51 : Décomposition en sous bassins versants et points d'injection des débits issus des modèles de talweg dans le modèle global.

3.2.7 Le modèle hydraulique (talwegs secs)

Choix de modèle

Un modèle 1D est réalisé pour la modélisation des ouvrages. Des nœuds de calcul sont disposés le long du tronçon et permettront d'obtenir les débits maximums pour les différents scénarios. Pour réaliser la cartographie, le modèle 2D pur est préféré au modèle 1D car il permet de mieux rendre compte des écoulements en surface et donc de restituer une cartographie plus claire, là où sont les limites du modèle 1D. Cependant, le modèle 2D étant plus gourmand en temps de calcul, une attention particulière est portée sur le choix de la résolution spatiale.

Topographie

Le tronçon 1D est tracé et parsemé de profils en travers (nœuds de calculs) grâce au relevé altimétrique RGE de résolution de cinq mètres (IGN). La surface d'étude 2D est concentrée autour de ce même linéaire. Elle est basée sur le relevé RGE pour assurer une cohérence entre les deux modèles, et garde la résolution de cinq mètres, suffisante pour rendre compte de la tendance des écoulements et d'observer des zones inondables tout en gardant des temps de calculs raisonnables.

Ouvrages hydrauliques

Le fonctionnement de chaque ouvrage est intégré dans la modélisation 1D par :

- Un orifice de fuite ;
- Un seuil représentant la surverse et la crête ;
- Des profils en travers pour la géométrie du bassin.

Les débits sortants des ouvrages, en s'assurant qu'ils retiennent le bon volume, sont injectés ensuite dans le modèle 2D. Seuls les ouvrages de plus de 5 000 m³ sont pris en compte afin de simplifier la construction du modèle, tout en conservant une bonne représentativité. Le modèle intègre donc 53 ouvrages (sur environ 200 ouvrages recensés), pouvant stocker 950 000 m³ soit environ 75% du volume total (source www.bdcastor.fr). Le détail des caractéristiques des ouvrages est fourni en Annexe 2.4

3.3 Modèle hydraulique de rivière

Le bassin versant « Lézarde » est le reste du bassin global qui n'est pas modélisé dans les talwegs. Le découpage en sous bassins versants est issu de l'étude de 2006 (Figure 52).

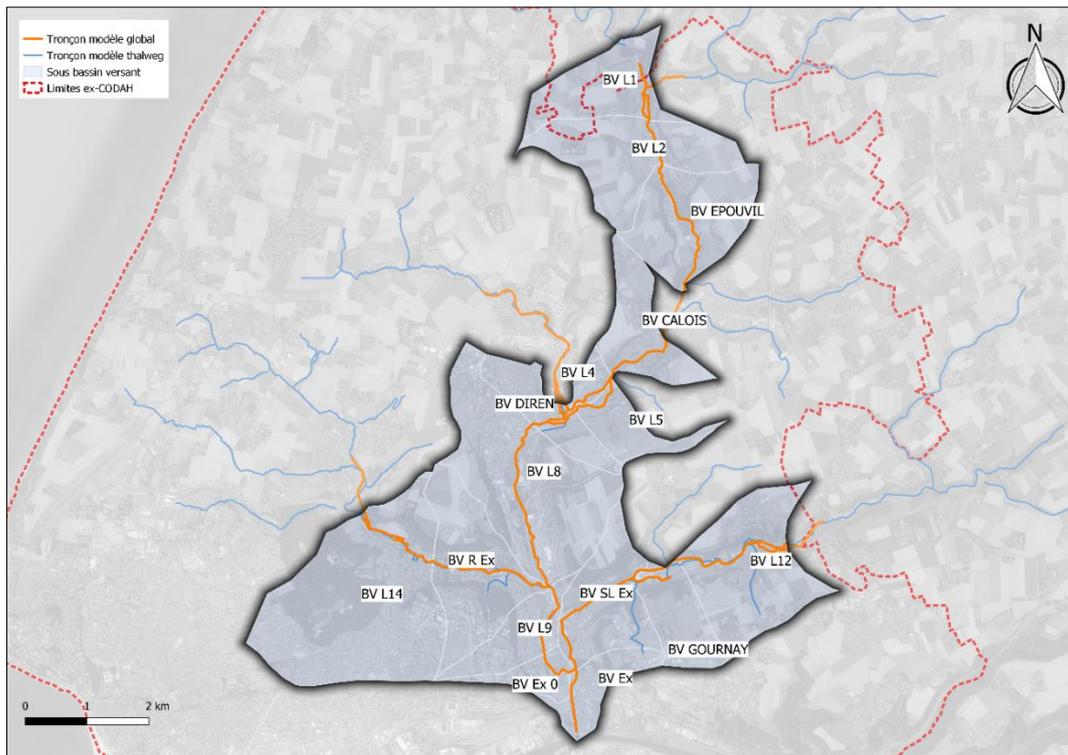


Figure 52 : Découpage en sous bassins versants du modèle hydraulique de rivière (DHI 2006)

A chaque sous bassin versant est associé une valeur de *Curve Number* et de temps de concentration. Leurs caractéristiques sont présentées en Annexe 2.3. Le modèle prend également les débits issus des modélisations hydrologiques en talwegs secs en donnée d'entrée. Ces points d'injection ont été nommés et associés à chaque bassin de thalweg et sont présentés sur la Figure 51.

3.4 Couplage et calage des modèles

3.4.1 Paramétrage du modèle hydrologique-hydraulique de versants

Aucune donnée de mesure n'existe à l'échelle du versant sur le BV de la Lézarde pour la crue de 2003. Les *Curve Numbers* ont donc été définis à partir des données de mesure de l'AREAS sur le bassin versant de Bourville (environ 1 000 ha) en Seine-Maritime.

Une modélisation hydrologique-hydraulique a d'abord été réalisée sur le bassin versant « Lézarde Nord D » (1 500 ha). Ce bassin versant alimente la Lézarde et deux ouvrages à plus de 5 000 m³ y sont présents. Cette modélisation a notamment permis de choisir la méthode de calcul du temps de concentration.

3.4.2 Couplage des modèles de versants et du modèle de rivière

Les résultats des simulations avec le modèle de versants fournissent les débits injectés dans le modèle rivière (modèle « Lézarde ») existant (Figure 53). Ce sont des débits max, ils ne sont pas forcément atteints au même moment.

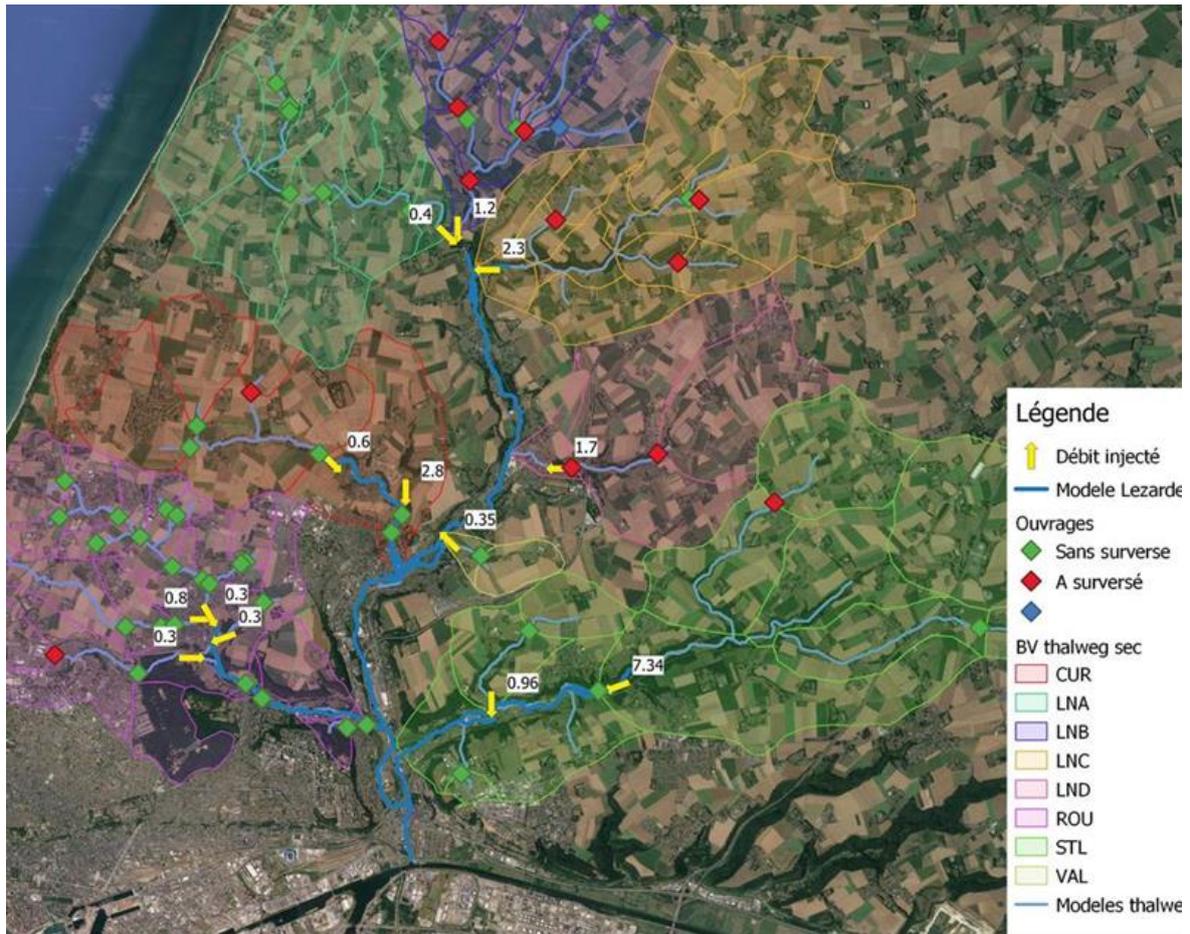


Figure 53 : Exemple de débits max injectés : scénario ref1 (état actuel avec ouvrages), période de retour T10 ans, avant abattement de la pluie (Mike)

3.4.3 Calage du modèle global

Le modèle global doit prendre en compte la spatialisation de la pluie. Cette spatialisation se fait grâce à un coefficient d'abattement sur la pluie d'entrée dans les modèles des talwegs secs. Ces coefficients sont déterminés pour chaque sous bassin versant :

- Dans un premier temps avec une connaissance sur la répartition des cumuls de pluie en été (de mars à septembre) donnant ainsi un coefficient à appliquer aux valeurs de la station pluviométrique ;
- Dans un second temps par ajustement avec deuxième et unique coefficient appliqué à tous les sous bassins pour ajuster le débit à la station de Montivilliers aux quantiles de crue statistique.

Cette répartition est présentée sur la Figure 54:

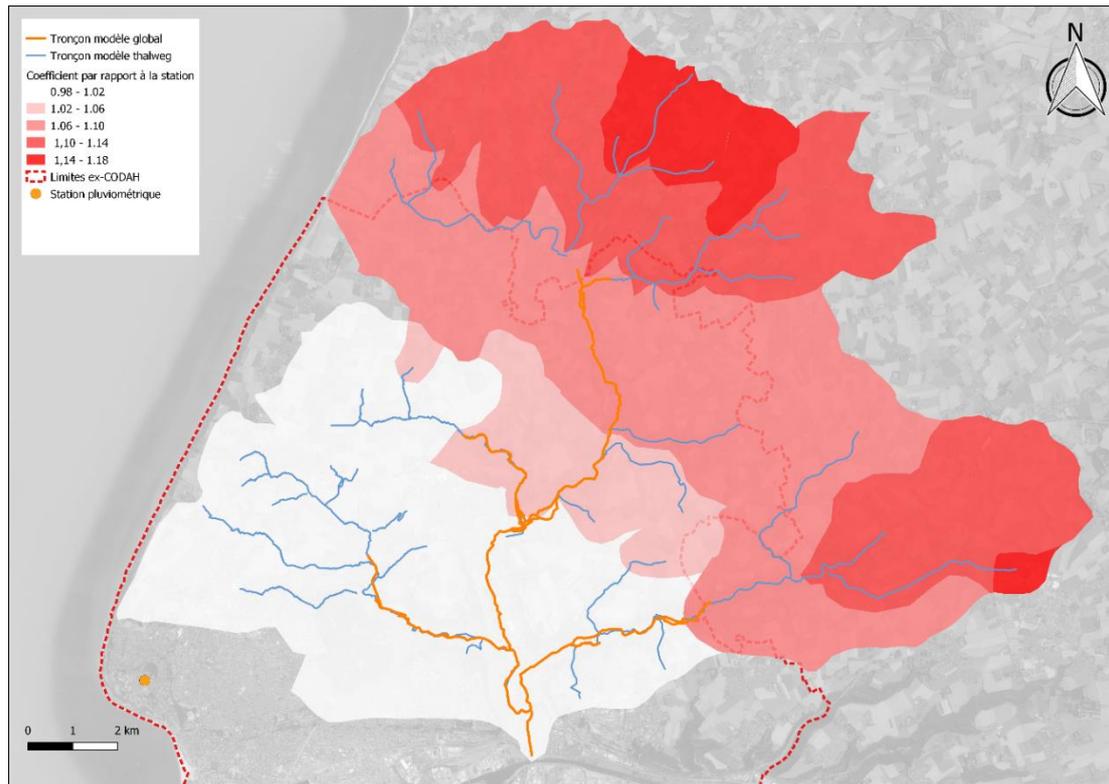


Figure 54 : Répartition de la pluie par rapport à la station du Cap-de-la-Hève

Les débits à Montivilliers sont présentés dans le Tableau 21. Ces débits proviennent de la banque Hydro utilisant la loi de Gumbel sauf pour la Q_{100} qui est la crue de référence.

Tableau 21 : Débits observés à Montivilliers (source : Banque Hydro).

Période de retour	10 ans	50 ans	100 ans
Débit de pointe (m ³ /s)	6,3	8,2	12,9

Les débits atteints grâce à la simulation sont les suivants (Tableau 22) :

Tableau 22 : Débits obtenus par simulation avec le modèle Mike.

Période de retour	10 ans	50 ans	100 ans
Débit de pointe (m ³ /s)	5,9	7,7	12,9

Remarque : le modèle utilisé ici ne permet pas de représenter les pertes par infiltration des eaux de ruissellement dans les vallées sèches et le karst. C'est une limite des modèles semi-distribués dans le contexte haut-normand.

3.5 Paramétrisation des scénarios

La modélisation a pour but de servir cinq scénarios avec chacun trois pluies de projet différentes (T10, T50 et T100). Les scénarios ont des paramètres d'aménagements (ouvrages de capacité supérieure à 5 000 m³), de climat et d'occupation du sol différents et sont rappelés dans le Tableau 23 :

Tableau 23 : Scénarios testés dans le cadre de la modélisation de l'aléa inondation par ruissellement et débordement de rivière sur le bassin versant de la Lézarde.

Scénario	ref0 (1)	ref1 (2)	Cc (3)	Herb (4)	Agr (5)
Hydraulique structurante	0	Actuel 2018	Actuel 2018	Actuel 2018	Actuel 2018
Climat	Actuel	Actuel	2050 3 hypoth.	Actuel	Actuel
Occupation du sol	2016	2016	2016	2050 -33% herbe	2050 50% pratiques agri adaptées

La comparaison des scénarios ref1/ref0 a pour objectif d'évaluer l'efficacité des ouvrages structurants en situation actuelle. La comparaison des scénarios prospectifs : cc, herb et agr / ref1 a pour objectif d'évaluer l'efficacité des ouvrages structurants pour différentes évolution possibles du territoire et du climat. A noter que le scénario de changement climatique (« cc ») n'a pas nécessité de nouvelle modélisation car ce scénario est basé sur une modification des périodes de retour du scénario de base ref1.

3.5.1 Scénario ref0 (1)

Le scénario de base ref0 est la modélisation de la Lézarde et de son bassin versant sans aucun ouvrage. Elle comprend :

- La modélisation d'aucun ouvrage sur les talwegs et la modélisation complète de la Lézarde issue de l'étude de 2006.
- La transformation pluie-débit à partir des pluies de projet construites à partir de l'événement de 2003 ;
- L'occupation du sol actuelle basée sur les données OSCOM de 2016.

3.5.2 Scénario ref1 (2)

Le scénario ref1 est la modélisation de l'état actuel de la Lézarde et de son bassin versant avec les ouvrages structurants actuels. Elle comprend :

- La modélisation des 53 ouvrages de capacité supérieure à 5 000 m³ sur les thalwegs et la modélisation complète de la Lézarde issue de l'étude de 2006.
- La transformation pluie-débit à partir des pluies de projet construites à partir de l'événement de 2003 ;
- L'occupation du sol actuelle basée sur les données OSCOM de 2016.

3.5.3 Scénario cc (3)

Le scénario « cc » de changement climatique à horizon 2050 ne nécessite pas de modélisation supplémentaire. On réutilise les résultats du scénario « ref1 » pour des périodes de retour modifiés :

- Hypothèse basse « ccb » : pas de modification des périodes de retour ;
- Hypothèse moyenne « ccm » : la Q₁₀₀ devient la Q₈₀ en 2050 ;
- Hypothèse forte « ccf » : la Q₁₀₀ devient la Q₆₅ en 2050.

3.5.4 Scénario herb (4)

Le scénario « herb » est la modélisation d'un état prospectif de la Lézarde et de son bassin versant où la surface en prairie serait réduite d'un tiers. Les hypothèses sont :

- La modélisation de tous les ouvrages de capacité supérieure à 5 000 m³ sur les thalwegs et la modélisation complète de la Lézarde issue de l'étude de 2006 ;
- La transformation pluie-débit à partir des pluies de projet construites à partir de l'événement de 2003 ;
- L'occupation du sol est modifiée par rapport à la situation du scénario « ref1 » où un tiers des prairies sont transformées en cultures.

Analyse de sensibilité du Curve Number

L'analyse de sensibilité a pour but d'évaluer l'effet d'une variation de la surface en herbe future sur les paramètres hydrologiques du modèle. Le paramètre de ruissellement utilisé (Curve Number ou CN, qui représente l'aptitude au ruissellement) est peu sensible à la variation de la surface en herbe, notamment car le Curve Number des surfaces en culture est assez bas en été (CN cultures = 68 en été contre 81 en hiver). Le Curve Number choisi pour les prairies est égal à 50. **Il est donc possible que ce scénario « herb » ait plus d'impact sur des événements hivernaux** (non vérifié dans le cadre de cette étude). Ainsi, le Curve Number global sur le BV de la Lézarde passe de 66,5 dans le scénario de base « ref1 » à 67,2 dans ce scénario « herb » (+1,1%).

3.5.5 Scénario agr (5)

Le scénario « agr » est la modélisation d'un état prospectif de la Lézarde et de son bassin versant où les pratiques agricoles seraient en partie adaptées pour réduire les ruissellements. Les hypothèses sont :

- La modélisation de tous les ouvrages de capacité supérieure à 5 000 m³ sur les thalwegs et la modélisation complète de la Lézarde issue de l'étude de 2006 ;
- La transformation pluie-débit à partir des pluies de projet construites à partir de l'événement de 2003 ;
- Le Curve Number est réduit de 4 points sur 50% des cultures, soit une réduction moyenne de 2 points sur la totalité des cultures.

Cette hypothèse de Curve Number s'appuie sur la publication de Fiener et Auerwald (2006), réalisée sur des types de sols similaires en Allemagne. Elle a le mérite de tenir compte des taux de couvert et du degré de développement des croutes de battance, et ensuite si nécessaire du degré de saturation initiale du sol. Le choix des Curve Numbers de base par culture correspond au tableau produit par l'AREAS pour la région Haute-Normandie, pour des sols de classe B selon la nomenclature du Soil Conservation Service (qui a développé la méthode des Curve Numbers aux USA). Les Curve Numbers des autres types d'occupation du sol ne changent pas. Il en résulte pour le développement des techniques de conservation des sols (idéales), en condition climatique " normales", une réduction du CN de 5 points pour les cultures sarclées (environ 1/4 des surfaces cultivées) et de 4 points pour les autres. Pour simplifier, il est retenu une réduction de 4 points pour tous les types de cultures, d'autant que c'est une valeur moyenne pour toutes les situations de saturation du sol. Etant donné que ce scénario considère que cette évolution des pratiques affecte 50% des surfaces cultivées, cela revient à appliquer **une réduction du CN moyen sur l'ensemble des surfaces cultivées de 2 points par rapport au scénario de base « ref1 » (Tableau 24).**

Tableau 24 : Paramètres d'occupation du sol et de ruissellement des différents scénarios modélisés (Mike).

Occupation du sol	S km2	%	Curve Number (CN)	S km2	%	Curve Number (CN)	S km2	%	Curve Number (CN)
Scénarios	ref0 – ref1 – actu - cc			herb			agr		
Cultures (été)	107	52%	68 (été)	120	58%	68	107	52%	66
Surfaces en herbe*	39	19%	50	26	13%	50	39	19%	50
Urbain	44	21%	87	44	21%	87	44	21%	87
Forêt	16	8%	43	16	8%	43	16	8%	43
BV Lézarde	206	100%	67	206	100%	68	206	100%	66

* les surfaces en prairies et en espaces verts non agricoles (Oscorn 2016) ont été regroupées dans le modèle Mike (même Curve Number)

3.6 Aléa modélisé par scénario

3.6.1 Synthèse des principaux résultats par scénario et période de retour (hors changement climatique)

Scénario	Volume total ruisselé (BV) en milliers de m3			Volume max stocké en milliers de m3			Nombre de surverses			Qp station Montivilliers en m3/s		
	F010	F050	F100	F010	F050	F100	F010	F050	F100	F010	F050	F100
ref0 – scénario de référence sans aucun ouvrage	1 052	1 658	3 074	-	-	-	-	-	-	7,9	13,7	20,5
ref1 – scénario de référence avec ouvrages actuels	1 052	1 658	3 074	488	638	794	10	21	32	5,9	7,7	12,9
Herb – scénario de réduction d'un tiers des prairies	1 188	1 815	3 320	507	660	803	14	23	33	6,0	13,6	15,5
Agr – scénario d'adoption de pratiques culturales adaptées sur 50% des cultures	958	1 525	2 881	417	587	775	8	17	31	3,9	7,3	11,8

Tableau 25 : Synthèse des principaux résultats pour les différents scénarios et périodes de retour modélisés hors « cc » (Mike)

Le débit de pointe est donné pour la station de Montivilliers, où la surface contributive est de 110km² (Tableau 25). Le volume ruisselé total concerne la totalité du BV de la Lézarde, soit 206 km². Le Tableau 26 indique les lames ruisselées et les coefficients de ruissellement moyens à l'échelle du BV.

Scénario	Lame ruisselée moyenne sur le BV en mm			Coefficient de ruissellement moyen sur le BV		
	F010	F050	F100	F010	F050	F100
ref0 – scénario de référence sans aucun ouvrage	5,1	8,0	14,9	10%	11%	17%
ref1 – scénario de référence avec ouvrages actuels	5,1	8,0	14,9	10%	11%	17%
Herb – scénario de réduction d'un tiers des prairies	5,8	8,8	16,1	11%	12%	19%
Agr – scénario d'adoption de pratiques culturales adaptées sur 50% des cultures	4,5	7,4	14,0	9%	10%	16%

Tableau 26 : Lame ruisselée et coefficient de ruissellement moyens sur le BV de la Lézarde pour les différents scénarios et périodes de retour modélisés hors « cc » (Mike)

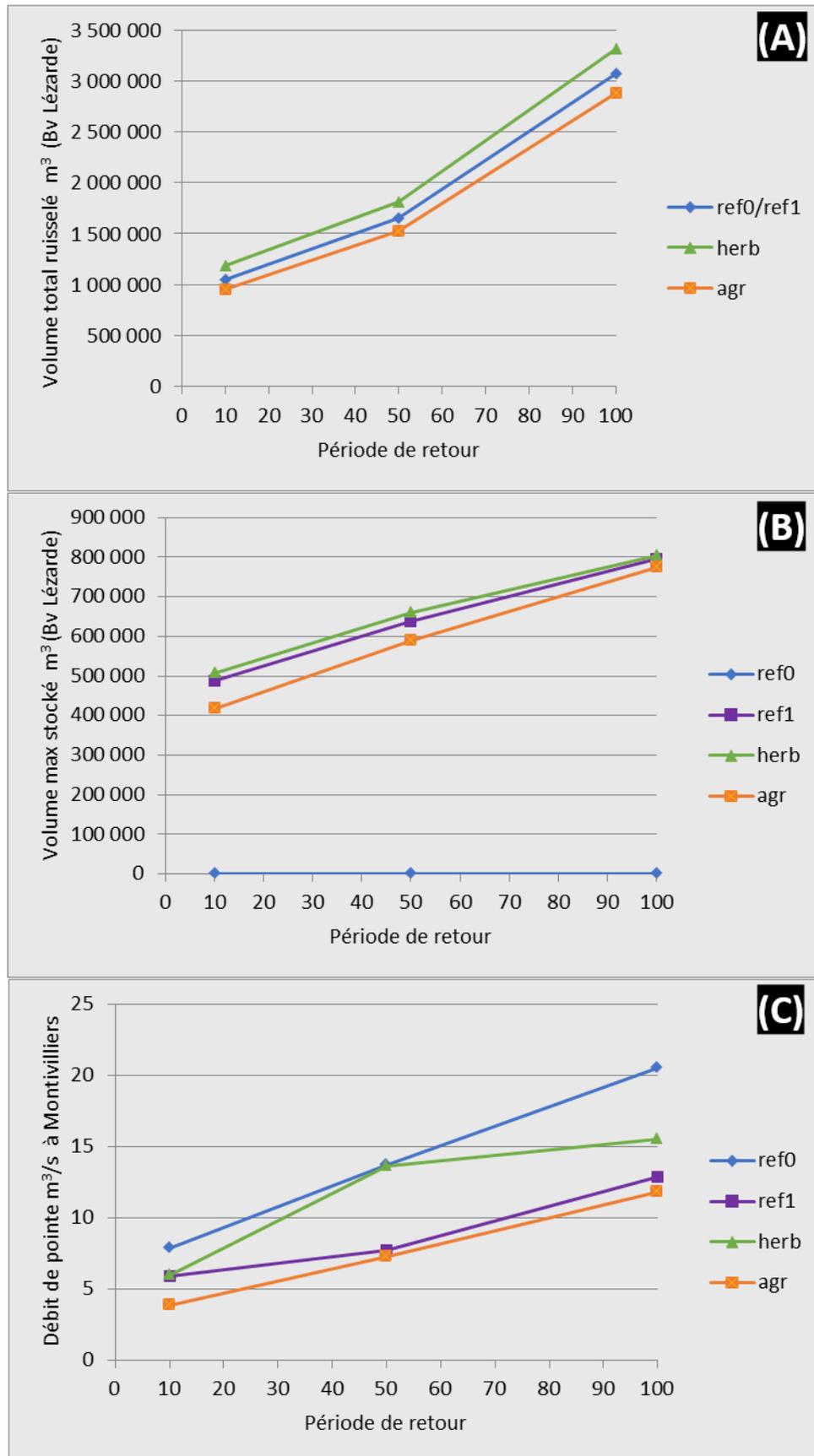


Figure 55 : (A) Volume total ruisselé, (B) volume max stocké, et (C) débit de pointe à Montivilliers pour les différents scénarios (« hors cc ») et période de retour (modèle MIKE).

3.6.2 Comparaison des débits modélisés à Montivilliers

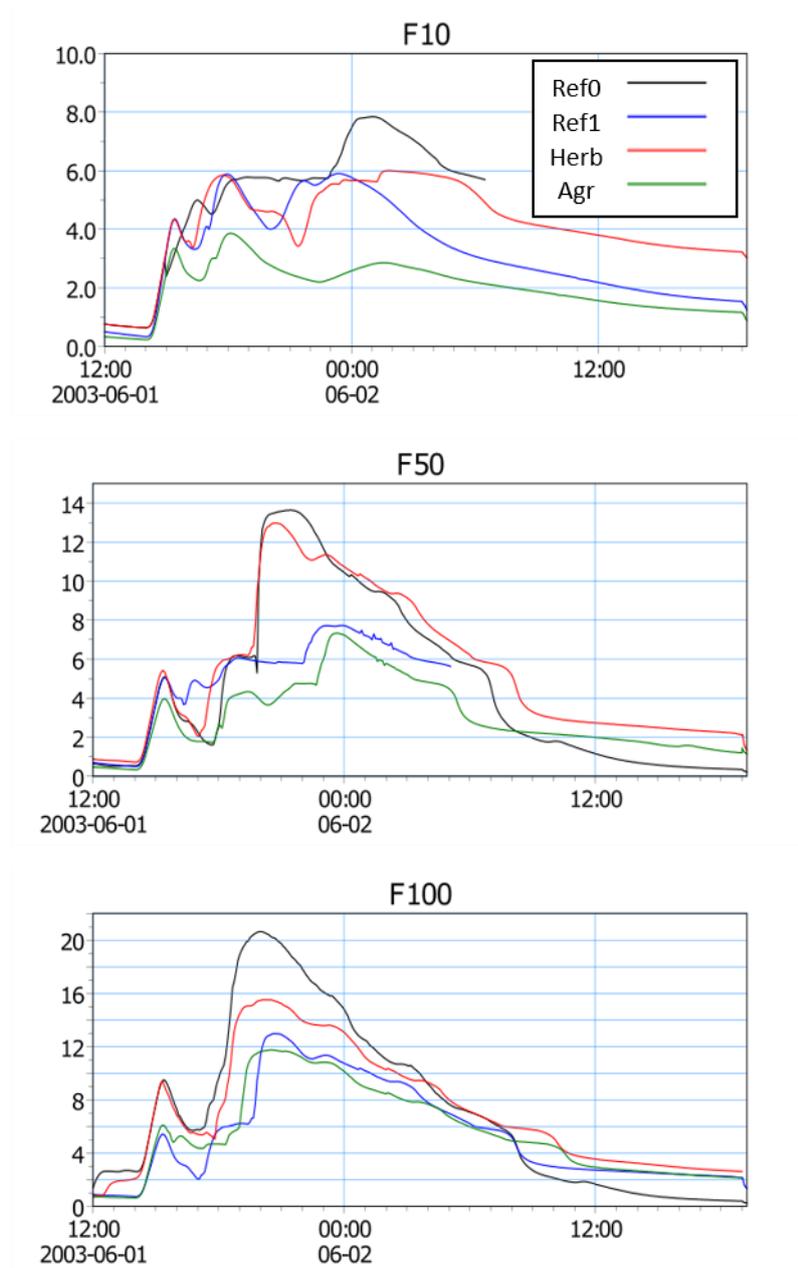


Figure 56 : Hydrogrammes modélisés à la station de Montivilliers par scénario et par période de retour (m^3/s).

3.6.3 Enveloppes d'inondation modélisées

Le modèle fournit quatre couches d'aléa pour chaque couple scénario x période de retour :

- Deux couches d'aléa « hauteur d'eau » : 1 pour la rivière et 1 pour les principaux talwegs secs
- Deux couches d'aléa « vitesse d'écoulement » : 1 pour la rivière et 1 pour les principaux talwegs secs

Soit au total 48 couches d'aléa sous format raster avec une taille de pixel de $100 m^2$. La Figure 57 et la Figure 58 présentent des extraits des cartes d'aléa pour la décennale (Scénarios ref0 et ref1).

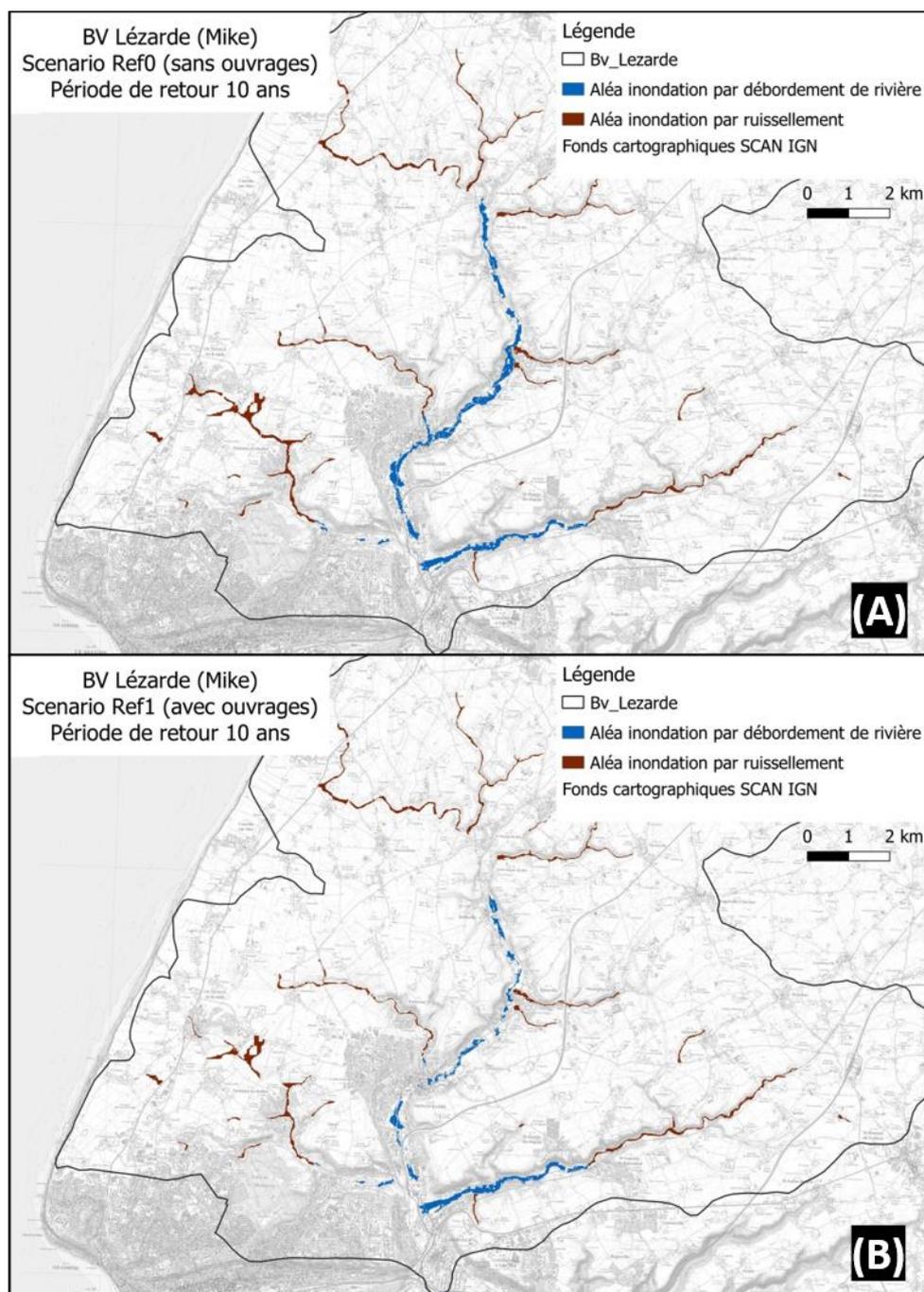


Figure 57 : Exemples de cartes d'inondation issues de la modélisation MIKE sur le bassin versant de la Lézarde pour l'évènement décennal : (A) scénario ref0, et (B) scénario ref1.

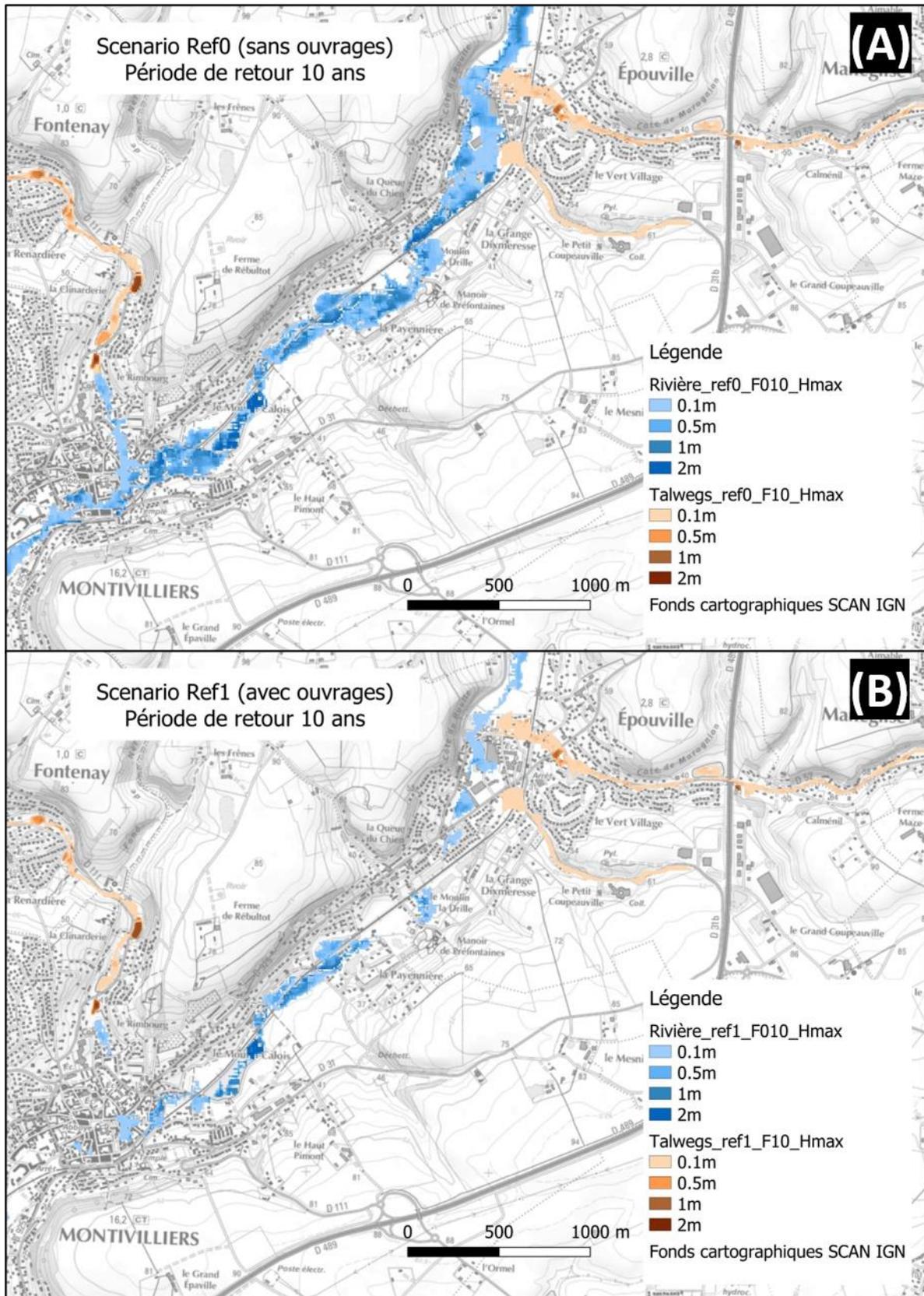


Figure 58 : Extraits de cartes d'aléa inondation issues de la modélisation MIKE sur le bassin versant de la Lézarde pour l'évènement décennal : (A) scénario ref0, et (B) scénario ref1.

Le Tableau 27 et la Figure 59 présentent la surface inondée par débordement de rivière pour les différents scénarios et périodes de retour modélisés avec le modèle MIKE hors scénario changement climatique.

Tableau 27 : Surface inondée par débordement de rivière pour les différents scénarios et périodes de retour modélisés hors « cc » (modèle MIKE).

Scenario	Surface inondée en ha (modèle rivière)		
	F010	F050	F100
ref0 – scénario de référence sans aucun ouvrage	156	260	327
ref1 – scénario de référence avec ouvrages actuels	99	174	282
Herb – scénario de réduction d'un tiers des prairies (avec ouvrages)	123	241	287
Agr – scénario d'adoption de pratiques culturales adaptées sur 50% des cultures (avec ouvrages)	69	167	273

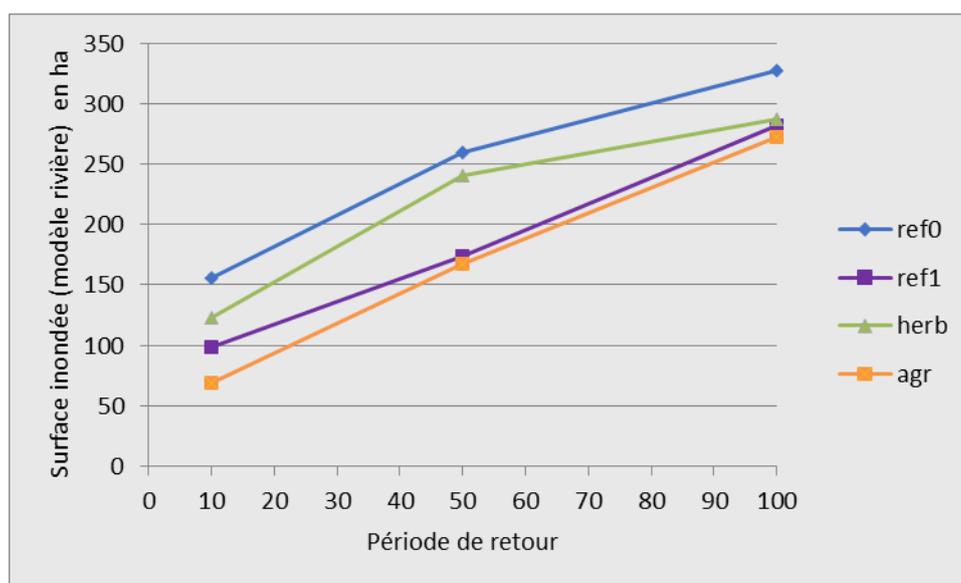


Figure 59 : Surface inondée par débordement de rivière pour les différents scénarios et périodes de retour modélisés hors « cc » (modèle MIKE).

Selon Emmanuel Hauchard de la Communauté Urbaine Le Havre Seine Métropole, environ 400 logements ont été inondés en juin 2003 à Montivilliers. De son côté, la base de données CCR estime à 334 le nombre de particuliers inondés en 2003 à Montivilliers pour un montant de dommages indemnisés extrapolé à 2,5 M€. A titre de comparaison, sur la commune de Montivilliers, 446 enjeux intersectent l'enveloppe d'aléa inondation de rivière calculée par DHI pour la période de retour 100 ans dans le scénario ref0 (sans aucun ouvrage) et 405 dans le scénario ref1 (53 ouvrages actuels). En 2003, au moins 19 ouvrages parmi ceux qui ont été modélisés existaient déjà. Cette méthode de calcul simplifiée surestime un peu le nombre d'enjeux inondés car certains enjeux n'intersectent que très légèrement l'enveloppe d'aléa et il n'est pas pris en compte ici la hauteur de plancher des enjeux

(contrairement à l'ACB). Cependant, l'ordre de grandeur est cohérent avec les observations. Les résultats détaillés par scénarios sont fournis en Annexe 2.5.

4 Cartographie de l'aléa inondation par ruissellement et coulée de boue

Cette partie du rapport détaille la modélisation de l'aléa inondation par ruissellement et coulée de boue. 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 évènement 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.

4.1 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 1 m 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

4.1.1 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 1m a été agrégé à une résolution de 5 m. 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.

4.1.2 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 issu 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. A 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 60.

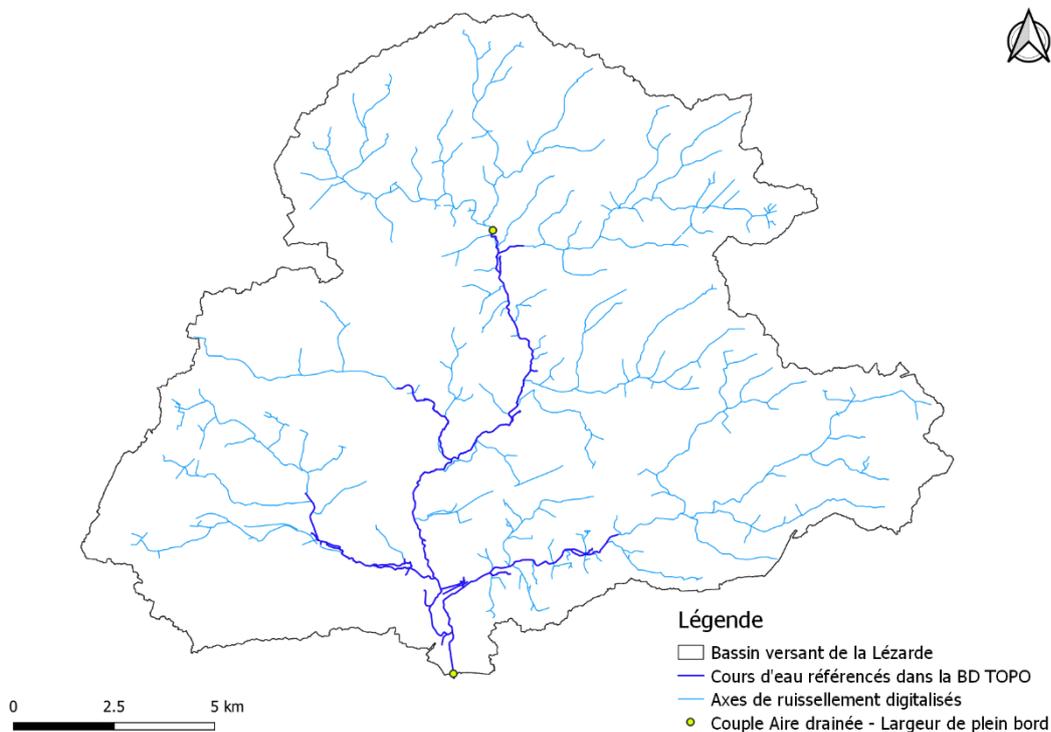


Figure 60 : Cartographie finale des axes de ruissellement digitalisés.

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 (Eq. 8) 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 28). La largeur de plein bord a été calculé par mesure de la largeur sur les orthophotographies.

$$\text{Largeur de plein bord (m)} = 0,203 \times \text{Aire drainée (m}^2) - 10,674 \quad \text{Eq. (8)}$$

Tableau 28 : Aire drainée et largeur de plein bord des deux points utilisés pour construire la relation empirique aire drainée – largeur de plein bord.

Point	Aire drainée (km ²)	Largeur de plein bord (m)
1 (amont)	62,2	2
2 (aval)	209,6	32

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).

4.1.3 Les aménagements existants

Les ouvrages de gestion des eaux de ruissellement sur le bassin sont très nombreux, avec 222 ouvrages recensés dans la BD CASTOR⁷ et 223 ouvrages dans la base de données de la CODAH⁸. 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 61). Pour les ouvrages non référencés, leur capacité a été estimée en multipliant leur emprise au sol par une hauteur moyenne de 1,5 m. A 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 m³. La cartographie de ces ouvrages est présentée sur la Figure 62. Les aménagements d'hydraulique douce existants sont également intégrés. En procédant de la même manière que pour les ouvrages, ce sont finalement 57 fascines, 46 haies et 1 aménagement de bétoire qui ont été intégrés.

⁷ BD CASTOR : <http://bdcastor.fr/>

⁸ CODAH : Communauté de l'Agglomération Havraise (Le Havre Seine Métropole)

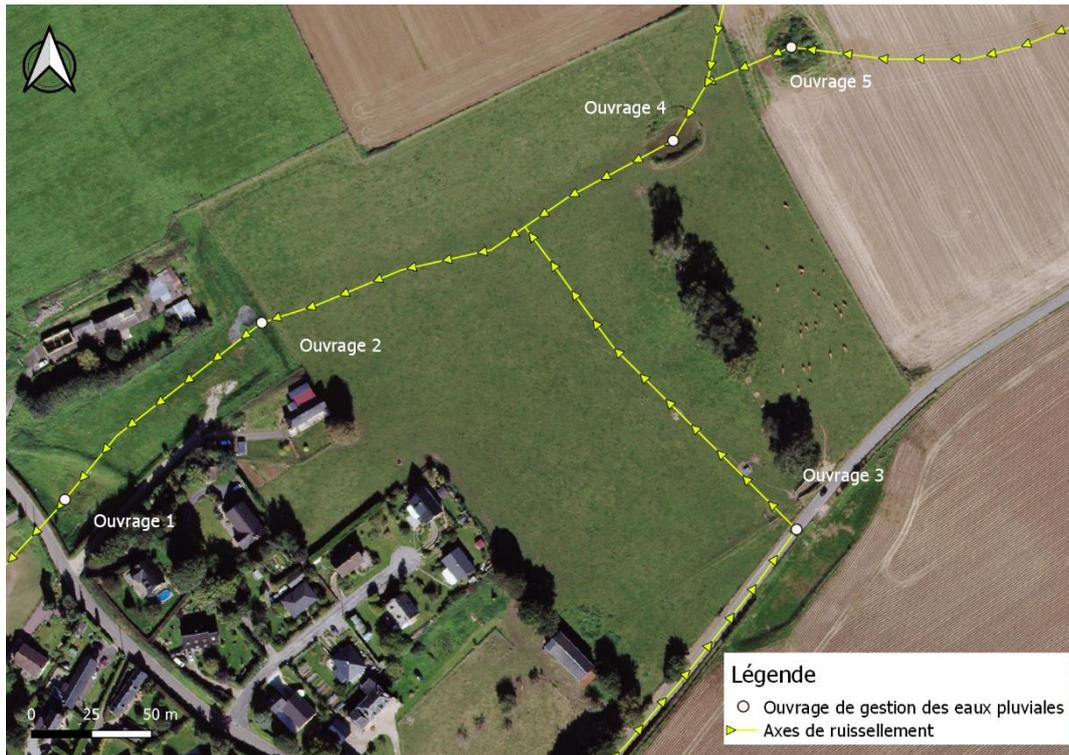


Figure 61 : Exemple d'interconnexion entre les ouvrages recensés (points blancs numérotés de 1 à 5) et le réseau d'axe de ruissellement (trait jaune).

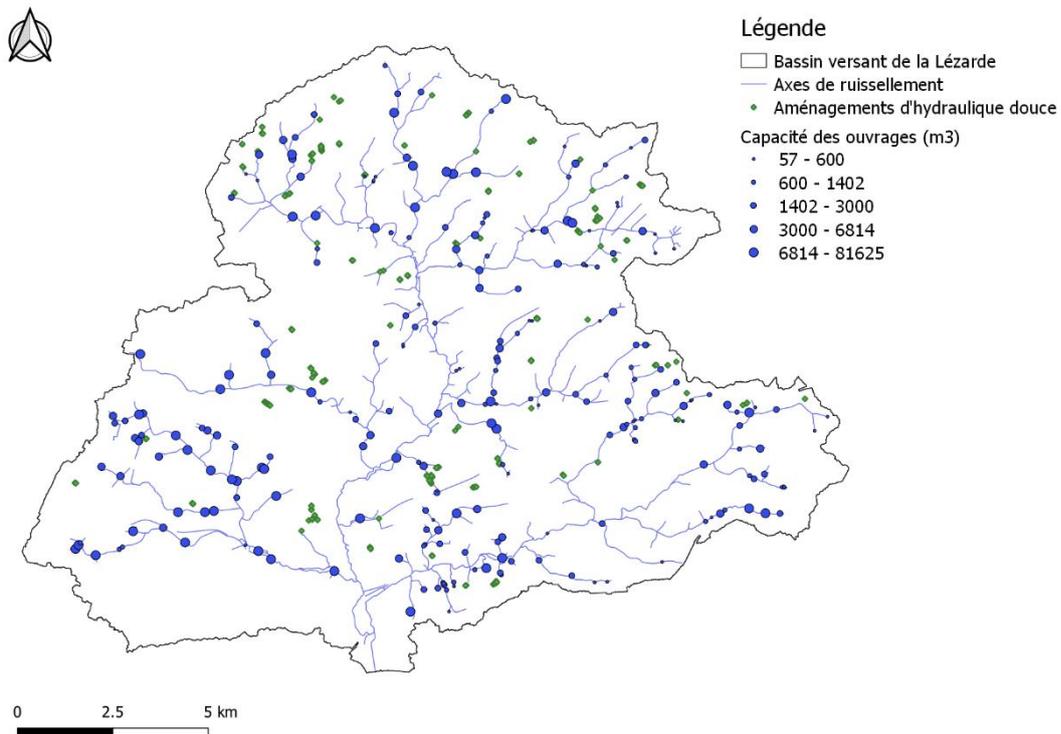


Figure 62 : Cartographie des ouvrages de gestion des eaux de ruissellement intégrés au modèle hydraulique.

4.2 Construction du modèle WaterSed

4.2.1 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)

A 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 1/5000^{ème} 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 présenté sur la Figure 63.

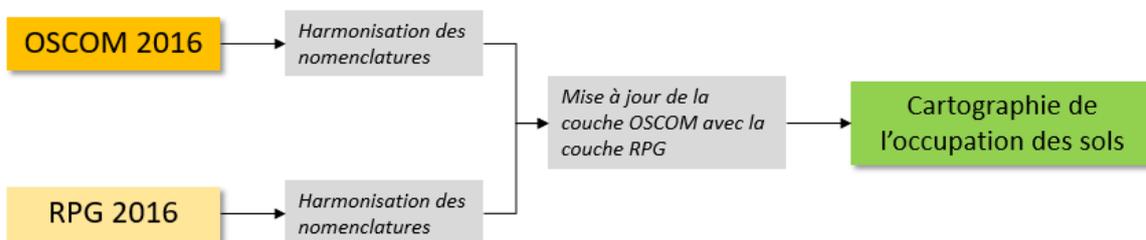


Figure 63 : Etapes de construction de la cartographie de l'occupation des sols à partir des cartographies OSCOM et RPG.

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 29).

Tableau 29 : Nomenclature de la cartographie finale de l'occupation des sols 2016.

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

Dans un second temps, la nomenclature OSCOM 2016 est transformée suivant cette nomenclature cible à partir d'une table de conversion (Tableau 30).

Tableau 30 : Table de conversion de la nomenclature OSCOM.

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

Dans un troisième temps, la nomenclature RPG 2016 est transformée suivant la nomenclature cible à partir d'une table de conversion (Tableau 31). 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 ».

Tableau 31 : Table de conversion de la nomenclature RPG.

CODE_RPG	LIBELLE_RPG	CODE_LU	CODE_RPG	LIBELLE_RPG	CODE_LU
ART	Artichaut	5	LU5	Luzerne implantée pour la récolte 2015	1
CPA	Autre céréale de printemps de genre Avena	2	LU6	Luzerne implantée pour la récolte 2016	1
FAG	Autre fourrage annuel d'un autre genre	2	MIS	Maïs	3
FLA	Autre légume ou fruit annuel	5	MID	Maïs doux	3
FLP	Autre légume ou fruit pérenne	5	MIE	Maïs ensilage	3
LUZ	Autre luzerne	1	MCR	Mélange de céréales	1
PPA	Autre plante à parfum, aromatique et médicinale annuelle	5	ML6	Mélange de légumineuses fourragères	1
PPP	Autre plante à parfum, aromatique et médicinale pérenne	5	MH5	Mélange de légumineuses fourragères	1
PFP	Autre pois fourrager de printemps	3	MH6	Mélange de légumineuses fourragères	1
PTR	Autre prairie temporaire de 5 ans ou moins	4	MC6	Mélange de légumineuses fourragères	1
AVP	Avoine de printemps	2	MLG	Mélange de légumineuses prépondérantes	1
BFS	Bande admissible le long d'une forêt sans production	4	MPC	Mélange de protéagineux et de céréales	1
BTA	Bande tampon	4	MTH	Menthe	5
BVF	Betterave fourragère	3	MCT	Miscanthus	6
BTN	Betterave non fourragère / Bette	3	OIG	Oignon / Échalote	5
BDH	Blé dur d'hiver	1	ORP	Orge de printemps	2
BTH	Blé tendre d'hiver	1	ORH	Orge d'hiver	1
BTP	Blé tendre de printemps	2	PEP	Pépinière	5
BOP	Bois pâturé	6	PSL	Persil	5
BOR	Bordure de champ	6	PFR	Petit fruit rouge	5
CAR	Carotte	5	POR	Poireau	5
CEL	Céleri	5	PHI	Pois d'hiver	1
CES	Chicorée / Endive / Scarole	5	PPR	Pois de printemps semé avant le 31/05	2
CHU	Chou	5	PP6	Pois fourrager de printemps implanté pour la récolte 2016	1
CZH	Colza d'hiver	1	PTC	Pomme de terre de consommation	3
CCT	Courgette / Citrouille	5	POT	Potiron / Potimarron	5
CRS	Cresson	5	PRL	Prairie en rotation longue (6 ans ou plus)	4
CSS	Culture sous serre hors sol	5	PPH	Prairie permanente - herbe prédominante	4
EPE	Épeautre	1	RDI	Radis	5
FF6	Féverole fourragère implantée pour la récolte 2016	2	RGA	Ray-grass de 5 ans ou moins	4
FVL	Féverole semée avant le 31/05	2	SA6	Sainfoin implanté pour la récolte 2016	1
CPL	Fourrage composé de céréales et/ou de protéagineux	1	SGH	Seigle d'hiver	1
FRA	Fraise	5	SNE	Surface agricole temporairement non exploitée	6
HAR	Haricot / Flageolet	5	SBO	Surface boisée sur une ancienne terre agricole	6
J5M	Jachère de 5 ans ou moins	6	TCR	Taillis à courte rotation	6
J6P	Jachère de 6 ans ou plus	6	TOM	Tomate	5
J6S	Jachère de 6 ans ou plus déclarée comme Surface d'intérêt écologique	6	TOP	Topinambour	5
LBF	Laitue / Batavia / Feuille de chêne	5	TRN	Tournesol	3
LIF	Lin fibres	2	TR5	Trèfle implanté pour la récolte 2015	1
			TR6	Trèfle implanté pour la récolte 2016	1
			TTH	Triticale d'hiver	1
			VRG	Verger	6

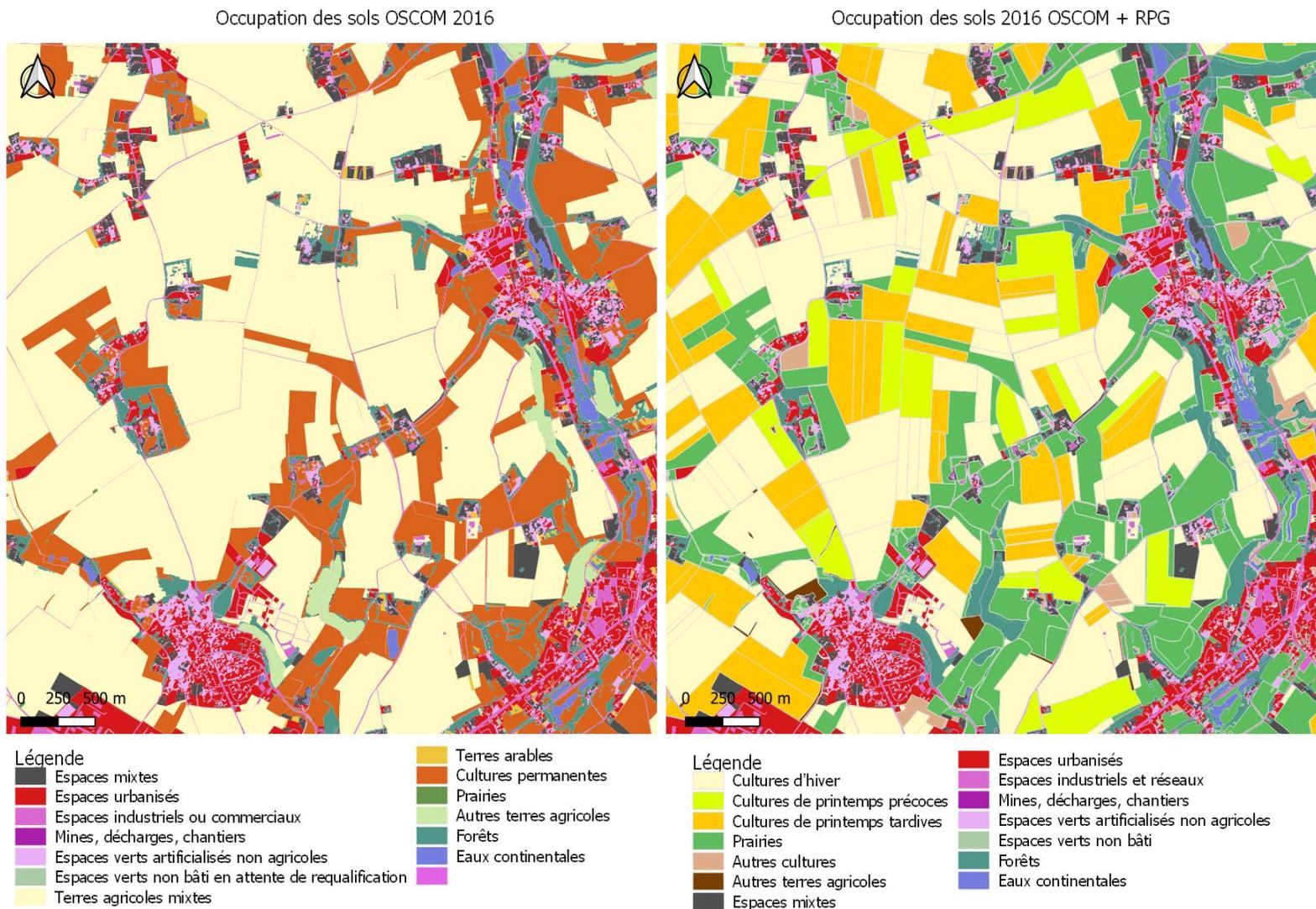


Figure 64 : (Gauche) Cartographie de l'occupation des sols OSCOM 2016 ; (Droite) Cartographie de l'occupation des sols 2016 OSCOM + RPG.

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 64). 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 65.

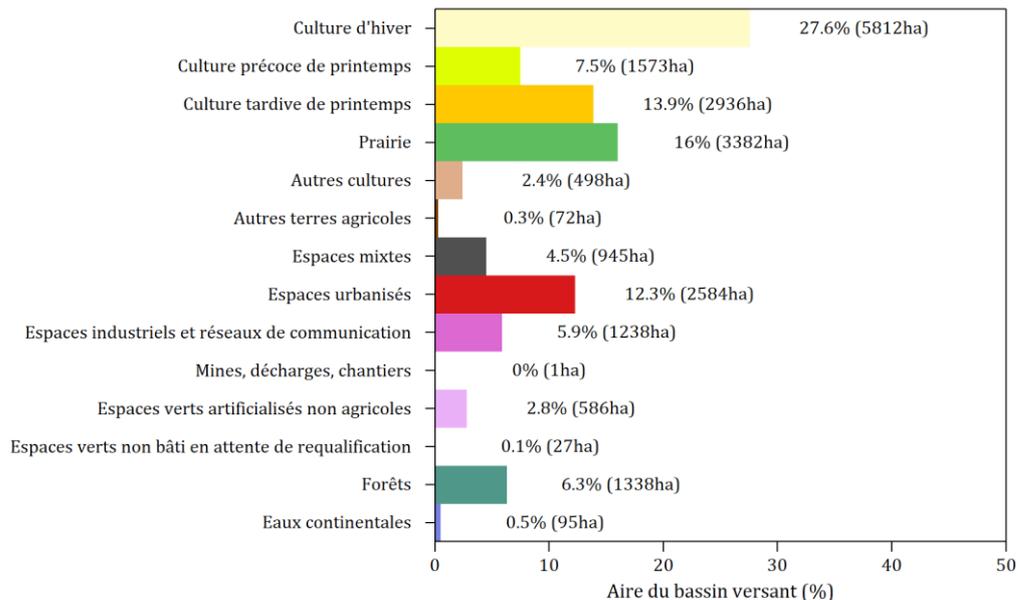


Figure 65 : Statistiques de l'occupation des sols 2016 sur le bassin de la Lézarde.

4.2.2 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^{ème}. 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 66).

- Limoneuse (LM) à limono-sableuse (LS) : sols profonds majoritairement lessivés, localisés en fond de talweg, issus de colluvions de lœss, 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.

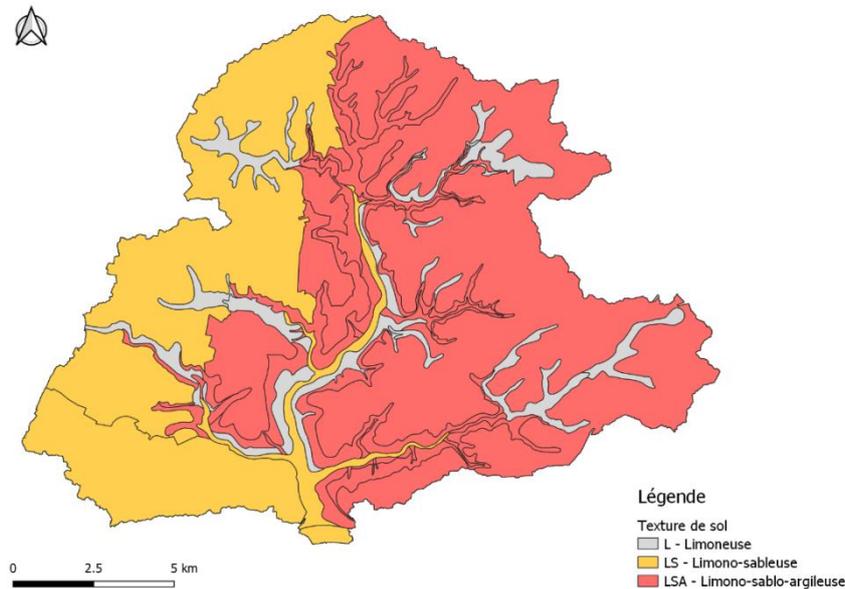


Figure 66 : Cartographie simplifiée des textures de sol sur le bassin de la Lézarde, construite à partir du Référentiel Régional Pédologique de Haute-Normandie.

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 67). 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.

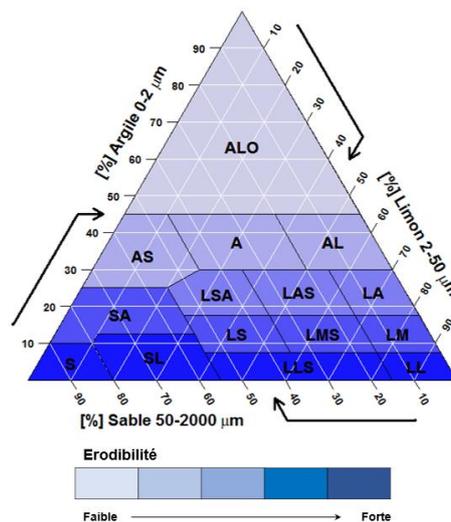


Figure 67 : Triangle des textures et niveau d'érodibilité de chacune des classes.

4.2.3 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 68).

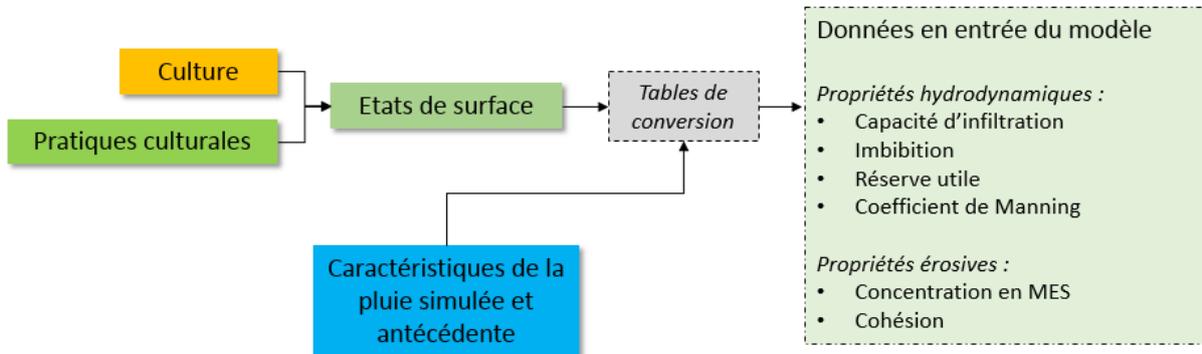


Figure 68 : Principe général de paramétrisation du modèle WaterSed.

4.2.3.1 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 CaCO₃. 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 semi 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 (Le Bissonais et al., 1998, 2005 ; Cerdan et al., 2002). A 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 69).

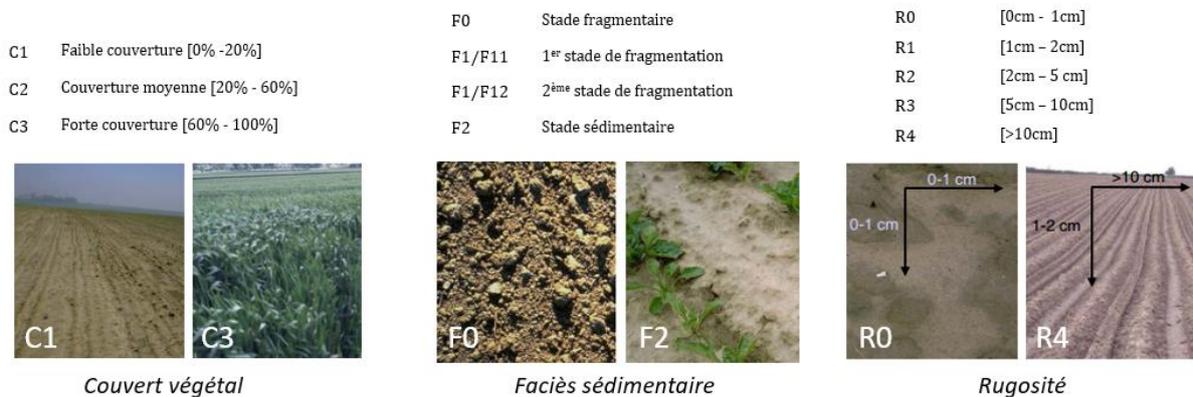


Figure 69 : Méthode d'évaluation de l'état de surface du sol selon la couverture végétale, le faciès sédimentaire, et la rugosité du sol.

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).

4.2.3.2 Données génériques en entrée du modèle

A 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.
- Erodibilité (-) : 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 à la suite de l'érosion des sols par « effet splash ».

Ces cinq couches raster sont créés pour chaque mois de l'année. A 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).

4.2.3.3 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 32). 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 34, Tableau 35, et Tableau 36). Sur ce principe, l'évolution mensuelle de la capacité d'infiltration est illustrée sur le Tableau 33. 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.

Tableau 32 : Calendrier cultural spécifiant par type de culture et 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 vert respectivement.

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 33 : Evolution 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.

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 34 : Table de conversion état de surface du sol – capacité d'infiltration

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 35 : Table de conversion état de surface du sol – coefficient de Manning

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 36 : Table de conversion état de surface du sol - érodibilité

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

4.2.3.4 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 62). 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 37). Ces caractéristiques sont issues d'expérimentations réalisées par l'AREAS dans la région (Richet et al., 2006 ; Ouvry et al., 2012b).

Ainsi, cinq couches raster sont créées pour caractériser un aménagement d'hydraulique douce :

- 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 (m³) : volume de stockage (seulement pour les bassins, digues, etc.)

Tableau 37 : Caractéristiques de chaque type d'aménagement d'hydraulique douce ; XXX : volume spécifique à chaque ouvrage.

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 bétoire	1	0,5	200	1	0

4.2.3.5 Données additionnelles : les bétoires

Les bétoires sont nombreuses sur le bassin de la Lézarde (608 bétoires recensées d'après l'inventaire régional des bétoires de Haute-Normandie du BRGM, Figure 70) et constituent des points préférentiels d'engouffrement des eaux de ruissellement. Le fonctionnement de ces singularités reste 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 bétoires.

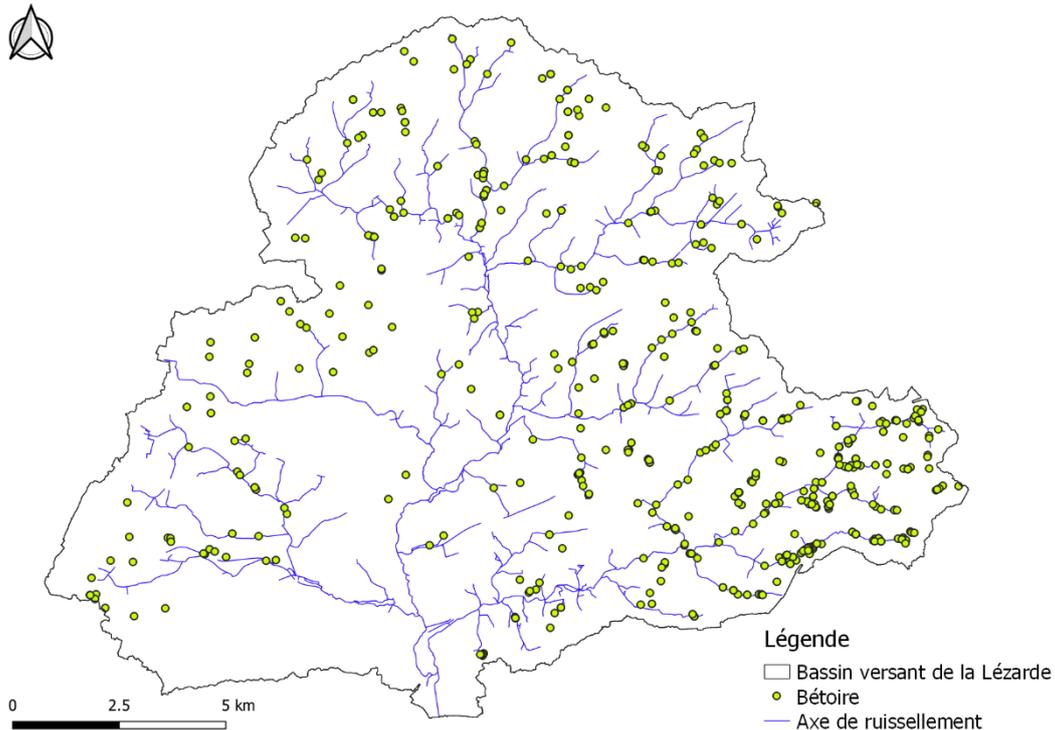


Figure 70 : Cartographie des bétaires sur le bassin de la Lézarde.

4.3 Calibration et validation du modèle

4.3.1 Calibration

4.3.1.1 Principe

L'étape de calibration consiste à identifier les valeurs des paramètres des modules hydrologique et sédimentaire du modèle WaterSed (Tableau 38).

Tableau 38 : Valeurs des différents paramètres après calibration du modèle WaterSed.

Paramètre	Description	Valeur
Module « Hydrologie »		
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
Module « Erosion »		
Débit critique (m ³ /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

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 termes 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 71).

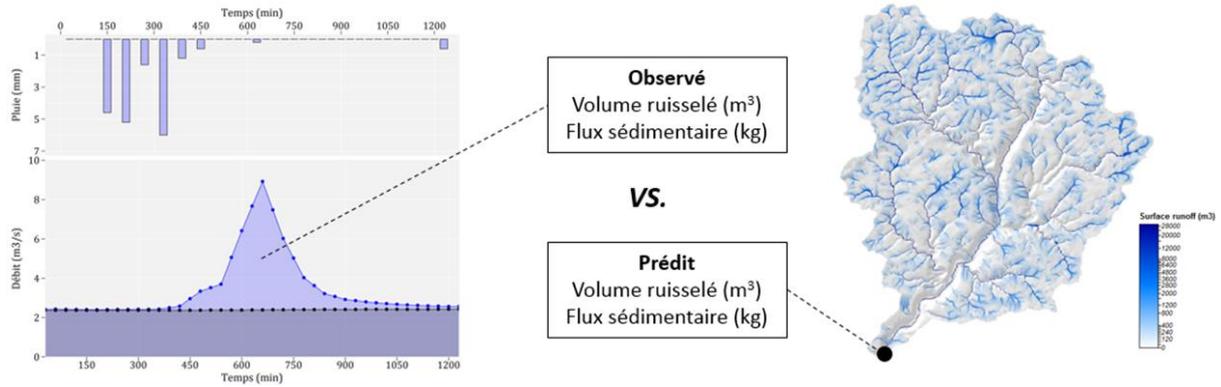


Figure 71 : Méthode de détermination des paramètres du modèle WaterSed par comparaison entre les volumes de ruissellement et les flux sédimentaires mesurés au droit de la station hydro-sédimentaire et ceux prédits par le modèle.

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.

4.3.1.2 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 km²) (Figure 72).

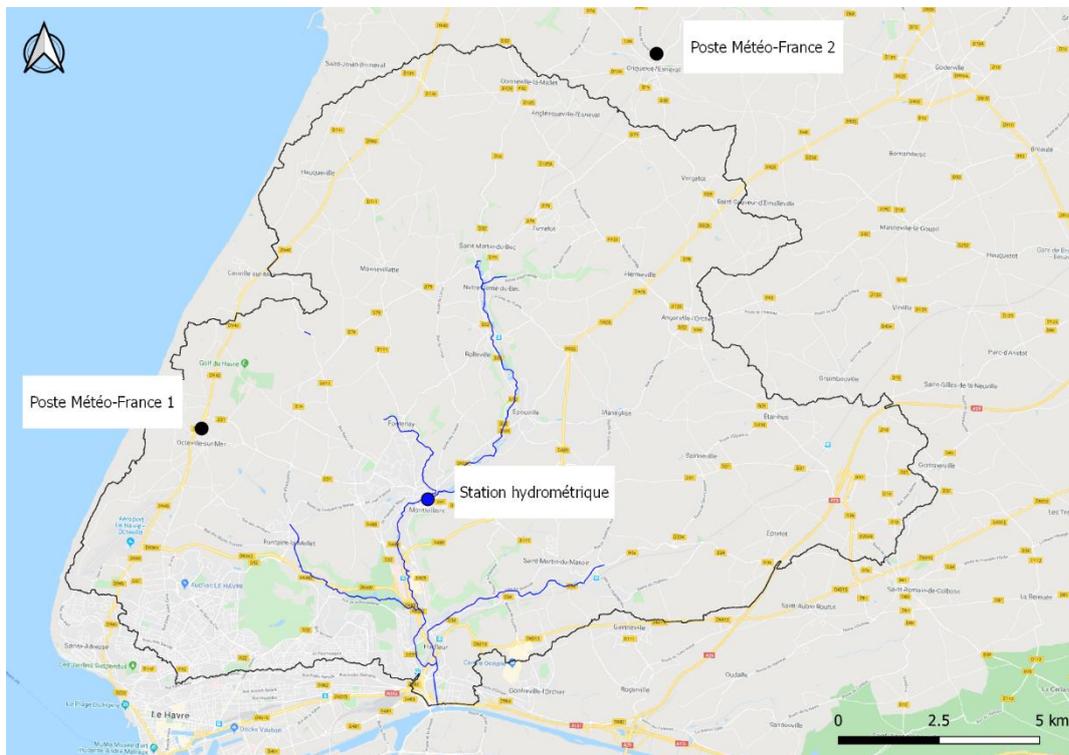


Figure 72 : Localisation de la station hydrométrique de Montivilliers, du poste Météo-France d'Octeville (Poste 1) et du poste Météo-France de Criquetot l'Esneval (Poste 2).

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 73), 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).

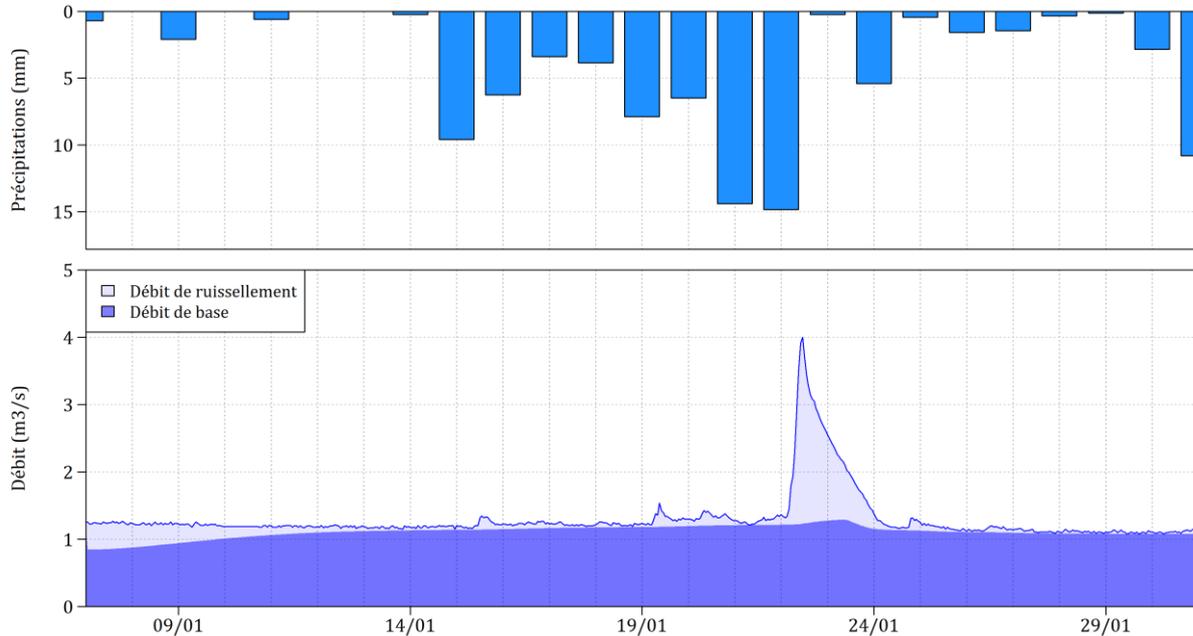


Figure 73 : Hyétogramme et hydrogramme de la crue de janvier 2018 de la Lézarde enregistrée au niveau de la station hydrométrique de Montivilliers.

Cette crue est caractéristique d'une crue d'hiver, intervenant sur un sol saturé à la suite d'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 01 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 m³/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 m³.

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 m³/s et un volume de ruissellement de 194 001 m³. 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.

4.3.1.3 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 48h (Tableau 39). 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.

Tableau 39 : 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 48h.

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

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

4.3.1.4 Résultats

Le modèle a pu être calé sur cette crue (Figure 73). Les paramètres hydrologiques issus de calage sont détaillés dans le Tableau 38. Les performances de calage sont présentées dans le Tableau 40. L'hydrogramme observé et l'hydrogramme prédit sont indiqués sur la Figure 74.

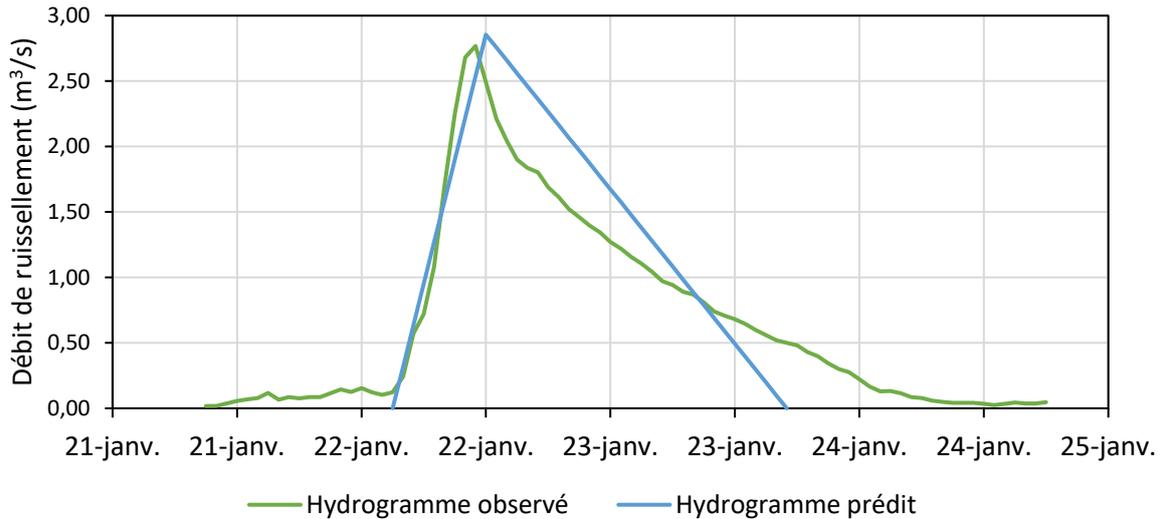


Figure 74 : Hydrogramme de ruissellement observé et prédit à Montivilliers, à l'issue de l'étape de calibration du modèle WaterSed sur la crue de janvier 2018.

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.

4.3.2 Validation

4.3.2.1 Caractéristiques de la crue de validation

L'orage du 1^{er} 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 m³/s et un volume total de 1 162 080 m³. Cette crue a démarré le 1^{er} juin à 5:00 et la décrue s'est terminée autour du 4 juin à 0:00 (Figure 75). Après séparation de l'hydrogramme, le débit de pointe de ruissellement est estimé à 11,0 m³/s pour un volume de ruissellement total de 831 591 m³.

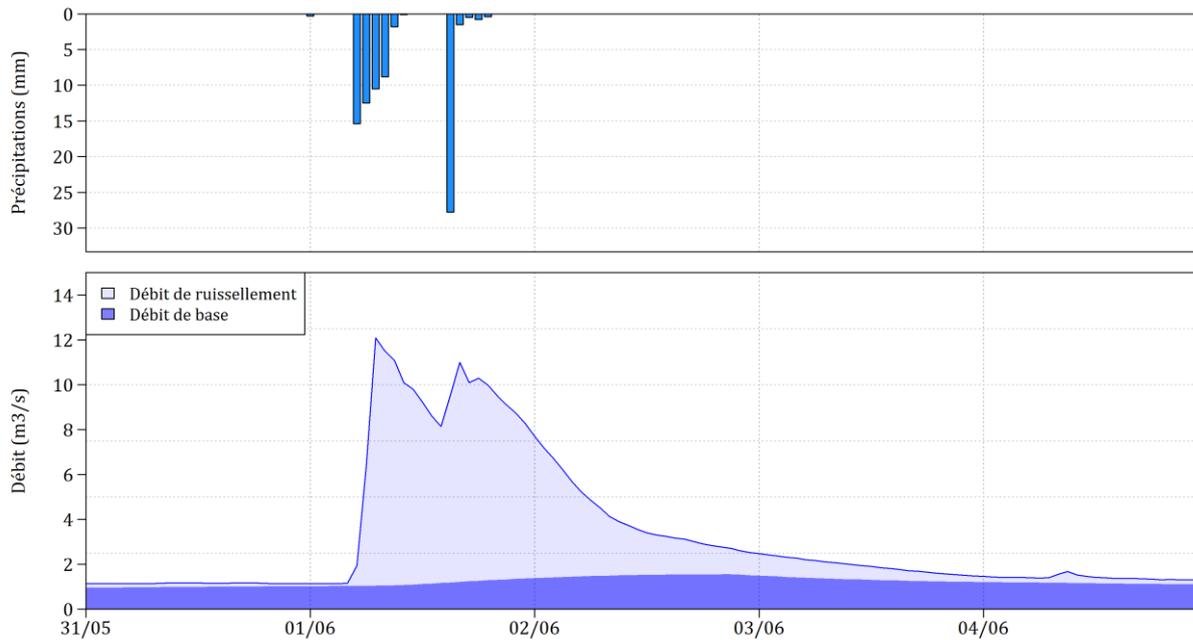


Figure 75 : Hyéto-gramme et hydro-gramme de la crue de juin 2003 de la Lézarde enregistrée au niveau de la station hydrométrique de Montivilliers.

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.

4.3.2.2 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 38). Les performances de calage sont présentées dans le Tableau 40. L'hydrogramme observé et l'hydrogramme prédit sont indiqués sur la Figure 76.

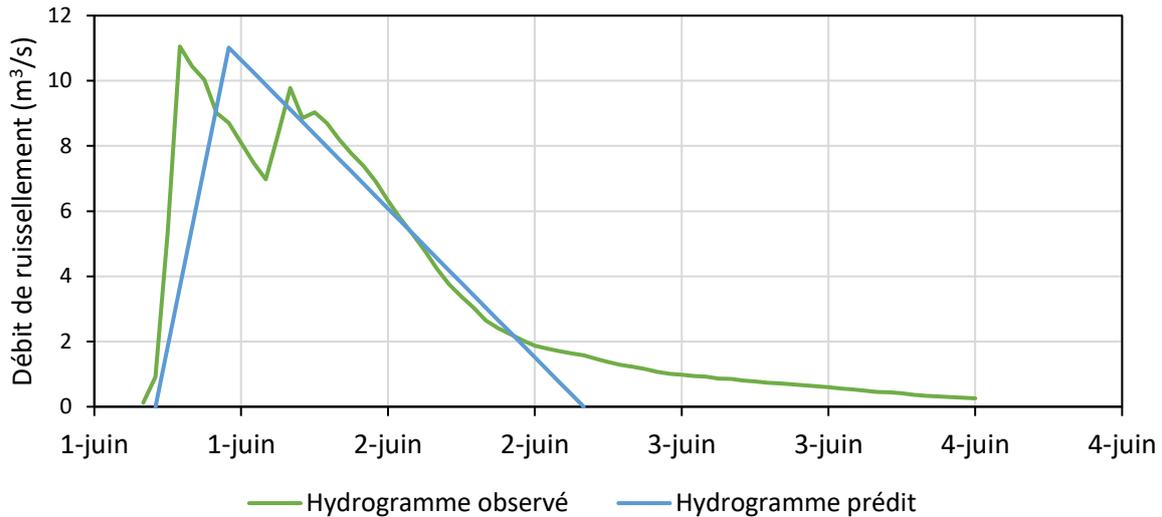


Figure 76 : Hydrogramme de ruissellement observé et prédit à Montivilliers, à l'issue de l'étape de calibration du modèle WaterSed sur la crue de juin 2003.

Le débit de pointe prédit par le modèle est de $11,01 \text{ m}^3/\text{s}$ pour un débit de pointe observé de $11,05 \text{ m}^3/\text{s}$, 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 $1\,300\,000 \text{ m}^3$ 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 $561\,363 \text{ m}^3$ contre $831\,590 \text{ m}^3$ 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.

4.3.3 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 40, ainsi que les volumes de ruissellement et les débits de pointe prédits par le modèle pour chacune des deux crues.

Tableau 40 : 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.

	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 ³)	552 592	-	1 162 080	-
Volume d'écoulement de base (m ³)	358 591	-	330 489	-
Volume de ruissellement (m ³)	194 001	195 712 (+0,9%)	831 590	561 363 (-32,5%)
Débit de pointe total (m ³ /s)	4,00	-	12,10	-
Débit de pointe de ruissellement (m ³ /s)	2,77	2,85 (+3,1%)	11,05	11,01 (-0,4%)
Flux sédimentaire (t)	-	590	-	1 477
Taux d'érosion spécifique (t/ha)	-	0,051	-	0,129

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 évènements 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.

4.4 Cartographie de l'aléa inondation par ruissellement

4.4.1 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 77), la cartographie des vitesses d'écoulement et la géométrie des talwegs.



Figure 77 : 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 37).

4.4.2 Géométrie 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 78). La longueur de chaque profil en travers est de 150 m.

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.

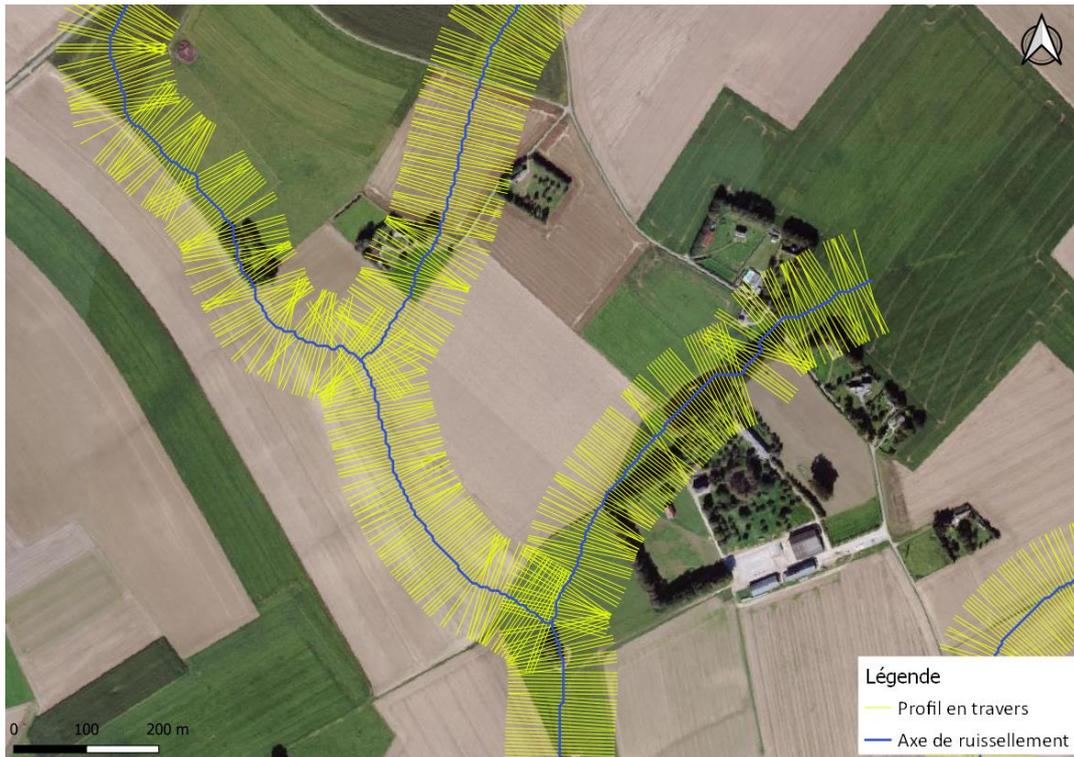


Figure 78 : Caractéristiques des profils en travers tracés pour extraire la géométrie des talwegs.

4.4.3 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 79) :

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.

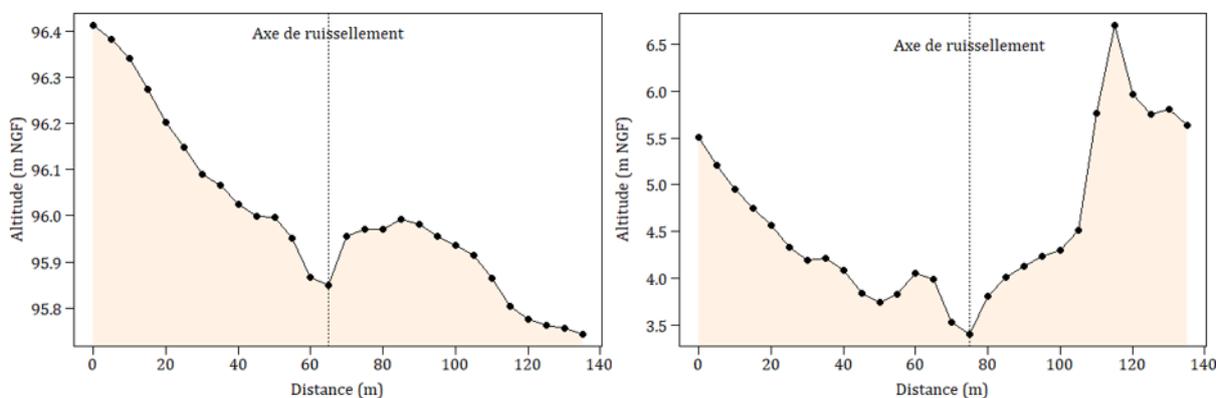


Figure 79 : (Gauche) Cas 1 : profil en travers parallèle à la direction du versant ; (Droite) Cas 2 : profil en travers recoupant deux talwegs.

Le risque est de cartographier des « artefacts d'inondation » (Figure 80). Un algorithme a ainsi été développé, pour rechercher les extrémités en rive droite et en rive gauche de chaque profil en travers (Figure 81). 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.

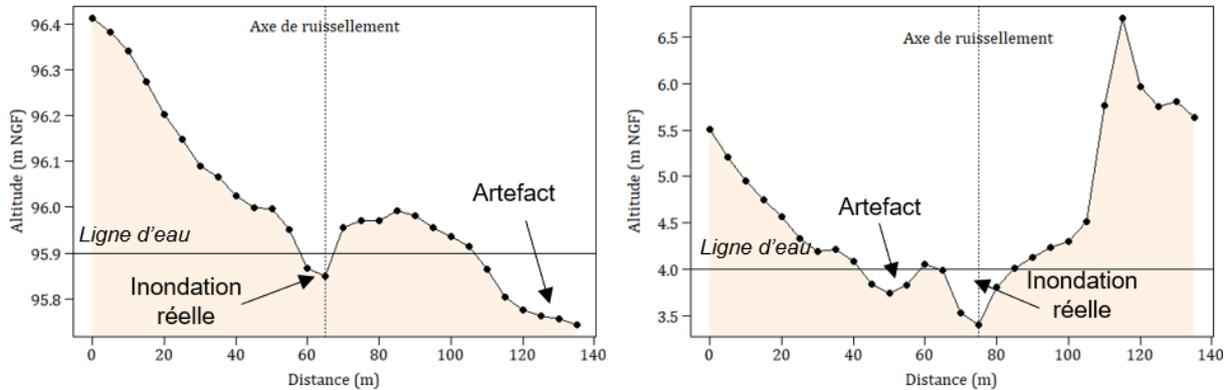


Figure 80 : Artefact généré pour le Cas 1 (Gauche) et le Cas 2 (Droite) si l'ensemble du profil en travers est considéré pour le calcul de la hauteur d'eau.

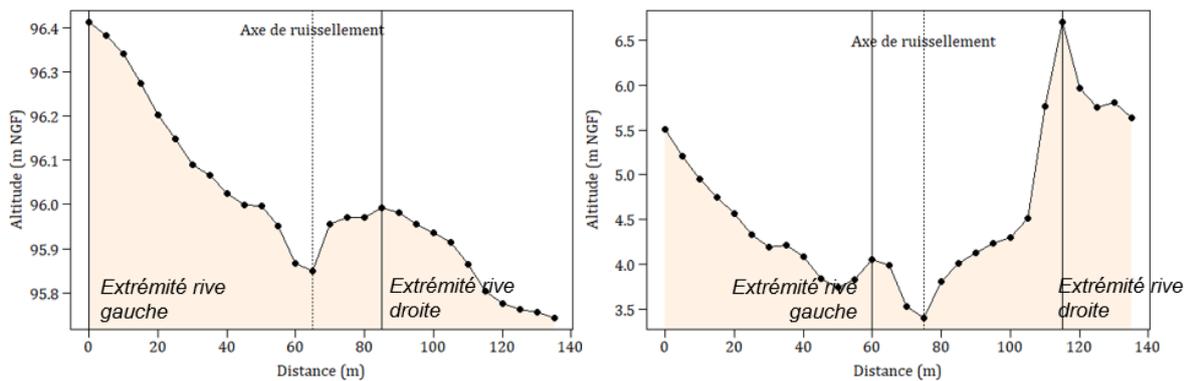


Figure 81 : Délimitation de l'extrémité du profil en travers en rive droite et en rive gauche pour le Cas 1 (Gauche) et le Cas 2 (Droite).

À la suite de cette étape de délimitation, une relation section mouillée – hauteur est construite en calculant la section mouillée en chaque point du profil (Figure 82). 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.

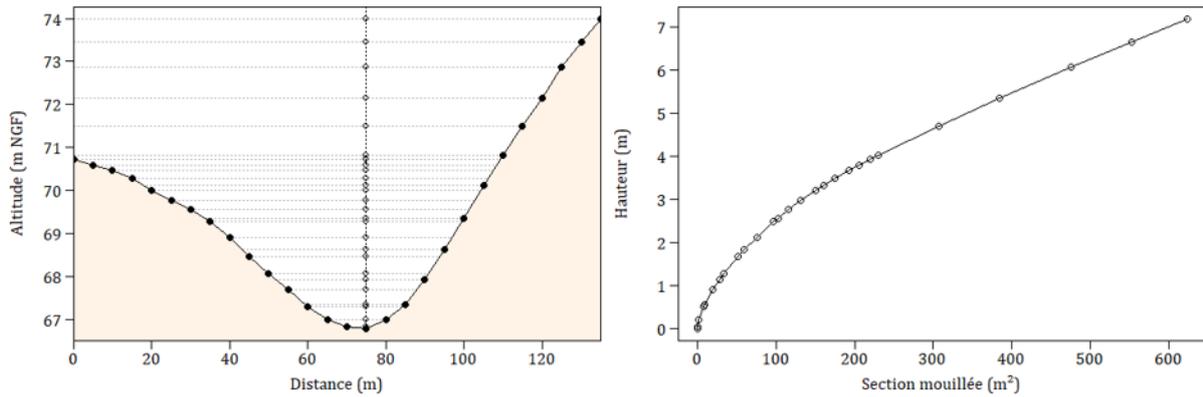


Figure 82 : (Gauche) Méthode de calcul de la section mouillée pour chaque point du profil ; (Droite) Exemple de relation section mouillée – hauteur.

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 (Eq. 9) :

$$Section\ mouillée\ (m^2) = \frac{Débit\ de\ pointe\ (m^3 \cdot s^{-1})}{Vitesse\ (m \cdot s^{-1})} \quad Eq. (9)$$

L’altitude de la ligne d’eau est ensuite calculée et projetée sur le profil en travers (Figure 83). 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.

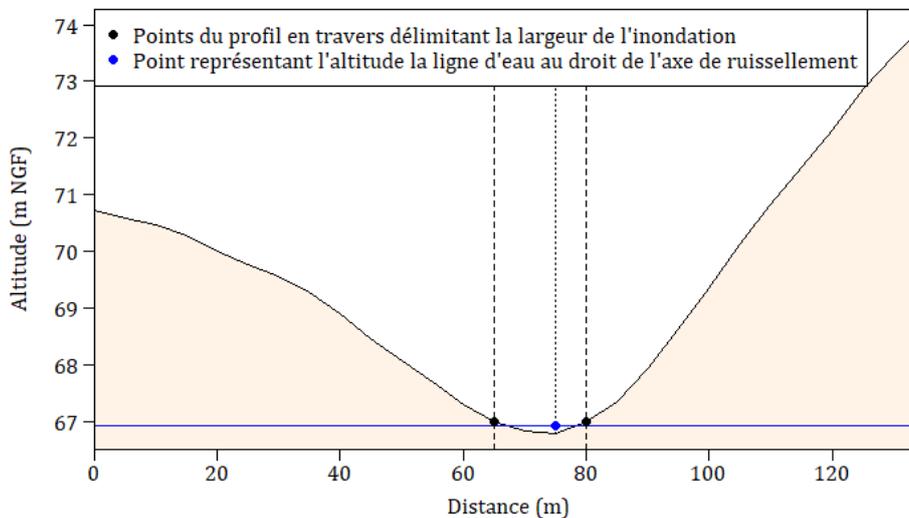


Figure 83 : Représentation du profil en travers de deux points délimitant la largeur de l’inondation et du point représentant l’altitude de la ligne d’eau au droit de l’axe de ruissellement.

4.4.4 Cartographie des hauteurs d’eau

À la suite du 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 84).



Figure 84 : Représentation d'un profil en travers après traitement. Chaque profil se résume en 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 85).

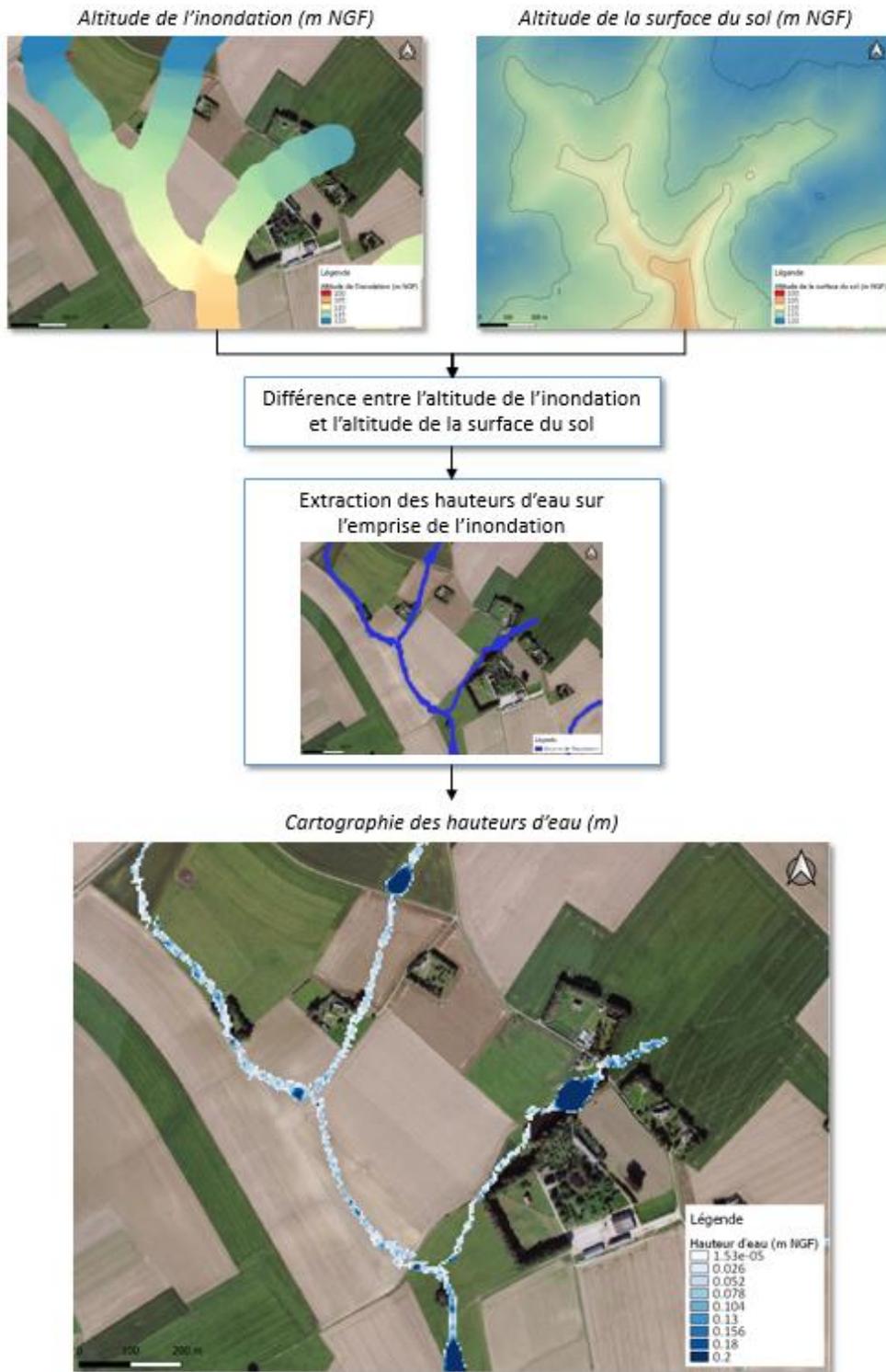


Figure 85 : Procédure de calcul de la cartographie des hauteurs d'eau.

4.5 Aléa inondation et coulée de boue par scénario

À la suite de 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 le volume 3 de ce rapport. Chaque scénario est testé selon trois pluies de projet, de période de retour 10 ans, 50 ans et 100 ans.

4.5.1 Définition des scénarios

L'horizon temporel retenu pour les scénarios est l'année 2050. Les huit scénarios étudiés sont synthétisés dans le Tableau 41.

Tableau 41 : Vue d'ensemble des différents scénarios étudiés dans l'ACB.

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		

La définition des scénarios, les hypothèses associées et leurs limites sont détaillés dans la 1^{ère} partie du Volume 2 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.

4.5.1.1 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 42. La capacité de stockage totale des ouvrages structurant est de 1 477 000 m³. La cartographie de ces ouvrages est présentée sur la Figure 62.

Tableau 42 : Statistiques sur les ouvrages structurants et les ouvrages d'hydraulique douce du scénario « actu ».

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

4.5.1.2 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 43). La cartographie de ces aménagements est présentée sur la Figure 86.

Tableau 43 : Statistiques du programme d'aménagement d'hydraulique douce du Syndicat SMBV Pointe de Caux Etretat, actualisé en 2019 et intégré au scénario « amb ».

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
TOTAL		1 148	94,0
Enherbement		646	182,4

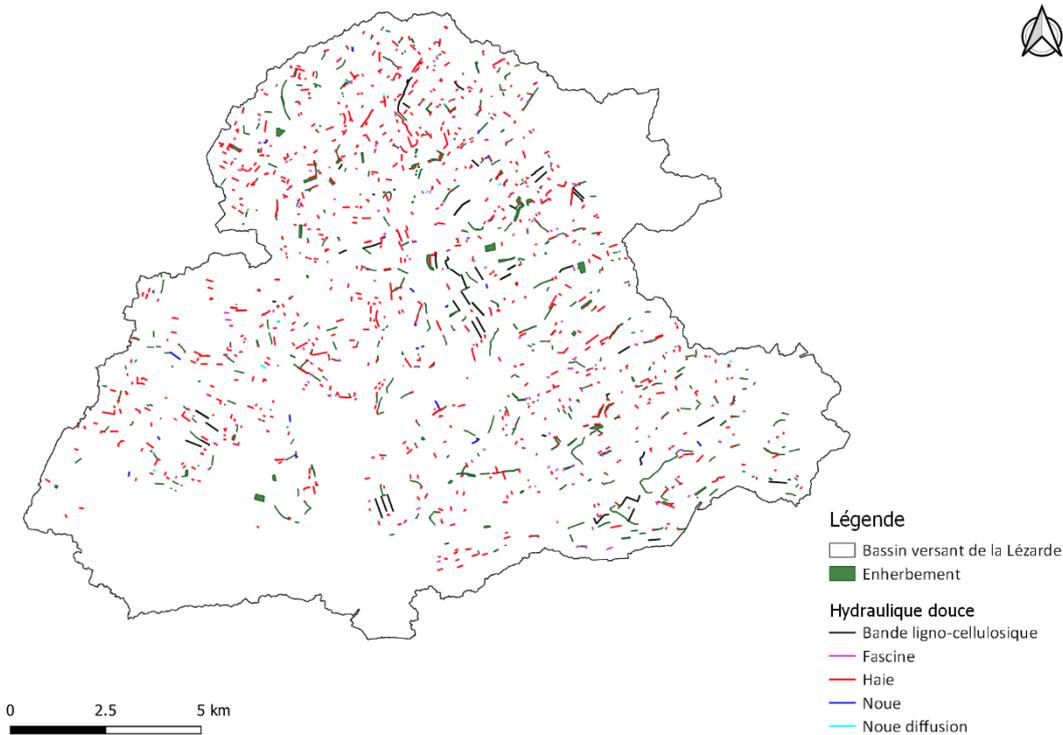


Figure 86 : Cartographie du programme d'aménagement d'hydraulique douce du Syndicat SMBV Pointe de Caux Etrétat, actualisé en 2019.

4.5.1.3 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 la première partie de ce Volume 2, 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 65). 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 5 m. 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 ordonnée 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 87). 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.

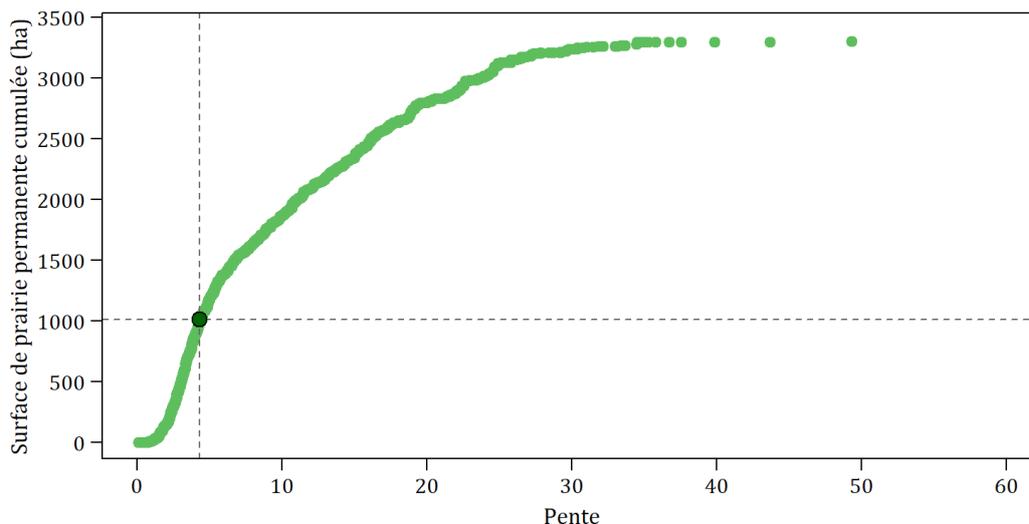


Figure 87 : Superficie cumulée des prairies permanentes sur le bassin de la Lézarde, classée suivant la pente maximale de chaque parcelle de prairie.

A l'issue de cette étape, le pourcentage de prairies retournées est de 31,5 %, soit 1 064 ha. La surface de prairie descend ainsi à 2 318 ha (Figure 88). Un extrait de la cartographie de l'occupation des sols avec retournement de prairies est présenté sur la Figure 89 afin de visualiser leur répartition spatiale.

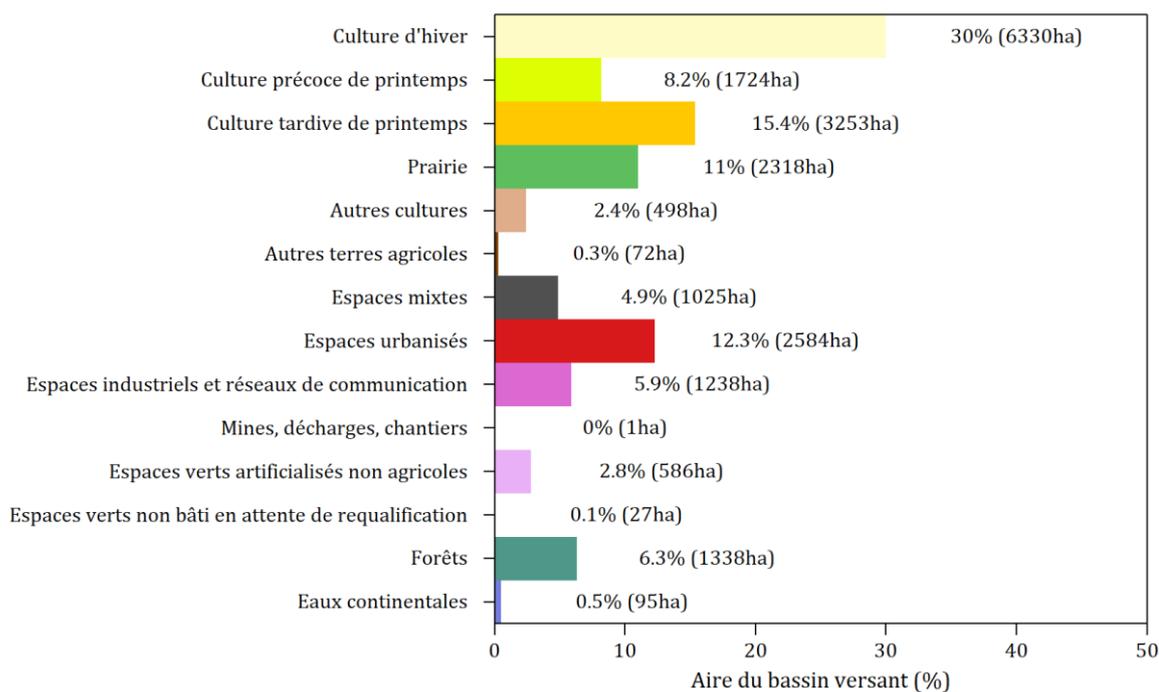


Figure 88 : Statistiques de l'occupation des sols du scénario « herb » sur le bassin de la Lézarde.



Figure 89 : 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.

4.5.1.3 Scénario « herb »

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 44. L'auteur a moyenné les abattements sur le ruissellement et l'érosion par pratique et les résultats sont présentés sur la Figure 90.

Tableau 44 : Liste des mesures de conservation des sols étudiées par Maetens et al. (2012).

SWCT	Description
Crop and vegetation management	
Cc: cover crops	Cover crop during the intercropping season, established after harvest. (e.g. Laloy and Bielders, 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)
Soil management	
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)
Mechanical methods	
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)

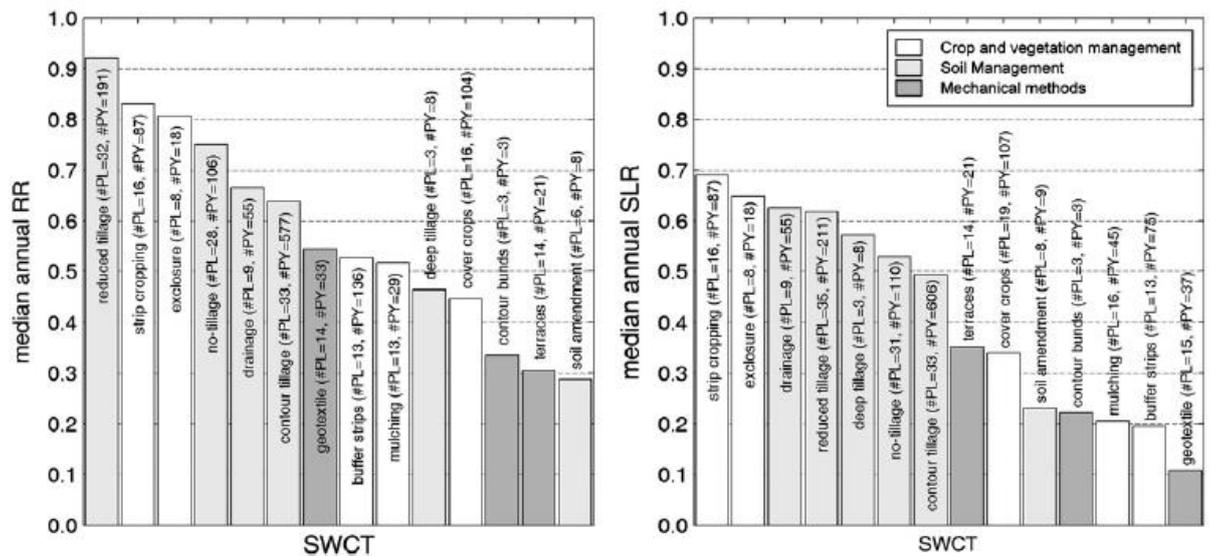


Figure 90 : Ratio médian entre le ruissellement annuel avec mesure et sans mesure (Gauche) et ratio entre le flux sédimentaire annuel avec et sans mesure (Droite) pour différentes mesures de conservation des sols (d'après Maetens et al. (2012)).

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 91.

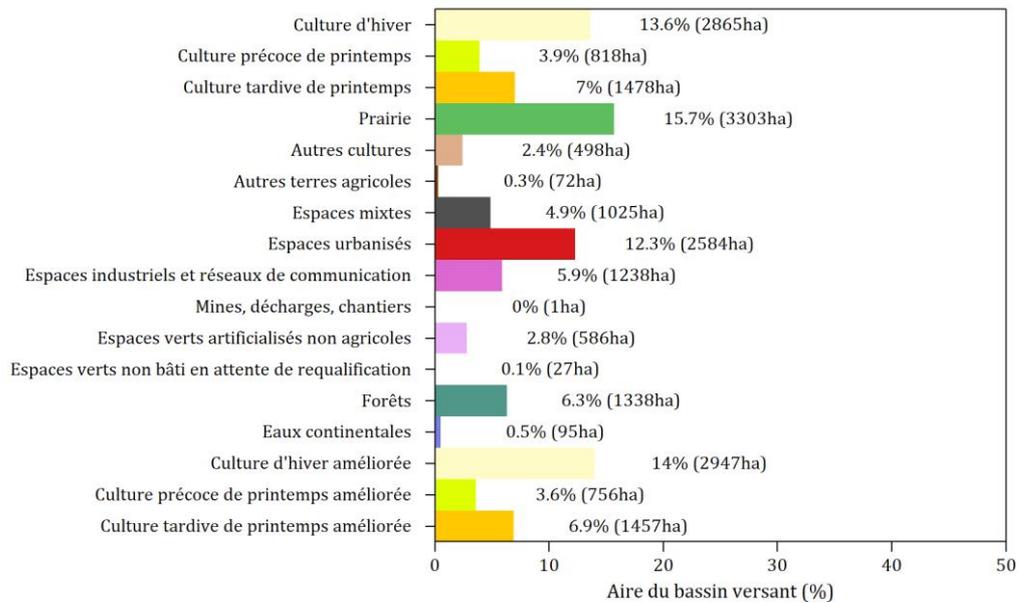


Figure 91 : Statistiques de l'occupation des sols du scénario « agr » sur le bassin de la Lézarde.

4.5.2 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 45. 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.

Tableau 45 : Caractéristiques des pluies de projet.

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

4.5.3 Mesure de l'impact des scénarios

L'impact de chaque scénario, en termes 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^3/s) : débit maximal de ruissellement atteint durant la crue pour un évènement de pluie donné.

4.5.4 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 46 ainsi que sur la Figure 92, la Figure 93 et la Figure 94.

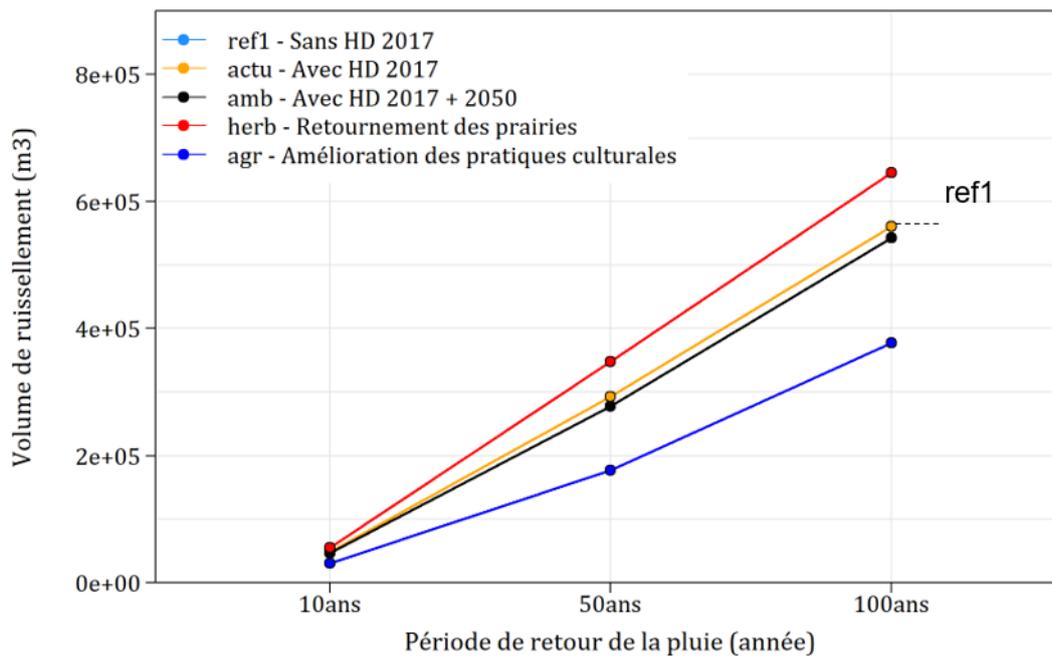


Figure 92 : Volume de ruissellement à Montivilliers pour les cinq scénarios et pour les trois pluies de projet.

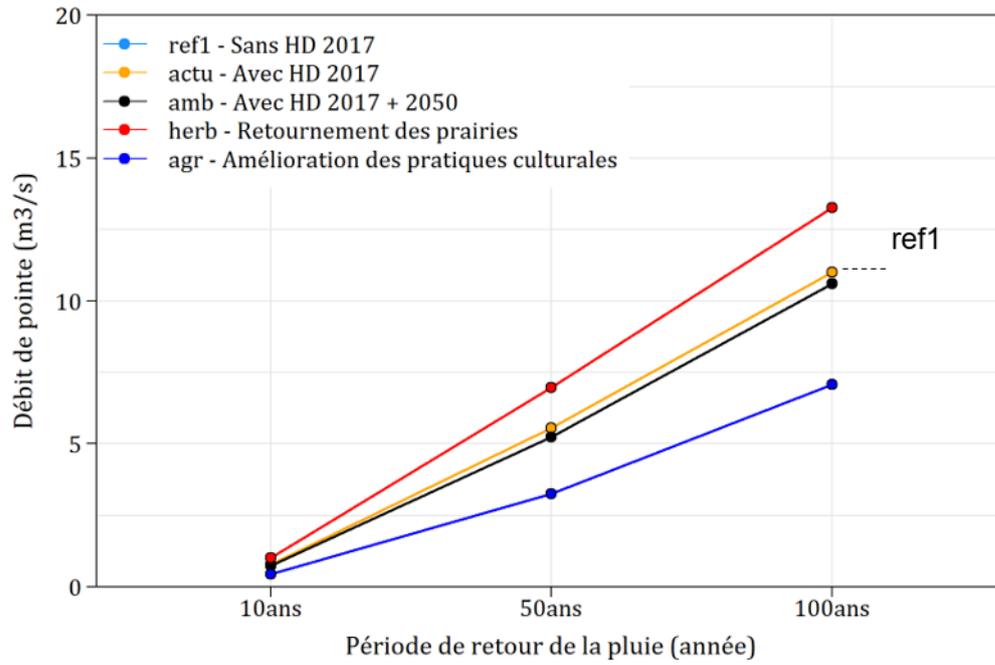


Figure 93 : Débit de pointe à Montivilliers pour les cinq scénarios et pour les trois pluies de projet.

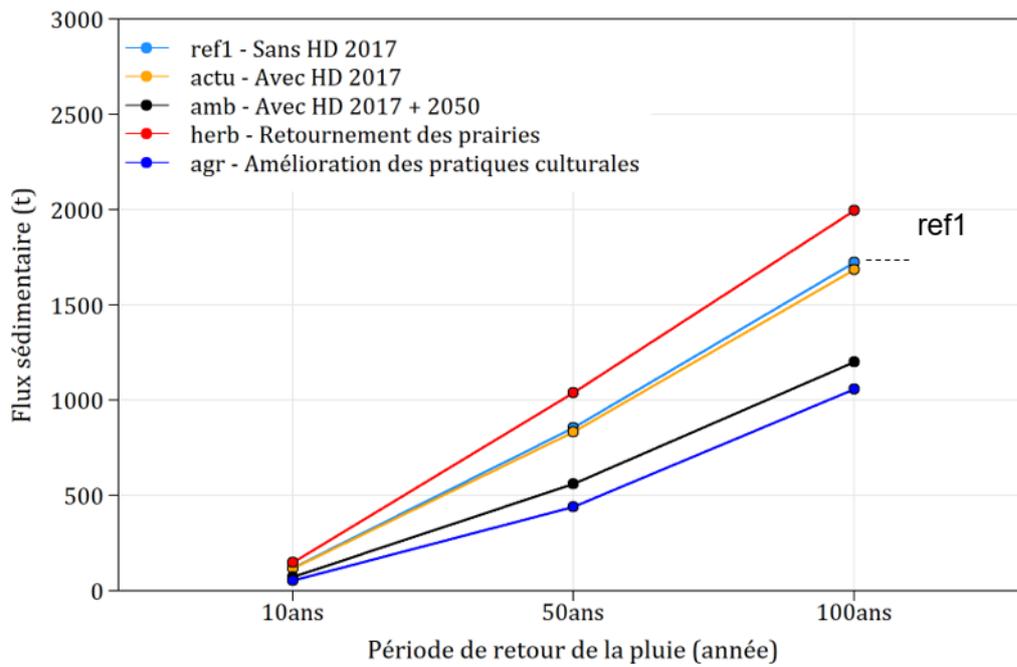


Figure 94 : Flux sédimentaire à Montivilliers pour les cinq scénarios et pour les trois pluies de projet.

Tableau 46 : Synthèse des volumes de ruissellement (A), des débits de pointe (B), et des masses de sédiment transportés par les eaux (C) au droit de la station de 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 ³)	Diff (%)	Volume de ruissellement (m ³)	Diff (%)	Volume de ruissellement (m ³)	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 ³ /s)	Diff (%)	Débit de pointe (m ³ /s)	Diff (%)	Débit de pointe (m ³ /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%

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 m³, un débit de pointe de 5,6 m³/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 km²). 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 km² soit 0,5 aménagements au km².

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 / km² 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.

4.5.5 Effet local et effet global des aménagements

4.5.5.1 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).

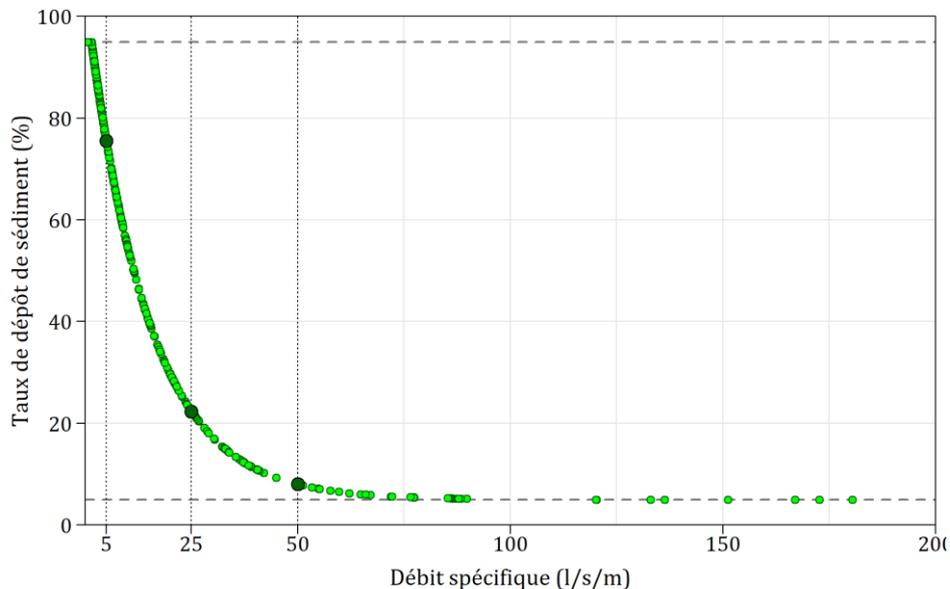


Figure 95 : Fonction de dépôt de sédiments des fascines et des haies dans le modèle WaterSed.

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 (Figure 95). 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'a 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.

4.5.5.2 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 96 pour le scénario « actu » et sur la Figure 97 pour le scénario « amb ».

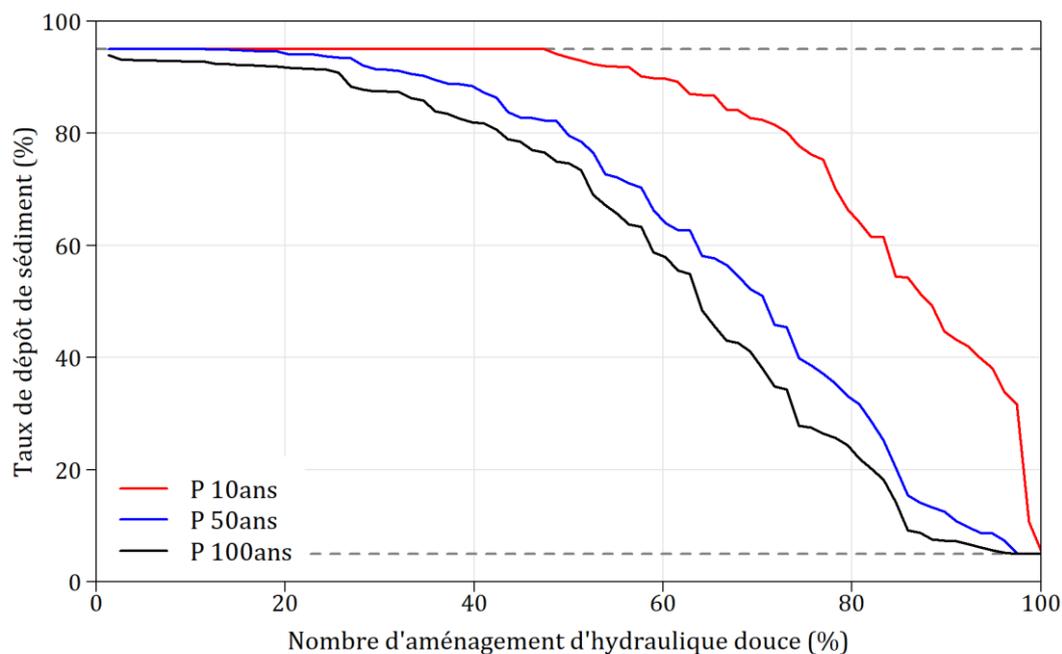


Figure 96 : Taux de dépôt de sédiment des aménagements sur le bassin de la Lézarde pour les trois pluies de projet et pour le scénario « actu » ; les taux de dépôt ont été classés de manière décroissante et exprimés en pourcentage du nombre d'aménagement total. Les pointillés correspondent aux bornes 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 96).

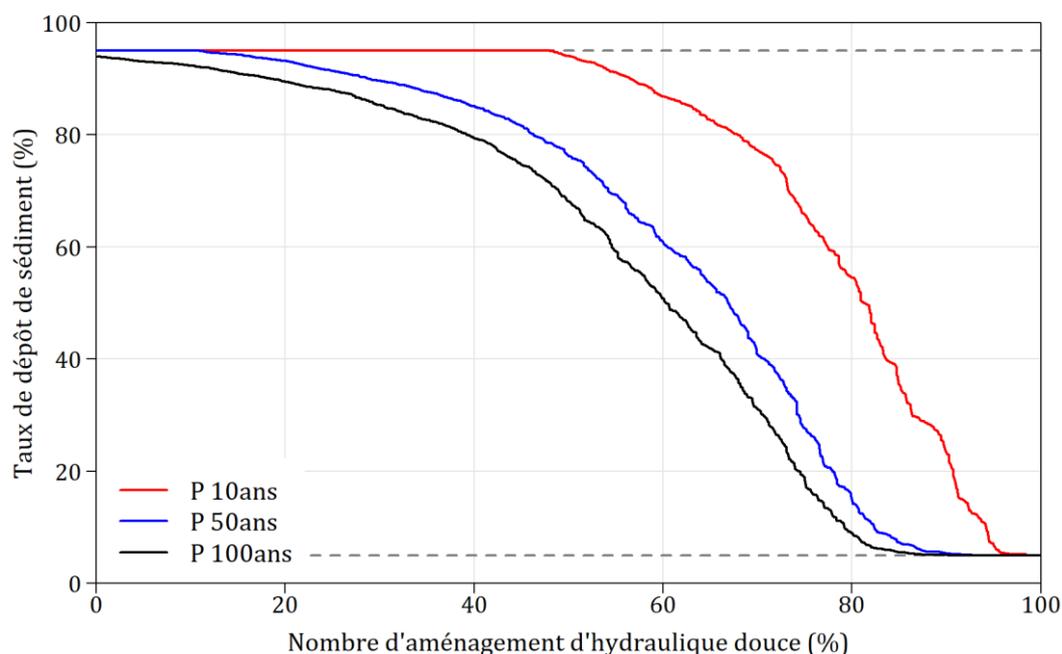


Figure 97 : Taux de dépôt de sédiment des aménagements sur le bassin de la Lézarde pour les trois pluies de projet et pour le scénario « amb » ; les taux de dépôt ont été classés de manière décroissante et exprimés en pourcentage du nombre d'aménagement total. Les pointillés correspondent aux bornes 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 97).

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 scénario « 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.

Finalement, 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. (2012a). 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.

4.5.5.2 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 46), par rapport au scénario « ref1 ».

Pour comprendre cette diminution de l'abattement entre les échelles spatiales, un cas synthétique est présenté sur la Figure 98. 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 / km² ; Tableau 42), 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 culturaux 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 / km²) et des aménagements positionnés en cascade. Dans ces conditions, l'abattement reste élevé malgré l'augmentation de l'échelle spatiale (Figure 99). 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 100).

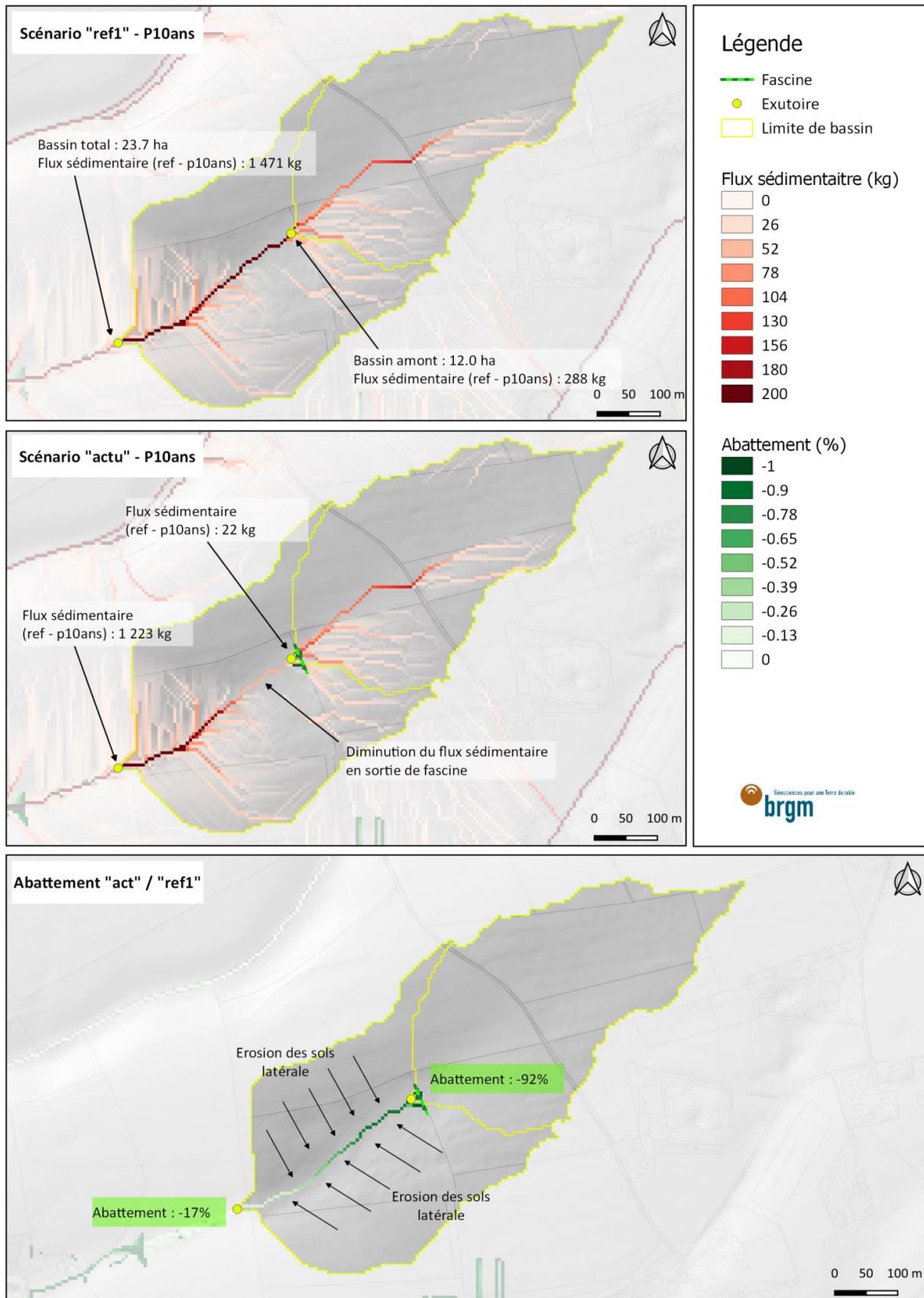


Figure 98 : Cas synthétique illustrant la diminution de l'impact d'une fascine avec l'augmentation de l'échelle spatiale. Les cartographies des flux sédimentaires présentées pour le scénario « ref1 » et « actu » sont celles de la pluie de période de retour 10 ans.



Figure 99 : Cas synthétique illustrant le principe d'aménagement en cascade permettant de maintenir un abattement élevé aux différentes échelles spatiales.

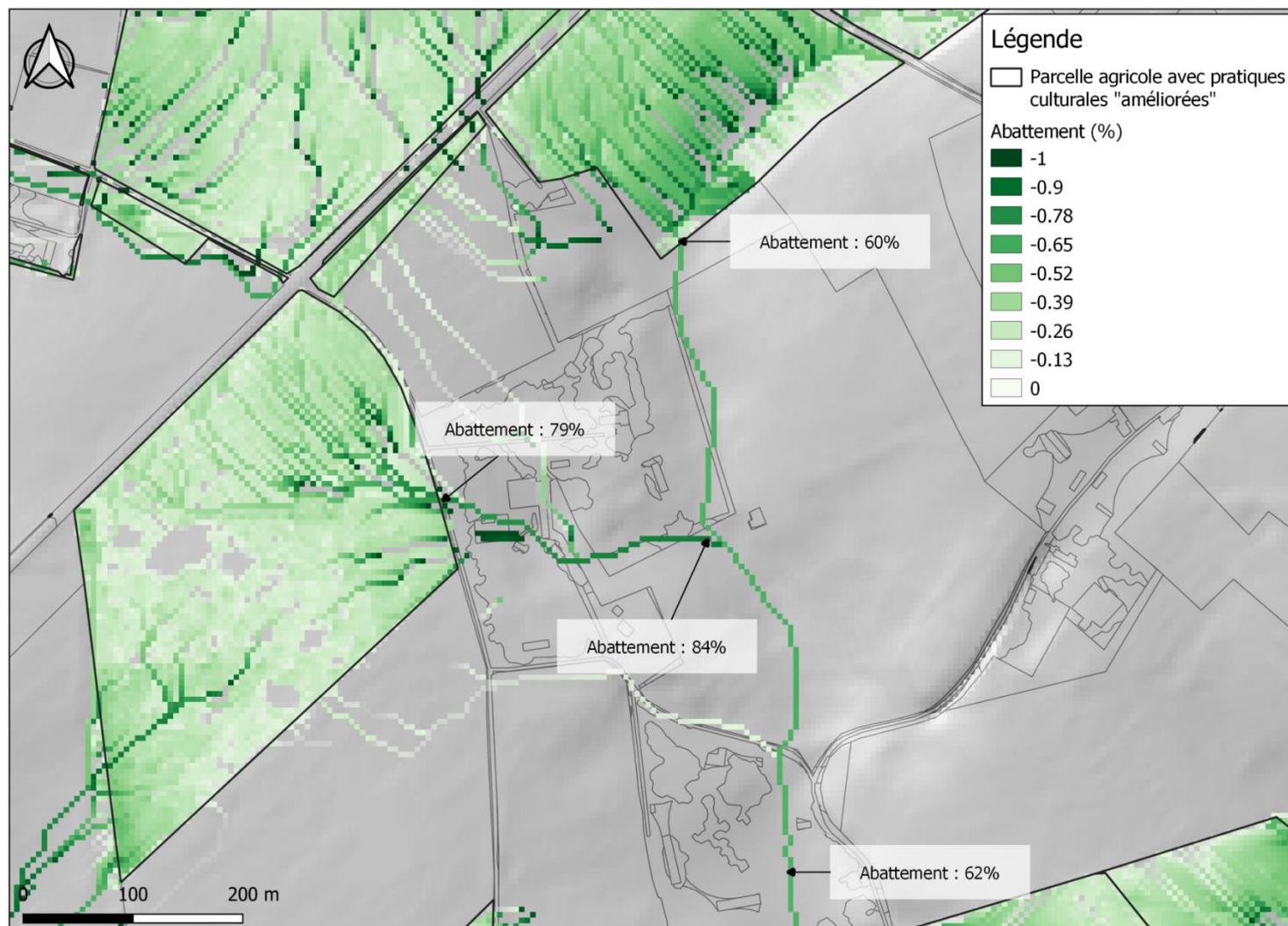


Figure 100 : Cas synthétique illustrant l'impact bénéfique de l'amélioration des pratiques culturales aux différentes échelles spatiales.

4.5.6 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 la Figure 101 et la Figure 102.



Figure 101 : Extrait de la cartographie des hauteurs d'eau pour le scénario « ref1 » et pour la pluie de période de retour 10 ans.



Figure 102 : Extrait de la cartographie des flux sédimentaires pour le scénario « ref1 » et pour la pluie de période de retour 10 ans.

4.5.6.1 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 103).

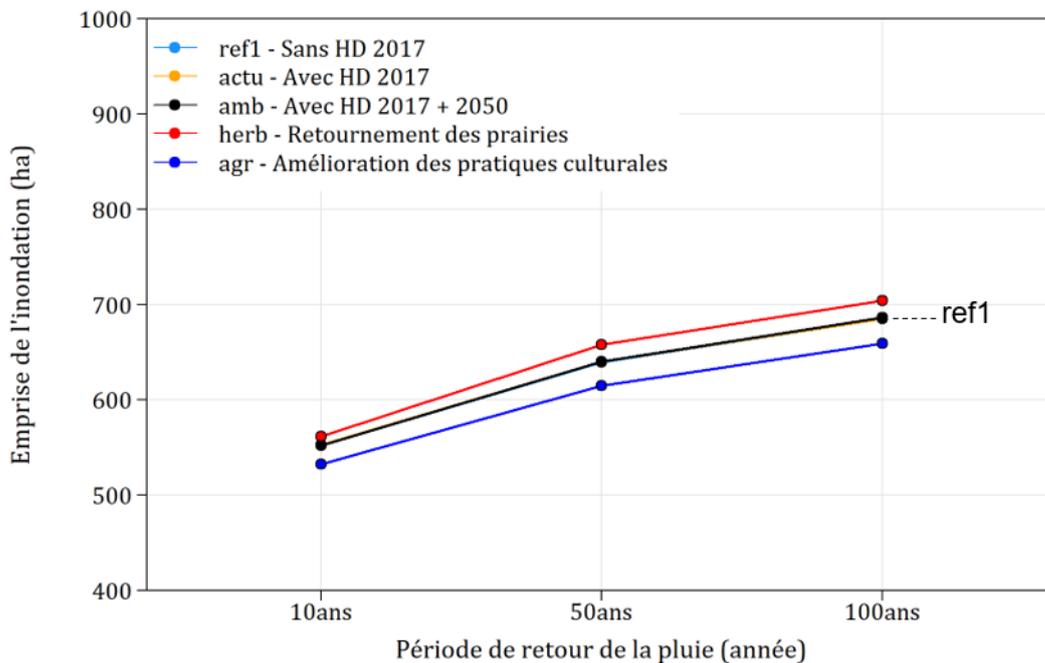


Figure 103 : Emprise de l'inondation pour chaque scénario et pour chaque pluie de projet sur le bassin de la Lézarde.

Les résultats sont accord avec ceux décrits au droit de la station de Montivilliers (Tableau 46). 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 47).

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 552 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 m³/s pour P10ans et 11,0 m³/s pour P100 ans.

Tableau 47 : Emprise de l'inondation pour chaque scénario et pour chaque pluie de projet sur le bassin de la Lézarde.

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%

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) à la suite d'un évènement majeur semble maintenant réalisable pour identifier les limites et les pistes d'amélioration de la méthode de cartographie des inondations par ruissellement.

4.5.6.2 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 de 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 104 et le Tableau 48.

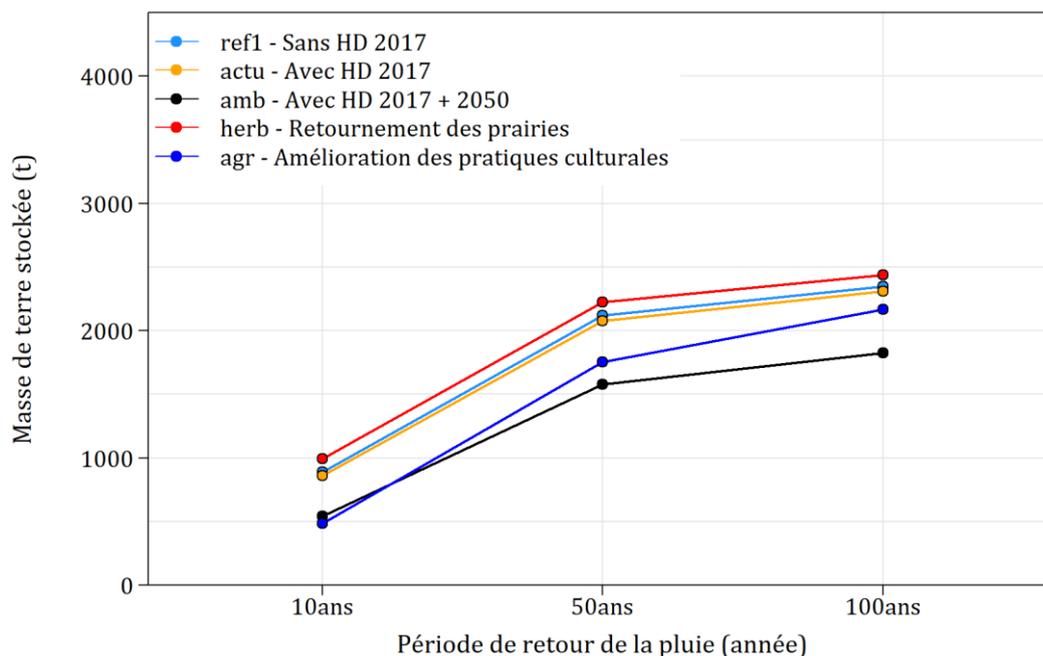


Figure 104 : Masse totale de sédiment piégée par l'ensemble des ouvrages du bassin de la Lézarde pour chaque scénario et chaque pluie de projet.

Tableau 48 : 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%

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 49).

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.

Tableau 49 : 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.

Scenarior	P100ans				
	Erosion brute (t)	Diff (%)	Dépôt hydraulique douce (t)	Dépôt ouvrage (t)	Diff (%)
Ref1 - Scénario de référence BRGM	10 841			2347	
Amb - Hydraulique douce 2017 + 2050	10 717	-1%	1 081	1824	-22%
Agr - Amélioration des pratiques culturales sur 50% des cultures	8 427	-22%		2167	-8%

Finalement, 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 ce problème.

A 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.

5 Bilan du volume 2

Le programme EVAPORE a pour objectif d'évaluer les actions menées depuis 2000 en Haute-Normandie afin de réduire les impacts du ruissellement et de l'érosion. Pour y parvenir, une analyse coûts-bénéfices des actions réalisées depuis 2000 est menée sur un territoire pilote, le bassin versant de la Lézarde (76).

Cette analyse s'appuie sur la mise en œuvre de 2 modèles complémentaires (modèle hydrologique-hydraulique Mike et modèle de transfert hydro-sédimentaire WaterSed), qui ont permis de produire des cartographies d'aléa inondation par débordement de cours d'eau, d'inondation par ruissellement et coulées boueuses pour plusieurs scénarios et périodes de retour.

Les 3 scénarios de base permettent d'évaluer l'effet des ouvrages de rétention et des aménagements d'hydraulique douce créés depuis 2000, dans le contexte actuel. Le scénario d'aménagement ambitieux vise à simuler l'effet d'un programme d'aménagement d'hydraulique douce mené à terme. Enfin, 3 scénarios prospectifs ont également été construits afin de mesurer l'efficacité des mesures existantes dans des contextes futurs différents, du point de vue de l'occupation du sol ou du climat.

Les résultats du modèle hydrologique-hydraulique (Mike) montrent que les ouvrages structurants de rétention réduisent significativement les surfaces inondées par débordement de rivière (-37% pour la période de retour 10ans). L'effet de ces ouvrages serait amoindri dans le futur pour le scénario de réduction des surfaces en herbe (+24% de surfaces inondées pour T 10 ans). Au contraire, une adoption de pratiques agricoles limitant le ruissellement sur 50% des surfaces en cultures viendrait renforcer l'effet des ouvrages structurants (-30% de surfaces inondées pour T 10 ans). Les différences d'aléa entre scénarios ont tendance à diminuer lorsque la période de retour augmente.

Les résultats du modèle de transfert hydro-sédimentaire (WaterSed) confirment que les aménagements d'hydraulique douce même dans le scénario ambitieux ont très peu d'impact sur le volume de ruissellement et sur le débit de pointe dans la rivière. La densité d'aménagements actuels (0,5/km²) est insuffisante pour réduire significativement le flux sédimentaire à l'échelle du bassin versant. En revanche le scénario ambitieux (5,5 aménagements/km² et 182 ha de zones enherbées) pourrait réduire de 35% le flux sédimentaire à l'échelle du BV (T 50ans). Le scénario de réduction des surfaces en herbe dégraderait la situation actuelle (+19% de volume de ruissellement et + 22% de flux sédimentaire pour T 50 ans). Le scénario de modification des pratiques agricoles sur 50% des surfaces cultivées réduirait fortement le ruissellement (-40% pour T 50 ans) et le flux sédimentaire (-49% pour T 50 ans).

Ces modèles présentent plusieurs limites : difficultés à représenter l'infiltration dans les talwegs secs et bétoires, ainsi que les dépôts de boue sur voirie et dans les bâtiments.

Les cartographies d'aléa produites par ces 2 modèles doivent être croisées avec les enjeux du territoire pour évaluer l'impact économique de chaque scénario. C'est l'objet de la partie économique de l'analyse coûts bénéfices du bassin versant de la Lézarde, détaillée dans le volume 3.

Volume 3 :

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

1 Introduction du volume 3

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.

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 = ref0 ou ref1) 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 selon l'équation 10 :

$$VAN = BTA - CTA = \sum_{i=1}^n \frac{DEMA_i}{(1+r)^i} - \sum_{i=1}^n \frac{CI_i + CE_i}{(1+r)^i} \quad \text{Eq. (10)}$$

Avec BTA les bénéfices totaux actualisés, CTA les coûts totaux actualisés, $DEMA_i$ les DEMA de l'année i , r le taux d'actualisation, CI_i les coûts d'investissements de l'année i , et CE_i 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 105 illustre les étapes suivies pour la réalisation de l'ACB appliquée aux risques d'inondation et de coulée de boue. 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).

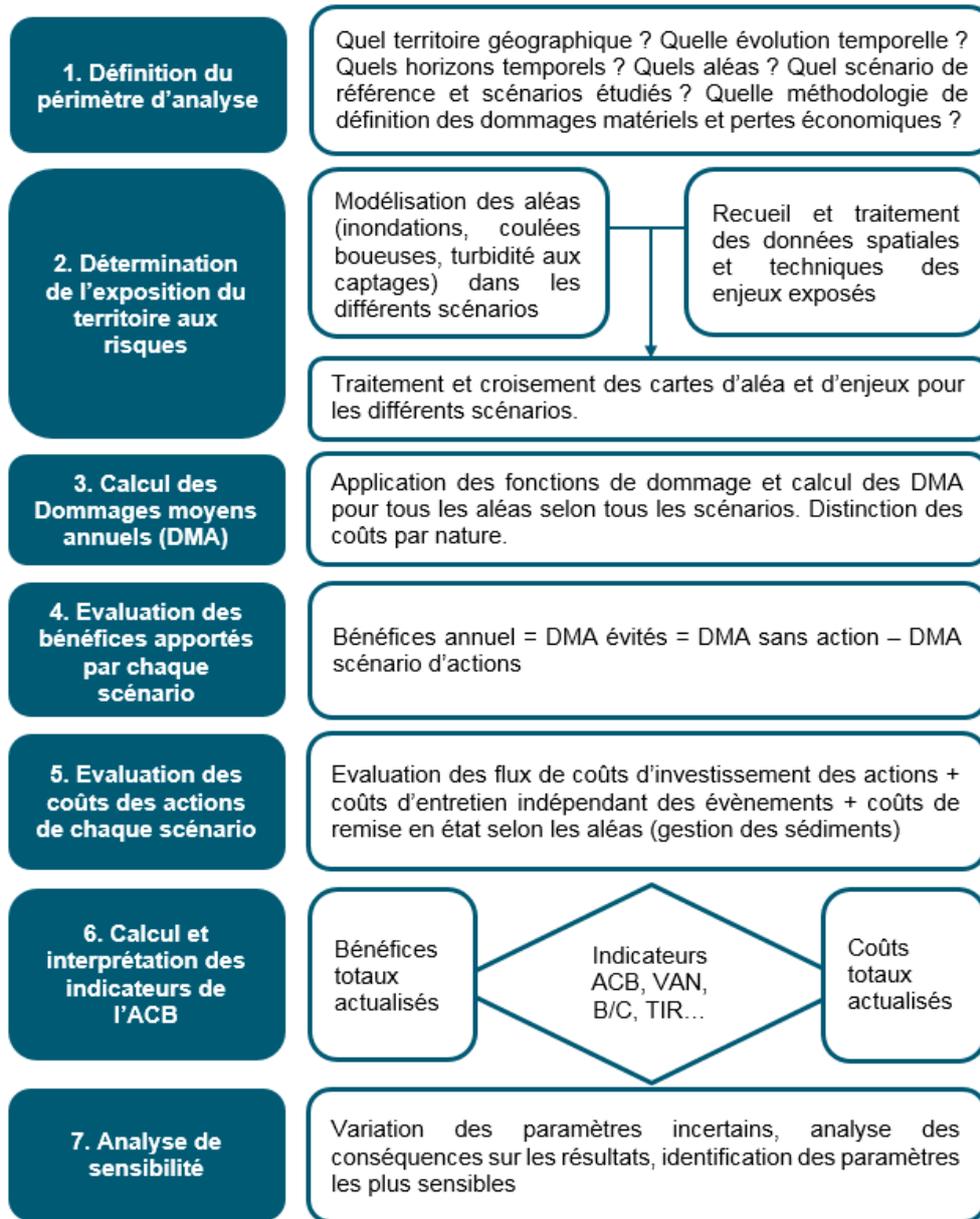


Figure 105 : Synoptique des grandes étapes de l'ACB, adapté de (CEPRI, 2011).

2 Définition du périmètre d'analyse

2.1 Echelle 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 œuvre. 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 observée⁹.

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.

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)¹⁰. 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)¹¹.

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.

⁹ 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.

¹⁰ <https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/000008630>

¹¹ <https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010538794>

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. 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 dans le volume 4 de ce rapport.

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 51 et le Tableau 52), 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 volume 2 de ce rapport. Pour chaque scénario, différents résultats de simulation sont utilisés. Le Tableau 50 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

Tableau 50 : Synthèse des résultats de modélisation des aléas utilisés pour le calcul économique dans chacun des scénarios.

Scénarios		ref0	ref1	actu	amb	ccm	ccf	herb	agr
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
Erosion	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

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 dommages¹² (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.

¹² 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.

Tableau 51 : Périodes de retours retenues pour la prise en compte du changement climatique dans la modélisation des phénomènes de débordement.

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

	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

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 ;
 - ➔ Etablissement économique ;
 - ➔ Etablissement 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 106 et Figure 107).

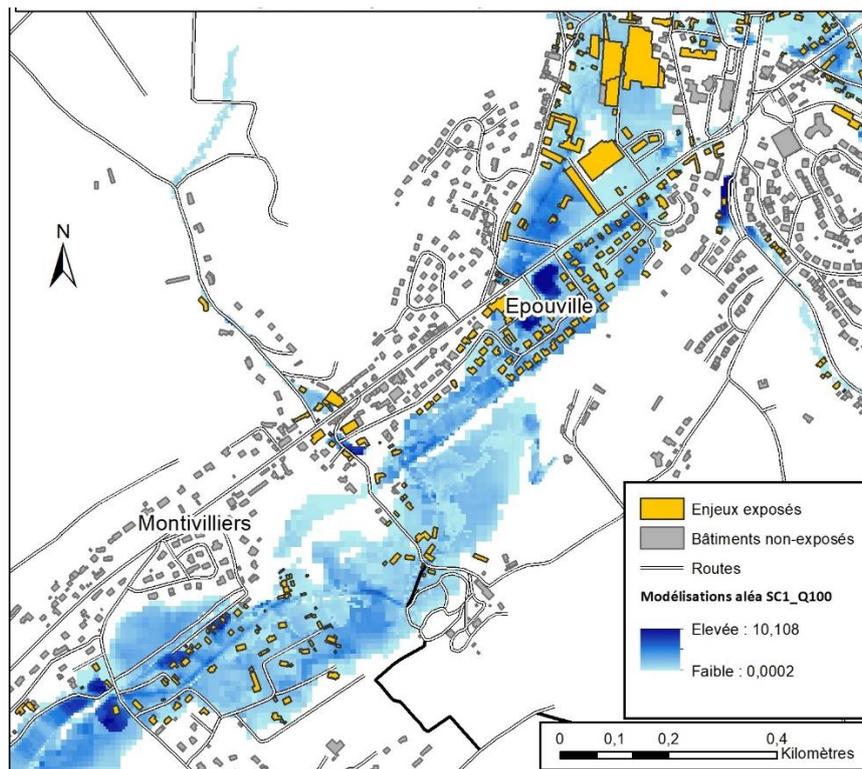


Figure 106 : Zoom sur une zone exposée à l'inondation par débordement de cours d'eau pour un évènement d'occurrence centennale et identification des enjeux exposés.

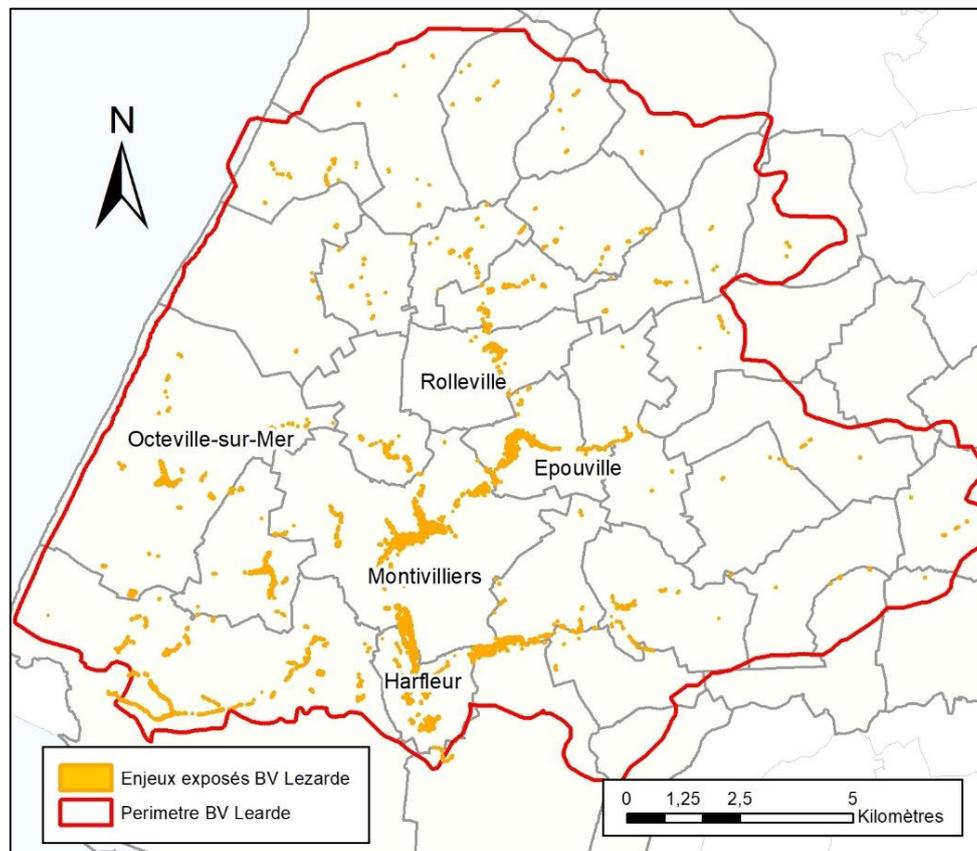


Figure 107 : Répartition géographique des bâtiments exposés aux aléas d'occurrence centennale.

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 20m² 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 (Tableau 53). Finalement c'est 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.

La campagne de visite de terrain s'est déroulée sur une semaine. L'enquêteur Sigiste était équipé d'une tablette équipée de collector 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.

Tableau 53 : Synthèse des bâtiments exposés au risque et qualifiés pour les besoins de l'ACB.

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 %
TOTAL	1 748	322	1 820	250	2070	100 %

4 Evaluation 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 3.1 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 (Figure 108).

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.

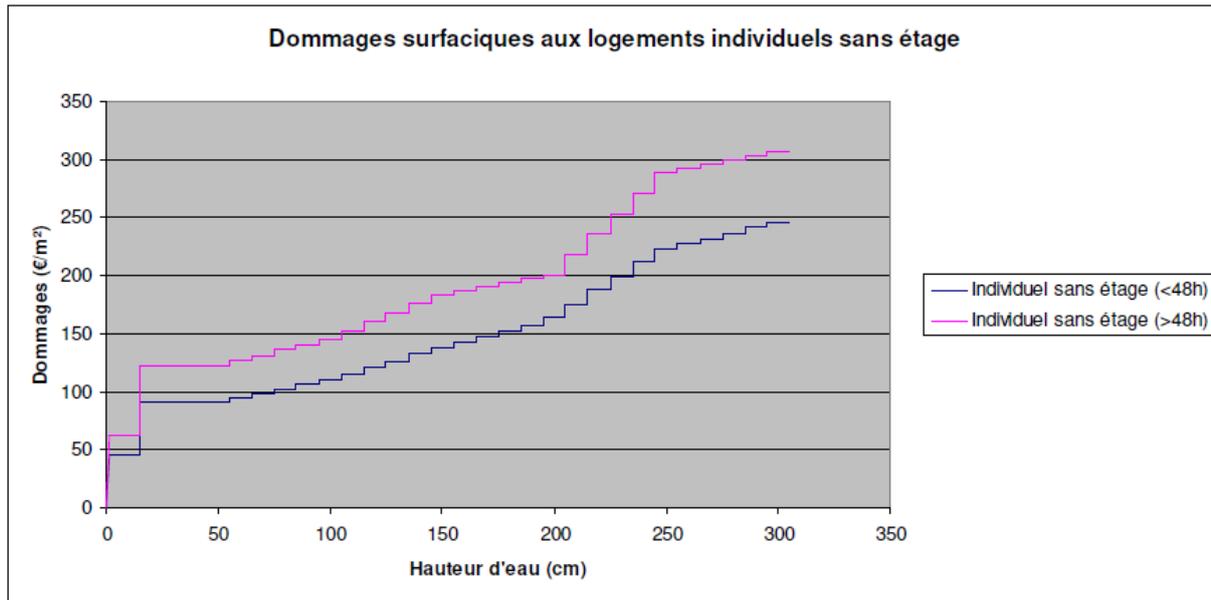


Figure 108 : Exemple de fonctions de dommage utilisées extraites du guide du CGDD de 2018.

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^2 ;
- 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. A 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 données 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

4.3.2.1 Centre commercial de Montivilliers – La Lézarde

Ce centre commercial apparaît 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 109). Comme pour les autres entreprises, le code NAF et le nombre d'employés a pu être retrouvé dans la base SIRENE.

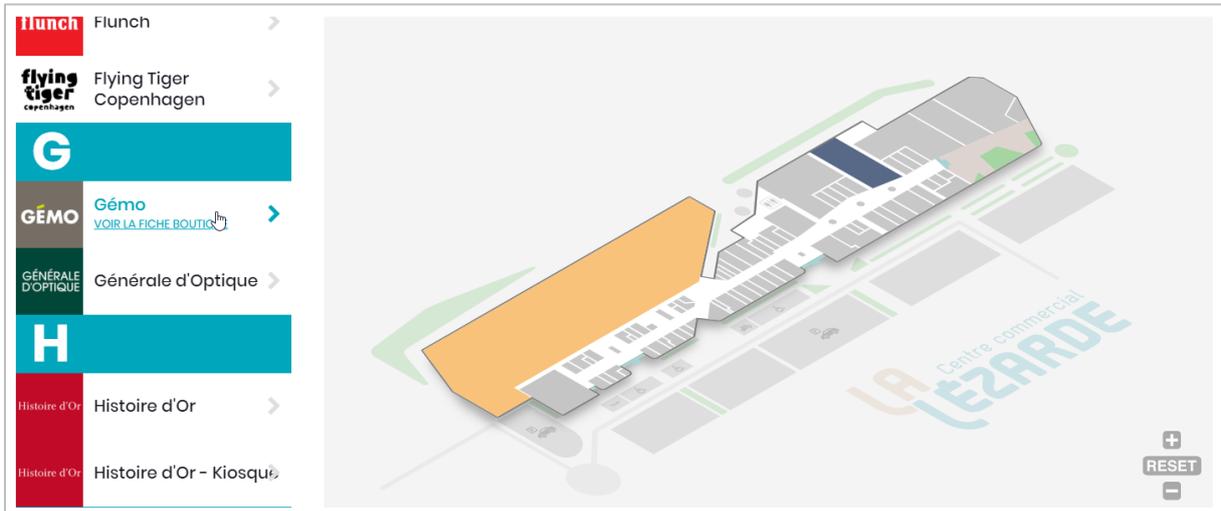


Figure 109 : Extrait du site internet du centre commercial de la Lézarde (source : <https://www.lezarde.fr/boutiques/>).

Le Tableau 54 présente les codes NAF et les pondérations utilisées pour construire deux fonctions de dommage spécifiques au centre commercial (Figure 110).

Tableau 54 : Statistiques utilisées pour la construction des deux fonctions de dommage spécifiques au centre commercial de la Lézarde.

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

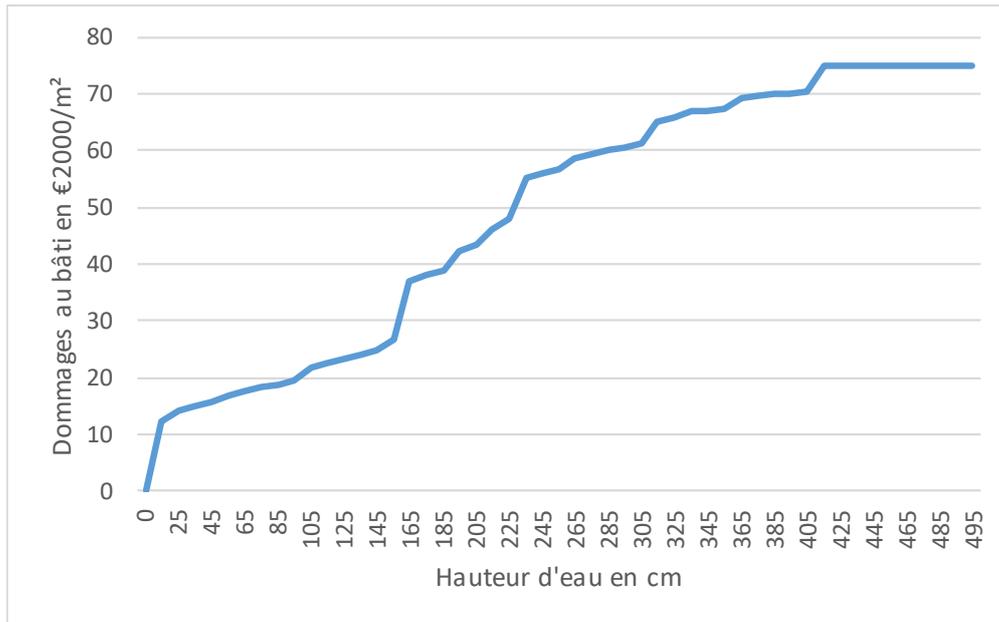


Figure 110 : Fonction de dommage au bâtiment du centre commercial de la Lézarde.

4.3.2.2 Etablissements 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 1,5M€. 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 M€. 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 55 présente les établissements concernés par des montants de dommage potentiellement supérieurs à 1,5M€ et pour lesquels une analyse spécifique de leur vulnérabilité devrait être réalisée pour fiabiliser l'ACB.

Tableau 55 : 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.

Etablissement	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

4.4 Dommages aux établissements publics

Le guide du CGDD fournit des fonctions de dommages pour sept catégories types d'établissements publics (Figure 111) :

- 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.

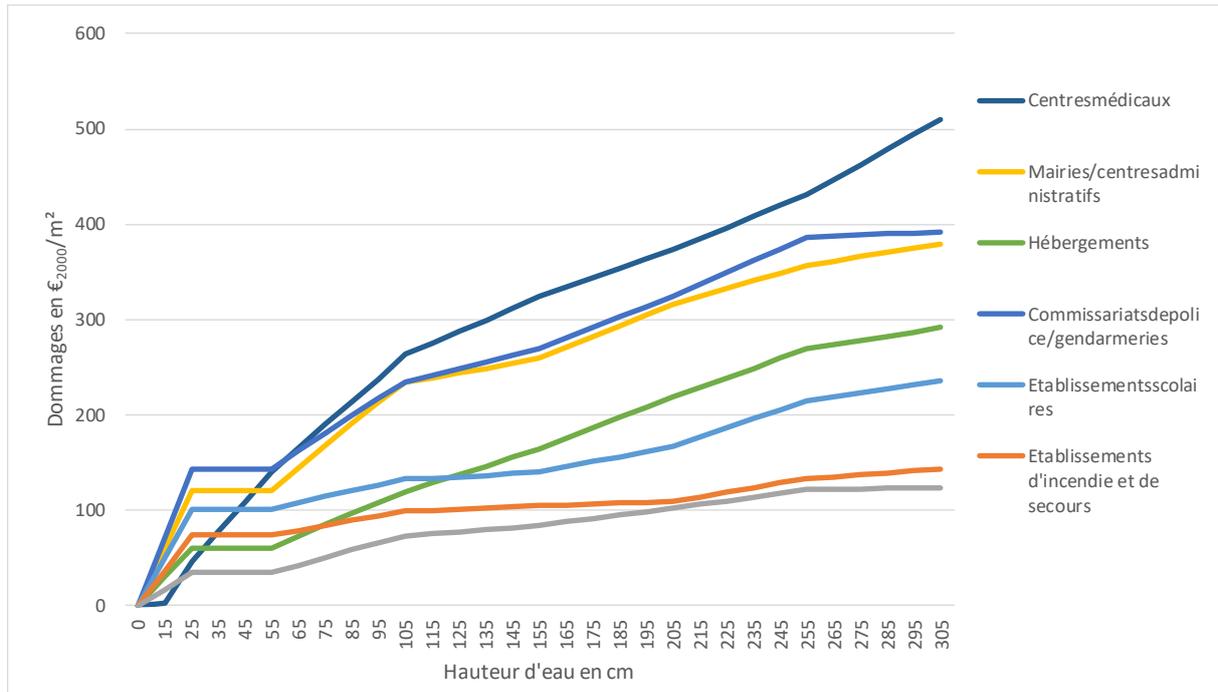


Figure 111 : Courbes d'endommagement aux bâtis et équipements des établissements publics.

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 des 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 termes de réparation (coûts directs) mais aussi au regard des conséquences relatives aux pertes de service (coûts indirects) (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 ; Przulski and Hallegatte, 2011 ; Hammond et al., 2015). 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 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 (à la suite d'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 (Lekuthai and Vongvisessomjai, 2001 ; Floyd and Tunstall, 2005 ; Markantonis et al., 2012 ; Frongia et al., 2016).

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 Evaluation 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 56 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. 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.

Tableau 56 : Liste et quantité des ouvrages considérés dans les modélisations.

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 ³		
	Mare/bassin	41	184 767 m ³		
	BLC			54	17 480 ml
	Noüe			21	1 935 ml
	Noüe diffusion			14	607 ml
Enherbement			646	1 824 359 m ²	
Hydraulique structurante	Bassin/barrages	33	594 083 m ³	33	594 083 m ³
	Barrage	21	369 510 m ³	21	369 510 m ³

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, m³ ou m². 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 publics¹³ a été utilisé (Figure 112).

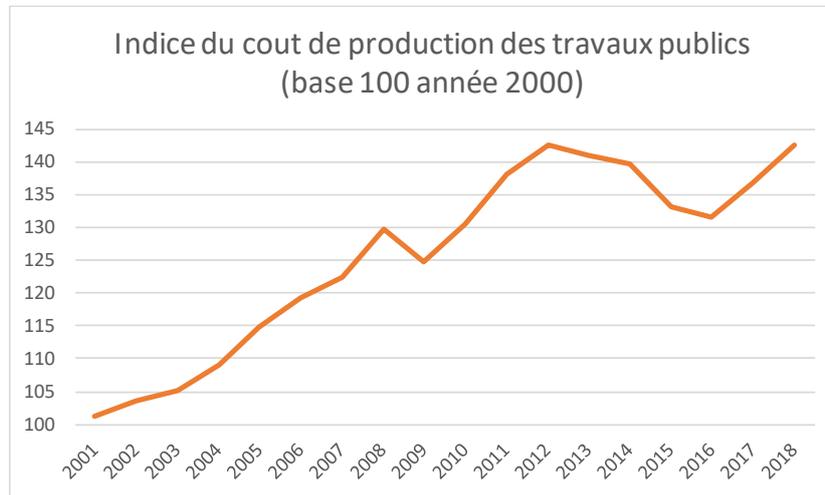


Figure 112 : Indice du coût de production des travaux publics (base 100 année 2000 ; Source INSEE).

5.2.1 Coûts relatifs aux ouvrages d'hydraulique structurante

Le détail des éléments présentés dans ce chapitre se trouvent dans le volume 1 de ce rapport. 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^{er} 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 m³ 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 113 présente la construction de ces fonctions de coût d'investissement.

¹³ <https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010566988#Tableau>

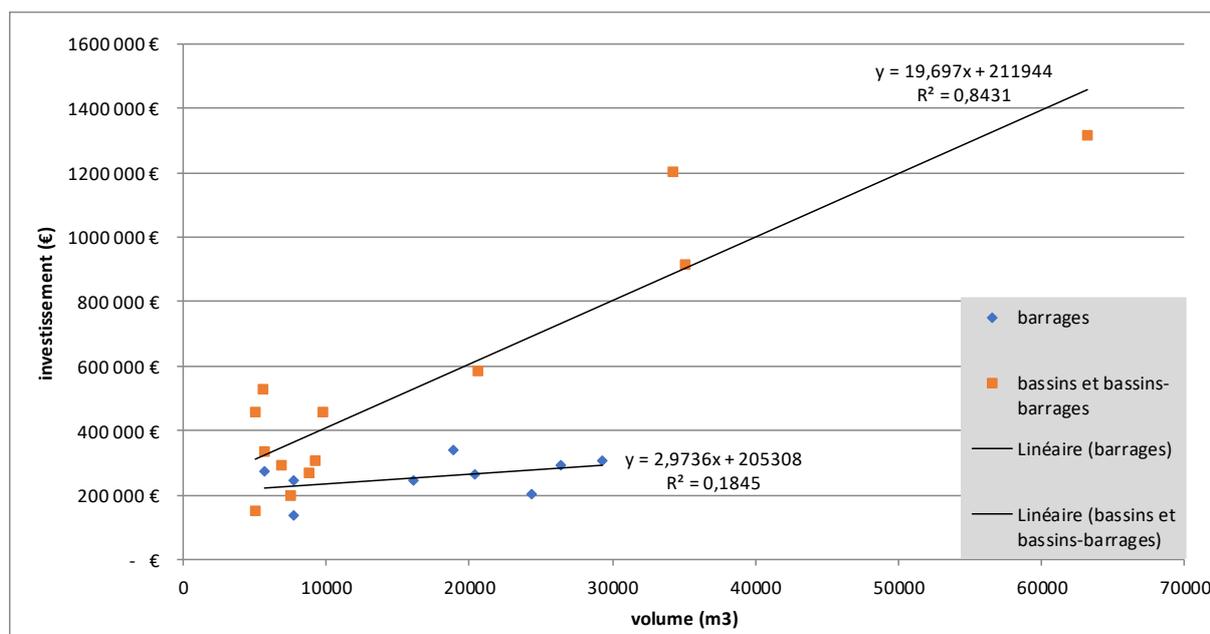


Figure 113 : Construction des fonctions de coût d'investissement pour les ouvrages d'HS (€₂₀₀₀).

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, et les visites réglementaires (visites techniques approfondies) (Tableau 57).

Tableau 57 : Coûts d'entretien du parc d'ouvrages structurants.

Nb d'ouvrages en 2017	54
Temps passé au suivi ordinaire (5 ETP ¹⁴ /154 ouvrages)	3750 €/an/ouvrage
Suivi en temps de crise (ETP)	NC
Espaces verts	1000 €/an/ouvrage
Entretien ordinaire	990 €/an/ouvrage
Remise en état suite à inondations (dont traitement de bétoures, hors curage)	200 €/an/ouvrage
Curage réguliers (hors curages ponctuels post-événement)	940 €/an/ouvrage
Total	6880 €/an/ouvrage

A 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 à la suite de l'ouverture d'une bétoure, 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

¹⁴ <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1371004>

moyen d'évacuation des sédiments. Le coût de gestion des sédiments retenus est de 20€/m³ curé et évacué.

Concernant la réhabilitation à la suite de 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 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 parait 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 calculée 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 Erosion 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 €₂₀₀₀/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 58 présente les valeurs de référence identifiées et retenues pour la construction des coûts forfaitaires utilisés dans le calcul économique.

Tableau 58 : Résumé des coûts de références utilisés et des valeurs retenues pour le chiffrage des actions relatives aux ouvrages d'hydraulique douce.

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]
BLC	2 600 €HT/ha	350 €HT/ha	2016	20€/ml		[3]
			non précisé	2100€/ha	600€/ha/2ans	[8] [10]
			non précisé	2800-3000€ha	400/ha/an	[9] [11]

[1] CA Hauts-de-France, 2018

[2] Ramaekers, 2018

[3] LIOSE, 2018

[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

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 59 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.

Tableau 59 : Coûts utilisés pour l'hydraulique douce.

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

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 60). 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 60. La Figure 114 offre une représentation plus visuelle de ces mêmes résultats. Tous les résultats sont exprimés en euros de l'année 2000.

Tableau 60 : Montant des dommages causés par les débordements de cours d'eau en k€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
	TOTAL	9 461	5 016	6 222	2 677
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
	TOTAL	17 775	11 184	16 740	10 797
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
	TOTAL	29 415	23 085	23 939	20 789
DMA		3 585	1 359	1 732	1 091
DEMA			2 227	1 853	2 495

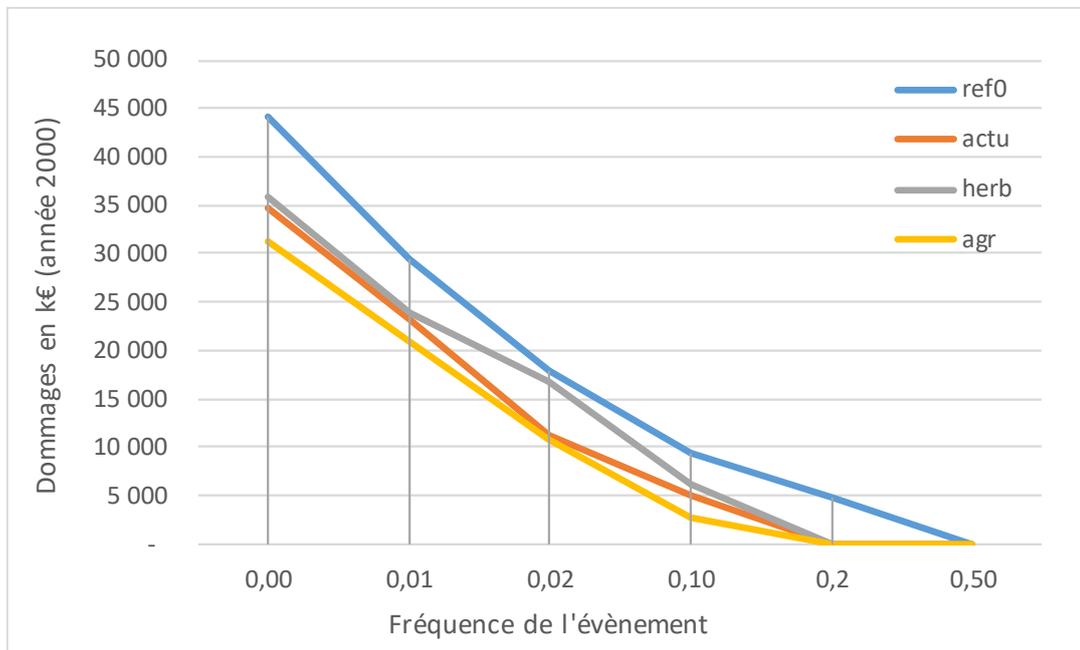


Figure 114 : Courbes fréquence-dommage pour l'aléa débordement de cours d'eau dans les scénarios sans changement climatique.

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 115 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 61) 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.

Tableau 61 : Résultats des deux indicateurs synthétiques de l'analyse coût-bénéfice pour le scénario de débordement avec et sans changement des pratiques agricoles.

	VAN en M€ ₂₀₀₀	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

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.

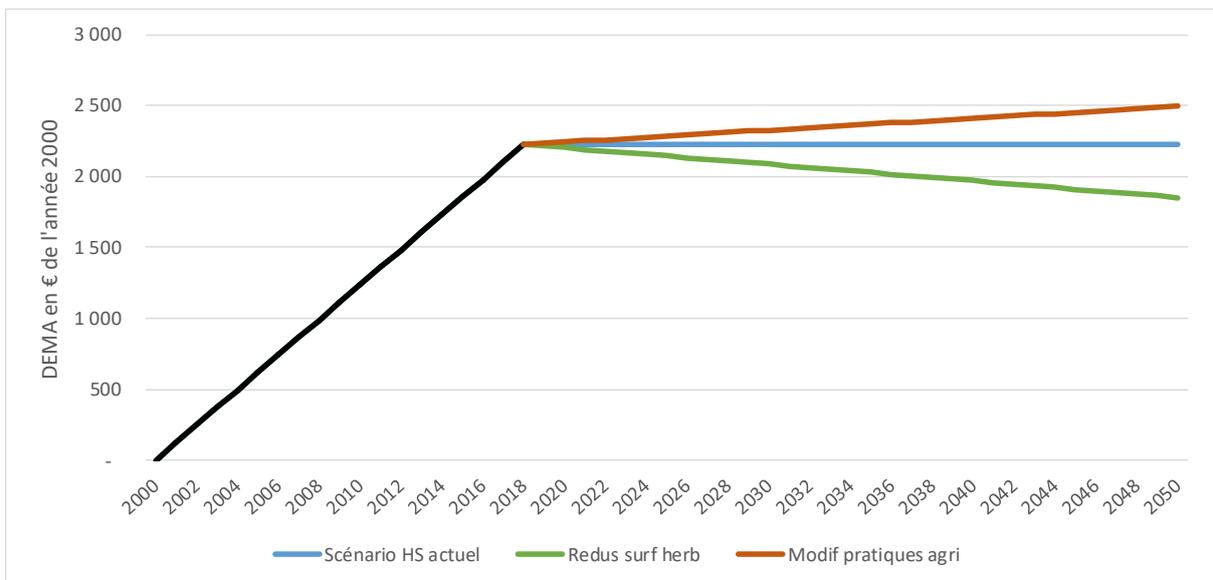


Figure 115 : Evolution des dommages évités moyens annuels (DEMA) des ouvrages d'hydraulique structurante dans les scénarios sans et avec évolution des pratiques agricoles.

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 volume 2, 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. La Figure 116 montre l'évolution des DEMA dans les scénarios avec CC en regard du scénario sans CC.

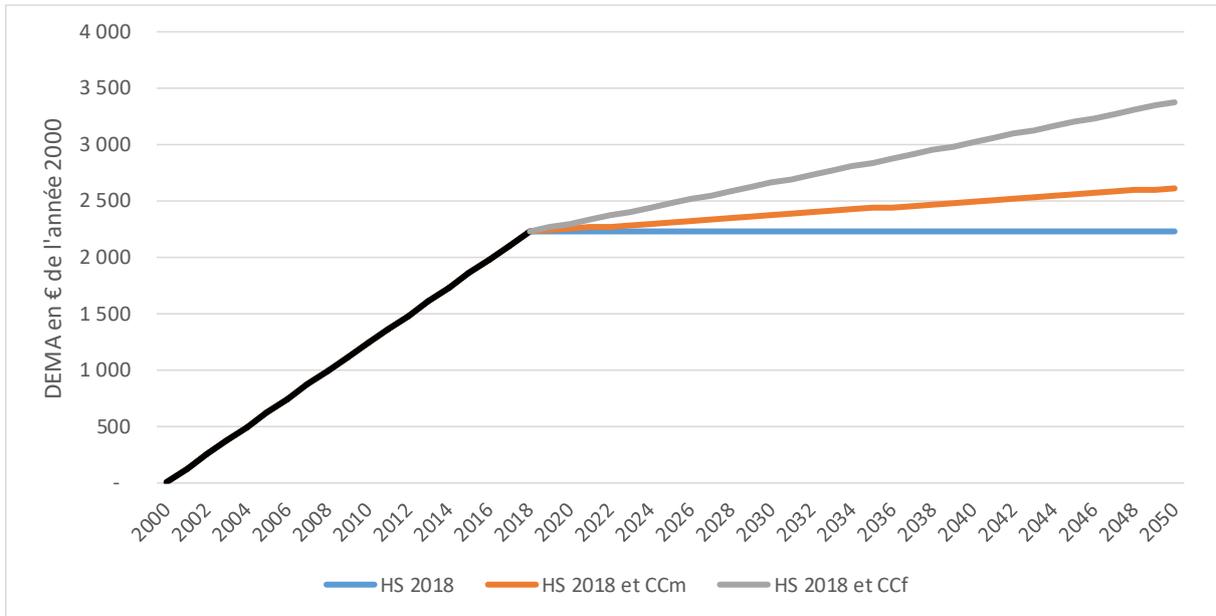


Figure 116 : Evolution des dommages évités moyens annuels (DEMA) avec et sans changement climatique.

Les bénéfices des aménagements d’HS sont significativement renforcés par la perspective d’un changement climatique (Tableau 62). 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.

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 DMA de l’année 2050 du scénario CC modéré s’élève à 2,6 M€/an et le DMA de l’année 2050 du scénario CC fort s’élève à plus de 3,4 M€/an.

Tableau 62 : Résultats des deux indicateurs synthétiques de l’ACB pour les scénarios de débordement avec et sans changement climatique.

	VAN en M€ ₂₀₀₀	B/C	DMA ₂₀₅₀ M€/an	DEMA ₂₀₅₀ M€/an
Scénario aménagement actuel (actu)	21,5	1,95	1,4	2,2
Scénario actu + CC moyen (ccm)	23,5	2,04	1,6	2,6
Scénario actu + CC fort (ccf)	27,5	2,21	1,8	3,4

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 60) 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 Epouville, 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'efficacité¹⁵ 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.

Finalement, 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 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

¹⁵ 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.

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 évènements, à l'intégration des ouvrages d'hydraulique douce (HD) ou à la modification des pratiques agricoles (Tableau 63 et Figure 117). 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.

Tableau 63 : Montant des dommages causés par les coulées boueuses.

		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
	TOTAL	2 276	2 276	2 268	2 312	2 239
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
	TOTAL	2 609	2 608	2 607	2 637	2 392
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
	TOTAL	2 677	2 676	2 648	2 706	2 630
	DMA	2 418	2 417	2 409	2 455	2 370
	DEMA		0,7	9	-	37

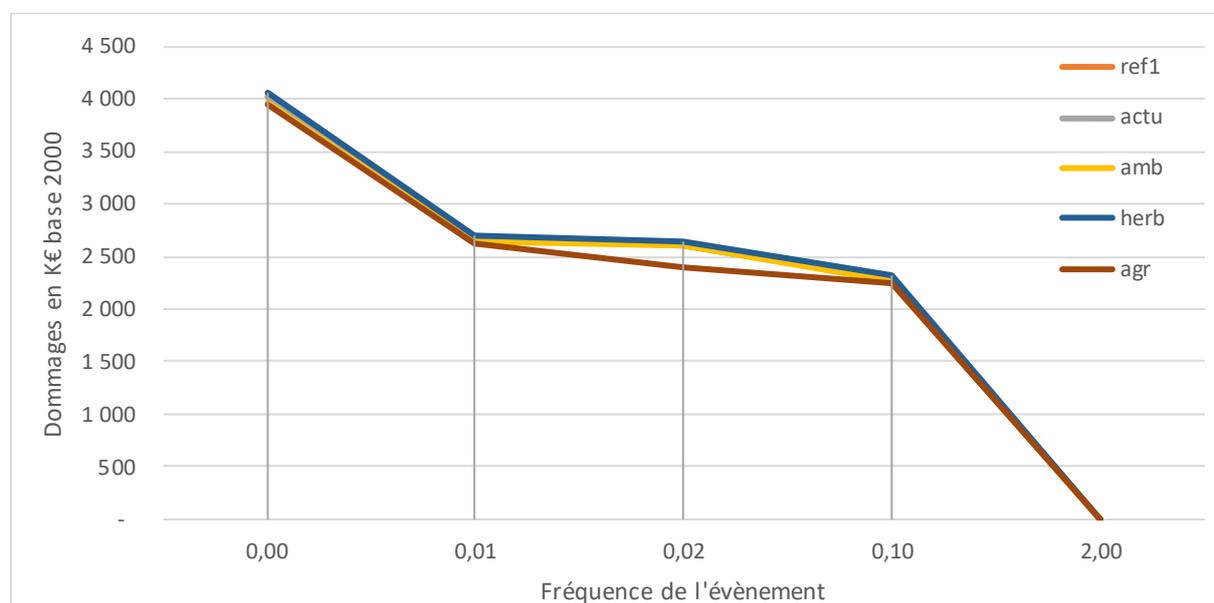


Figure 117 : Courbes fréquence-dommage pour l'aléa coulée boueuse dans les scénarios sans changement climatique.

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 Bilan du volume 3

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 augment 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%. A 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.

Volume 4 :

Modélisation des transferts sédimentaires et des impacts économiques au captage AEP : application au BAC de Radicatel

1 Introduction du volume 4

Le volume 4 de ce rapport s'inscrit dans la continuité des précédents volumes mais avec un focus spécifique sur le volet « Alimentation en Eau Potable (AEP) ». Dans les milieux karstiques, le ruissellement et l'érosion sur les bassins versants peuvent entraîner un transfert excessif de sédiments dans les eaux brutes. Ces flux de sédiments peuvent être induits par des transferts rapides et directs via les bêtaires, ou par une remise en suspension des sédiments dans les zones de stockage karstique (Masséi et al., 2003). Pour les gestionnaires en AEP, une arrivée excessive de sédiments peut entraîner un traitement supplémentaire de l'eau (ajout de réactifs) ou, dans le pire des cas, entraîner la fermeture temporaire d'une usine de traitement de l'eau (Stevenson et al., 2019). Les conséquences peuvent être importantes, avec notamment des restrictions d'usage de l'eau potable pour les particuliers. La Haute-Normandie est d'ailleurs particulièrement affectée : le coût économique lié aux restrictions d'usage d'eau potable est estimé à 5 M€ H.T entre 1992 et 2018 (Patault et al., 2019). Encore aujourd'hui, 10 000 à 20 000 personnes sont encore affectées par des restrictions d'usages de l'eau potable sur cette région (ARS, 2013).

Par conséquent, réduire les apports sédimentaires au droit des bêtaires présentes sur les bassins d'alimentation de captage est essentiel pour les gestionnaires afin de réduire l'impact sur le traitement et la distribution de l'eau potable. Une des voies pour répondre à ces problématiques est de construire des chaînes de modélisation complexes, qui intègrent le continuum transferts de surface/transferts souterrains pour le processus décisionnel. Plusieurs approches ont été proposées ces dernières années pour modéliser l'érosion/le ruissellement sur les bassins versants et les réponses karstiques associées, mais ces approches sont le plus souvent traitées séparément.

Tout d'abord, différents types de modèle d'érosion ont été développés au cours des dernières années, mais ils diffèrent en termes de complexité, de données d'entrées, et d'échelles d'application (Merritt et al., 2003). Des modèles empiriques tels que *RUSLE* (Renard, 1994), sont fréquemment utilisés puisqu'ils requièrent un nombre limité de données et de paramètres, mais ils ne sont pas en mesure de représenter pleinement les processus intervenants à l'échelle du bassin versant. Les modèles physiques, tels que *WEPP* ou *LISEM* (Laflen et al., 1991 ; Takken et al., 1999) peuvent décrire précisément ces processus, mais nécessitent un nombre important de paramètres mesurables, et à fortiori connus. Les modèles à base expert, comme *Stream* ou *WaterSed* (Cerdan et al., 2002a ; Landemaine, 2016) offrent un compromis intéressant en se concentrant sur les principaux facteurs du ruissellement et de l'érosion. Ces modèles ont été spécialement conçus sur les zones cultivées de la ceinture lœssique Européenne et sont particulièrement efficaces là où le ruissellement hortonien domine (Souchère et al., 2005 ; Evrard et al., 2010 ; Landemaine, 2016). Leur domaine d'application a par ailleurs été récemment étendu à d'autres contextes hydro-géo-climatiques : Mayotte, Champagne, Japon, etc. (BRGM, 2017).

Parallèlement, différents types de modèles karstiques ont été également développés et couvrent un large éventail de domaines (Hartmann et al., 2014). Les modèles physiques (réservoir, double perméabilité, etc.) sont les modèles les plus utilisés pour la modélisation des réponses karstiques, mais ce type de modélisation nécessite une excellente connaissance du système et des données qui ne sont pas toujours disponibles. De plus, en raison de la non-linéarité des processus générant des flux sédimentaires aux sources karstiques, et du manque de description physique précise de ces systèmes, la modélisation des interactions surface/souterrains s'avère difficile avec les modèles physiques (Savary et al., 2017 ; Jourde et al., 2018). Basé sur une approche systémique, telle qu'initiée par Mangin (1984), le karst peut être considéré comme un système capable de transformer un signal d'entrée (pluie) en un signal de sortie (débit), et la relation entrée/sortie peut être évaluée par une

fonction mathématique. Cette approche fait ainsi référence aux modèles de type « boîte noire », et les recherches récentes font valoir l'utilisation de techniques orientées données, tel que l'apprentissage profond (ou Deep Learning). Le Deep Learning est un type d'intelligence artificielle dérivé du machine learning, qui utilise le principe des réseaux de neurones artificiels. Ces approches sont largement adoptées depuis les années 2012 en informatique, et leur adoption est progressive en hydrologie (Shen, 2018). Les réseaux de neurones artificiels sont maintenant couramment utilisés pour modéliser des problèmes réels en raison de leur capacité à simuler et généraliser des relations non linéaires complexes entre des signaux d'entrée et de sortie (Meyers et al., 2016 ; 2017 ; Hafeez et al., 2019). Comme indiqué par Shen (2018), les réseaux de neurones profonds ont désormais dépassé les méthodes statistiques traditionnelles. Des applications limitées, mais concluantes, ont ainsi permis de prédire les débits entrants aux barrages, les niveaux d'eau dans les structures de transport des eaux usées, la turbidité aux captages AEP, les crues karstiques, et les débits des bassins versants (Siu et al., 2011 ; Bai et al., 2016 ; Savary et al., 2017 ; Hu et al., 2018 ; Kratzert et al., 2018). Les réseaux de neurones profonds peuvent ainsi fournir à la fois des capacités prédictives plus fortes et une voie complémentaire vers la découverte scientifique (Shen et al., 2018).

Ainsi, les principaux objectifs de ce quatrième volume sont : (i) développer une approche de modélisation capable de prédire la variabilité du flux sédimentaire (kg j^{-1}) à travers la turbidité induite par des précipitations à l'entrée d'une station de traitement AEP, et (ii) évaluer l'impact de différents scénarios d'occupation du sol sur la variabilité de ce flux. Pour cela, ce cas d'étude propose de connecter une approche de modélisation de l'érosion et du ruissellement en surface, et une approche de modélisation des transferts souterrains afin de quantifier la variabilité des flux sédimentaires à la station de traitement AEP du Bassin d'Alimentation de Captage (BAC) de Radicatel. Nous avons ainsi choisi d'utiliser le modèle à base expert *WaterSed*, développé et appliqué avec succès sur la région étudiée, pour modéliser l'impact d'une modification de l'occupation du sol sur l'érosion et le ruissellement. L'objectif est de prédire et d'extraire les flux sédimentaires simulés par le modèle *WaterSed* au droit des bêttoires connectées sur le BAC, et de les utiliser comme données d'entrée d'un réseau de neurones profonds. Cette approche de modélisation couplée est ensuite appliquée pour différentes pluies de projets et plusieurs scénarios d'occupation du sol afin de modéliser le flux sédimentaire en entrée de la station AEP.

2 Site d'étude

2.1 Le BAC de Radicatel

Le BAC de Radicatel est situé dans le Pays de Caux (Normandie, France), sur la Rive droite de la Seine (Figure 118). Il est situé à 30 km de l'estuaire de la Seine. Le climat est océanique avec une température moyenne de 11°C. Les précipitations annuelles varient entre 600 et 1100 mm avec une saison pluvieuse entre octobre et mai. Le système est typique du karst de la basse vallée de la Seine. Les plateaux karstiques de la craie du côté Nord-Est de la région Normande font partie de la bordure Ouest du bassin Parisien. Le socle géologique se compose de craie du Cénomaniens au Campanien recouvertes de formations superficielles épaisses. La formation principale est composée d'argile à silex qui résulte de l'altération de la craie (Laignel, 2003), de loess, et de sables tertiaires (Lautridou, 1985). L'épaisseur de la formation recouvrant la craie varie de 5 à 10 m. Les eaux souterraines s'infiltrent par les parties hautes de l'aquifère de la craie vers les vallées via : (i) le transfert rapide via un réseau karstique très développé, et (ii) un drainage plus lent à travers les formations superficielles. En effet, les argiles à silex réputées imperméables sont discontinues et permettent l'infiltration. Le BAC couvre ainsi une superficie de 106 km² et la station de traitement et de distribution de l'eau potable est située à l'interface entre le lit majeur de la Seine et le karst de la craie. La station de traitement de Radicatel est exploitée par Le Havre-Seine Métropole (LHSM). L'eau est pompée à travers quatre sources différentes et sept puits de pompage, à proximité de la station de traitement (Chédeville, 2015). Selon le Système d'Information pour la Gestion des Eaux Souterraines (SIGES) en Normandie, les investigations hydrogéologiques confirment que sept bétôires sont positivement connectées aux sources de Radicatel.

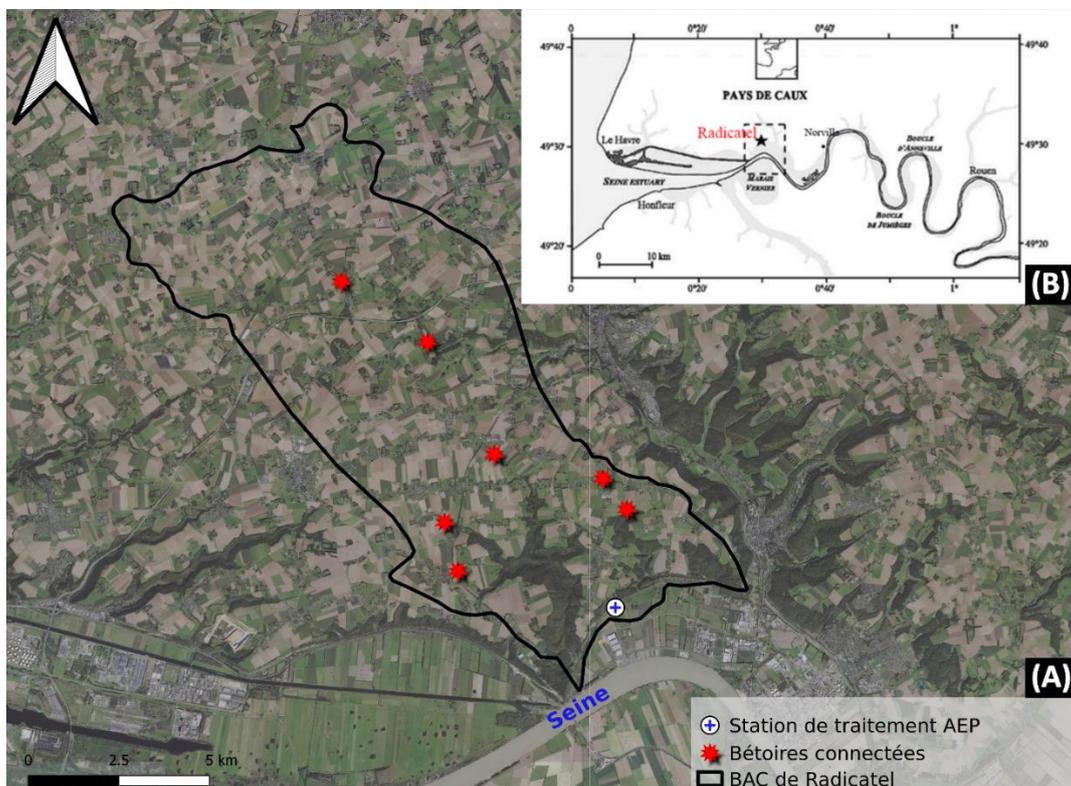


Figure 118 : (A) Localisation de la station de traitement AEP de Radicatel et des sept bétôires connectées positivement aux sources, et (B) Localisation du bassin d'alimentation de captage (BAC) de Radicatel dans la basse vallée de la Seine (Normandie, France), sur la Rive droite de la Seine (Hanin, 2011). Le fond de carte est issu de la BD Ortho de l'IGN.

2.2 Données hydro-climatiques

A la station de traitement de Radicatel, le débit de pompage journalier moyen annuel est de $19\,733\text{ m}^3\text{ j}^{-1}$, et le volume d'eau exploité est de 7,2 millions de m^3 en 2018. La turbidité est mesurée et enregistrée à l'entrée de la station depuis 1987, à l'aide d'un turbidimètre. Ainsi, une chronique de turbidité est disponible pour ce site, avec une mesure journalière maximale de turbidité de 1987 à 2017 (Figure 119). Des lacunes sont néanmoins identifiées sur cette chronique. Seules 22 années hydrologiques sont complètes sur la série de données. En parallèle, les chroniques de précipitations sont extraites sur la même période temporelle, à partir de la base de données SAFRAN (Vidal et al., 2010) avec une résolution spatiale de 8 km sur l'ensemble du BAC.

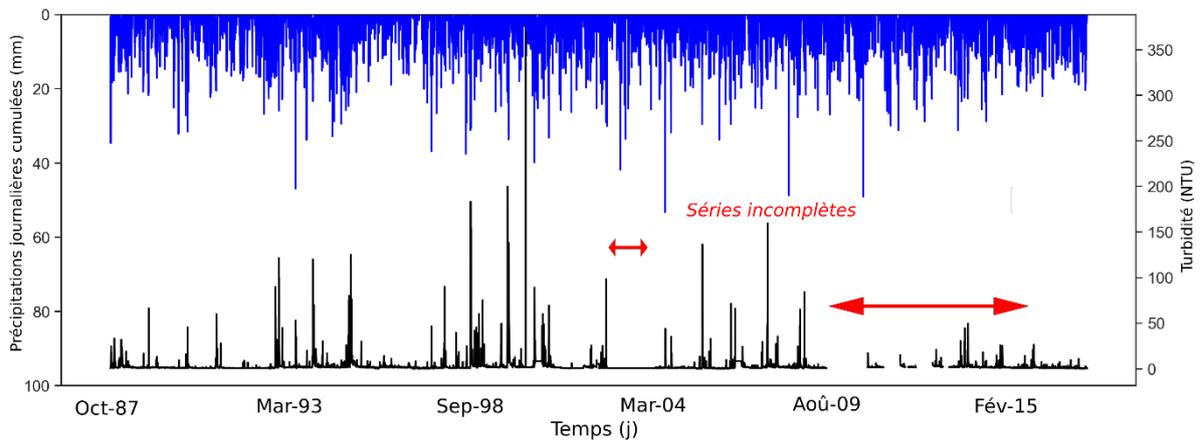


Figure 119 : Précipitations journalières cumulées (mm ; en bleu) extraites de la base de données SAFRAN sur le BAC de Radicatel et turbidité maximale journalière enregistrée à l'entrée de la station de traitement de 1987 à 2017.

3 Méthode

La structure de modélisation quantitative couplée qui a été développée dans le cadre de cette étude se décompose en plusieurs phases. Les composantes sont expliquées en détail ci-dessous.

3.1 Pré-traitement des données

Le traitement approprié des données permet de répondre aux principales interrogations liées aux modélisations de type réseau de neurones profond, comme leur capacité de généralisation au-delà des limites d'entraînement du modèle (Kourgialas et al., 2015). De plus, le couplage des modèles SIG avec ces derniers peuvent nécessiter d'importants efforts de calculs. Par conséquent, il est important de sélectionner soigneusement les données d'entrée de l'approche de modélisation couplée.

Dans cette étude, la distribution des données de turbidité a été explorée à partir d'un diagramme de dispersion (Figure 120). Dans un premier temps, seules les années hydrologiques complètes ont été sélectionnées ($n = 22$). La dispersion des valeurs de turbidité selon les années hydrologiques permet de visualiser que les années hydrologiques H12-H13 (i.e. Octobre 1998 à Septembre 2000) sont les plus intéressantes en termes de dispersion des valeurs (0-370 NTU). Ces années sont également marquées par une forte récurrence des valeurs extrêmes de turbidité (> 150 NTU). Ainsi, ces deux années hydrologiques ont été sélectionnées comme période de référence pour la calibration et l'entraînement du modèle. Ces deux années hydrologiques représentent un échantillon de 731 évènements journaliers à modéliser. A partir de ces données de turbidité, le flux sédimentaire (kg j^{-1}) a été évalué connaissant le débit de pompage moyen journalier et une valeur moyenne de concentration en sédiments issue des travaux antérieurs du laboratoire M2C sur le BAC de Radicatel ($1 \text{ NTU} \sim 1 \text{ mg L}^{-1}$; Hanin, 2011). Également, au regard des travaux conduits par Masséi et al. (2006) et Hanin (2011), un temps de réponse aux précipitations de 24h a été pris compte afin de faire correspondre les chroniques de précipitations aux chroniques de turbidité pour la modélisation Deep Learning. Enfin, l'érosion et le ruissellement ont été modélisés à partir du modèle *WaterSed* pour 269 évènements sur les 731 pré-sélectionnés, ceci afin de réduire l'effort de calcul en considérant que ces processus ne se déclenchent que pour des évènements significatifs ($P > 2,5 \text{ mm}$; seuil en deçà duquel aucune pluie efficace n'est engendrée).

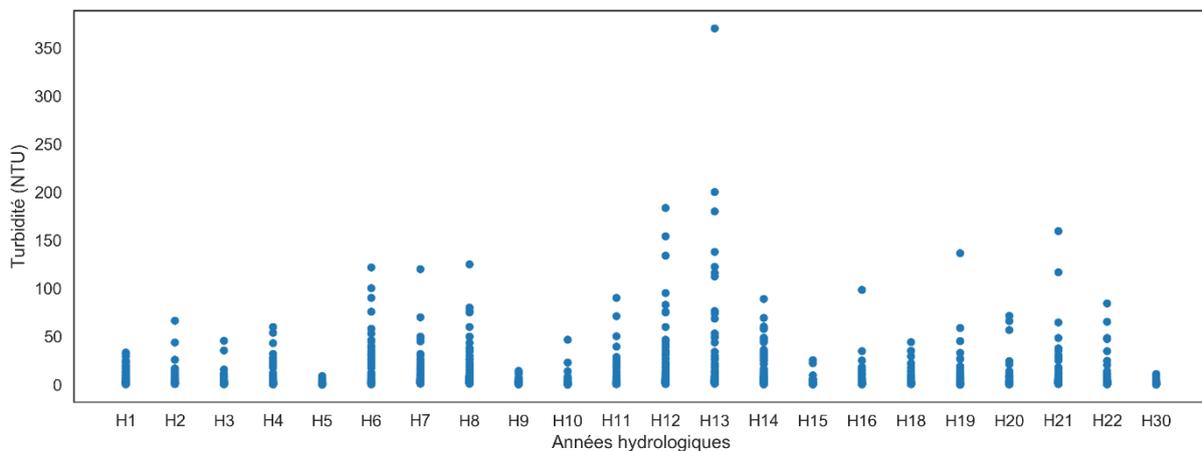


Figure 120 : Diagramme de dispersion des valeurs de turbidité maximales journalières observées à la station de traitement de Radicatel pour les années hydrologiques complètes sur la période 1987-2017.

3.2 Modélisation couplée WaterSed/Deep Learning

3.2.1 WaterSed

Le modèle *WaterSed* (développé par le BRGM) 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 évènement de pluie donné (Landemaine, 2016). Calibré et/ou validé dans de nombreux contextes, 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 changement climatiques. La construction du modèle hydraulique s'est concentrée sur l'ensemble du BAC de Radicatel, en veillant à respecter les chemins d'écoulements des eaux et à prendre en compte l'ensemble des ouvrages hydrauliques pré-existants. La topographie du BAC est issue du MNT de l'IGN de résolution 1m (RGE ALTI 1m). Afin d'optimiser le ratio description du paysage/temps de modélisation, le MNT a été agrégé à une résolution de 5m. Les artefacts (cuvettes et pics), susceptibles de bloquer l'écoulement des eaux ont été corrigés afin de garantir un écoulement continu du ruissellement. Les axes de ruissellement ont été digitalisés à partir de trois sources de données (le réseau d'axe de ruissellement existant, le réseau brut calculé à partir du MNT, et les orthophotographies de la BD ORTHO). Les ouvrages de gestion des eaux de ruissellement existants sur le bassin en 2018 ont été récupérés sur la base de données CASTOR. Les coordonnées de chaque ouvrage ont été vérifiées par photo-interprétation, et replacer correctement sur les axes de ruissellement le cas échéant. Ainsi, 45 barrages et bassins ont été sélectionnés, pour une capacité totale de stockage de 263 277 m³. Trois aménagements de bétaires sont recensés sur le BAC, et concernant les aménagements d'hydraulique douce, on dénombre seize mares, quatre haies et une fascine (Figure 121).

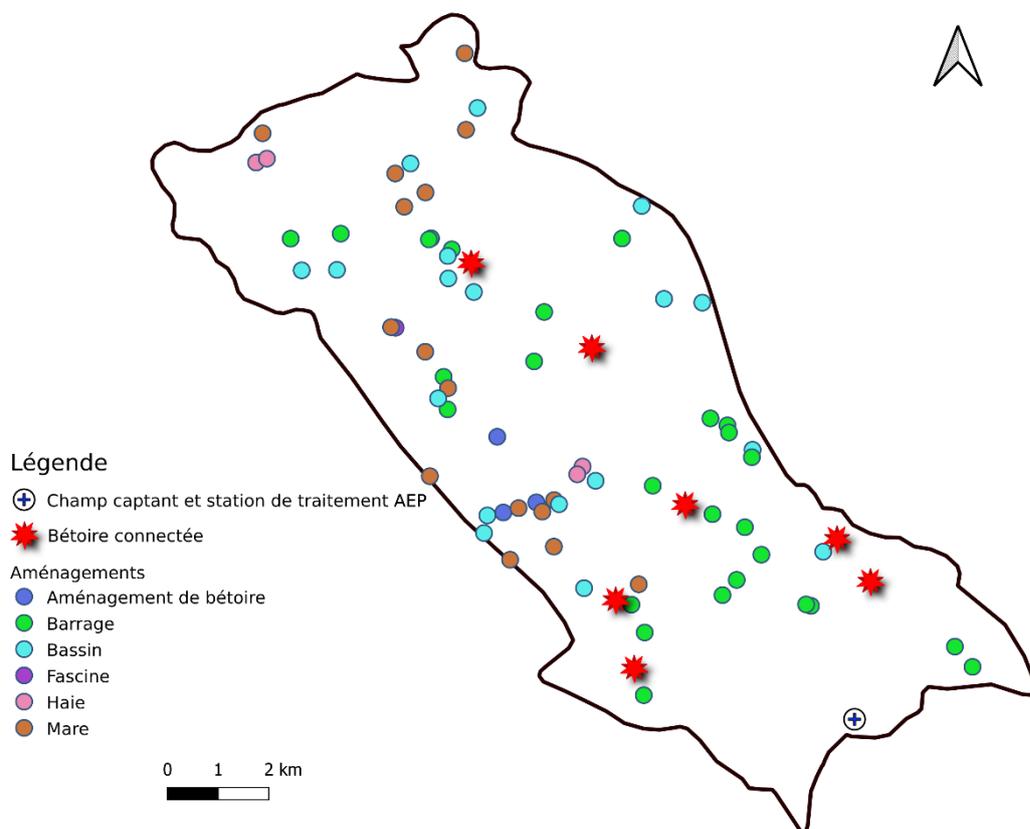


Figure 121 : Cartographie des ouvrages de gestion des eaux de ruissellement extraits de la BD CASTOR et intégrés au modèle *WaterSed*.

La cartographie de l'occupation des sols 2016 (considérée comme valable en 2018) a été construite pour les besoins de l'étude sur le BAC de Radicatel à partir de la cartographie OSCOM de 2016 et le RPG de 2016 (voir Volume 2). La proportion de chaque classe d'occupation des sols par rapport à la superficie du BAC de Radicatel est présentée sur la Figure 122. La cartographie des sols a été obtenue auprès du RRP HN à une échelle de 1/250 000ème (voir Volume 2). Trois textures de sol sont rencontrées sur le BAC de Radicatel. La texture dominante est limono-sablo-argileuse, qui correspond à des sols profonds, majoritairement lessivés et rarement hydromorphes, issus de lœss ou d'argiles à silex (Figure 123). L'extraction des textures de sol sur le BAC de Radicatel permet de déduire un niveau d'érodibilité (voir Volume 2). Concernant la paramétrisation du modèle *WaterSed*, la méthode employée est la même que celle présentée dans le volume 2 de ce rapport. Enfin, pour la paramétrisation du modèle *WaterSed*, il a été jugé pertinent de garder les mêmes valeurs des paramètres du module hydrologique et sédimentaire que celles calibrées et validées précédemment sur le bassin versant de la Lézarde (voir détails Volume 2).

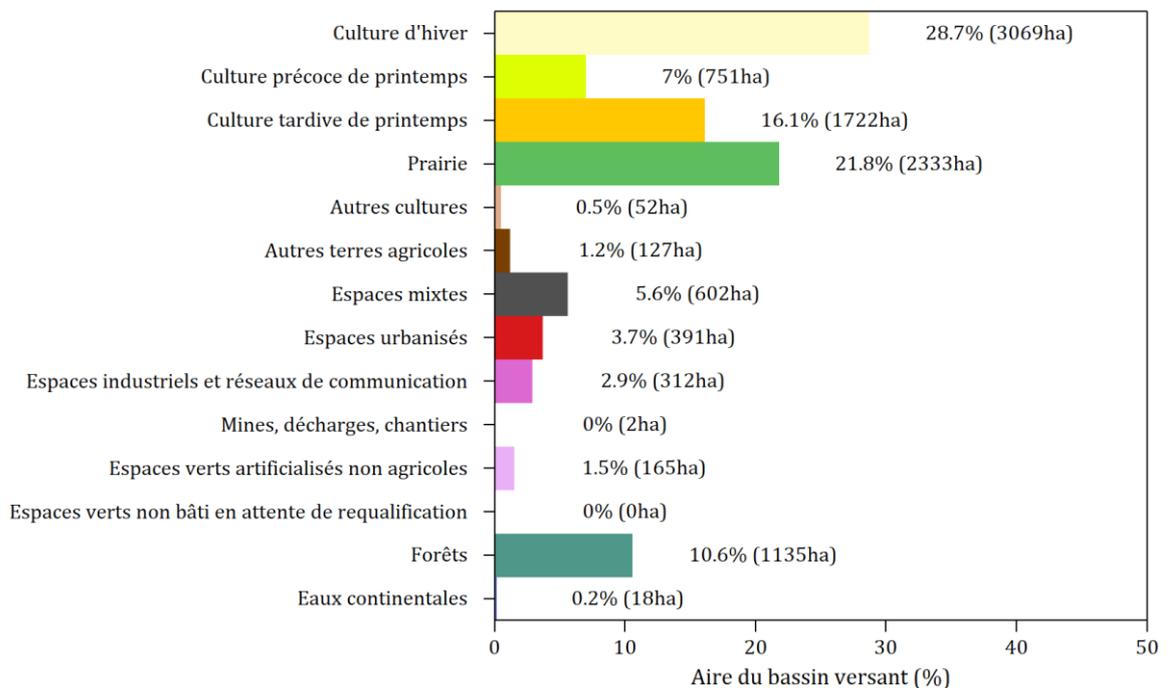


Figure 122 : Proportions de chaque classe d'occupation du sol (base 2016) sur le BAC de Radicatel.

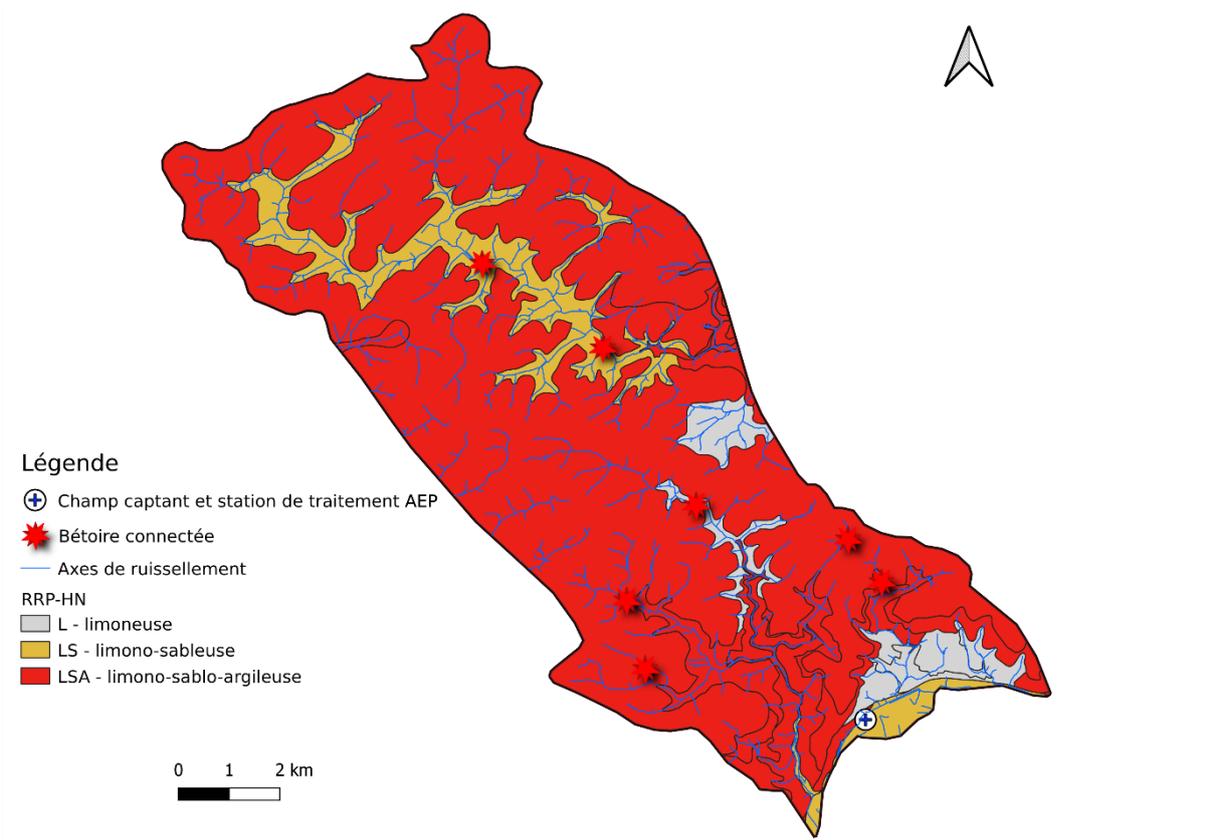


Figure 123 : Cartographie simplifiée des textures de sol sur le BAC de Radicatel, construite à partir du Référentiel Régional Pédagogique de Haute-Normandie, et localisation des axes de ruissellement

3.2.2 Deep Learning

Pour modéliser le flux sédimentaire au captage AEP, nous avons développé un réseau de neurones multicouches à propagation directe (réseau de neurones profond). C'est un type de réseau de neurones artificielles organisé en plusieurs couches au sein desquelles l'information circule de la couche d'entrée vers la couche de sortie uniquement (Figure 124). Chaque couche est composée de N_i neurones qui prennent leurs entrées sur les N_{i-1} neurones de la couche précédente. A chaque synapse est associé un poids synaptique de sorte que les N_{i-1} neurones sont multipliés par ce poids puis additionnés par les neurones de niveau i . L'ajout d'une fonction d'activation à chaque sortie introduit le processus de non-linéarité.

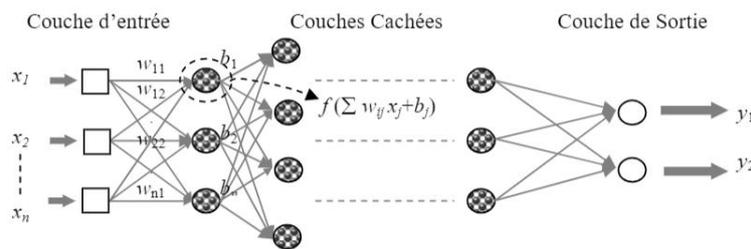


Figure 124 : Structure d'un neurone artificiel. Le neurone calcule la somme de ses entrées puis cette valeur passe à travers la fonction d'activation pour produire sa sortie.

Le modèle a été développé sous *Python 3.6*, en utilisant l'interface de programmation *Keras* (Chollet, 2015) et l'outil open source d'apprentissage automatique *Tensorflow*, développé par Google (Abadi et al., 2016).

Nous avons utilisé deux indicateurs climatiques, issus des séries chronologiques de précipitations (précipitations journalières cumulées (P), précipitations antécédentes à 48h (P_{48})) de la base de données *SAFRAN* et les sorties de modélisation *WaterSed* aux bétoires connectées comme données d'entrée du réseau de neurones profond. La chronique de flux sédimentaire à la station de captage AEP a été sélectionnée comme donnée de sortie en considérant les deux années hydrologiques significatives (H12-H13). Les données ($n = 731$ événements) ont été divisées en un ensemble d'apprentissage (70% ; $n = 511$) et un ensemble de tests (30% ; $n = 220$). L'ensemble d'apprentissage a également été divisé en un ensemble d'apprentissage et un ensemble de validation pour affiner les hyper-paramètres du modèle (70-30% ; $n = 358-153$). Le nombre de passes effectuées sur le jeu d'entraînement pendant la phase d'apprentissage a été fixé à 15. La méthode de descente du gradient stochastique a été utilisée pour minimiser la fonction objective (taille de lot = 1) et pour mettre à jour les poids du modèle pour chaque exemple du jeu d'entraînement. Il n'existe pas de règles prédéfinies pour sélectionner le nombre de neurones et de couches cachées (Le et al., 2019). La structure optimale du réseau de neurones a été définie par une procédure classique d'essais, et d'évaluation/optimisation des erreurs. La structure finale du réseau de neurones est composée d'une couche en entrée avec quatre variables (précipitations journalières cumulées, précipitations journalières cumulées antécédentes, flux sédimentaire et volume ruisselé prédits par le modèle *WaterSed* au droit des bétoires), trois couches avec 41 neurones (30-10-1), et une couche de sortie avec une variable à prédire (flux sédimentaire (kg j^{-1})). Avant l'entraînement du modèle, les variables d'entrées ont été normalisées, puis retransformées pour la prédiction en utilisant les mêmes paramètres de normalisation. Nous avons utilisé la fonction ReLU (Unité de Rectification Linéaire) comme fonction d'activation pour les deux premiers nœuds et une fonction d'activation linéaire a été définie dans la dernière couche cachée. L'erreur quadratique moyenne (MSE) a été choisie comme fonction de perte et l'estimation du moment adaptatif (Adam) a été sélectionné comme algorithme d'optimisation du modèle.

3.3 Evaluation du modèle couplé

Le découpage du set de données (ensemble d'apprentissage/test) reste arbitraire et peut être évalué pour calculer une estimation robuste de l'erreur du modèle. Avec les séries temporelles, il faut toutefois être prudent lors du fractionnement des données afin d'éviter toute fuite de données. Pour résoudre ce problème, nous avons adapté une procédure de validation croisée imbriquée avec réduction mensuelle des données (Figure 125), qui fournit une estimation quasi impartiale de l'erreur du modèle (Varma & Simon, 2006). La procédure contient une boucle interne pour le réglage des hyperparamètres et une boucle externe pour l'estimation des erreurs. Les paramètres qui minimisent l'erreur sont choisis sur la boucle interne et nous ajoutons une boucle externe qui subdivise le jeu de données en différents ensembles d'apprentissage/test. Ensuite, l'erreur est calculée en moyenne sur chaque division pour évaluer les performances globales du modèle.

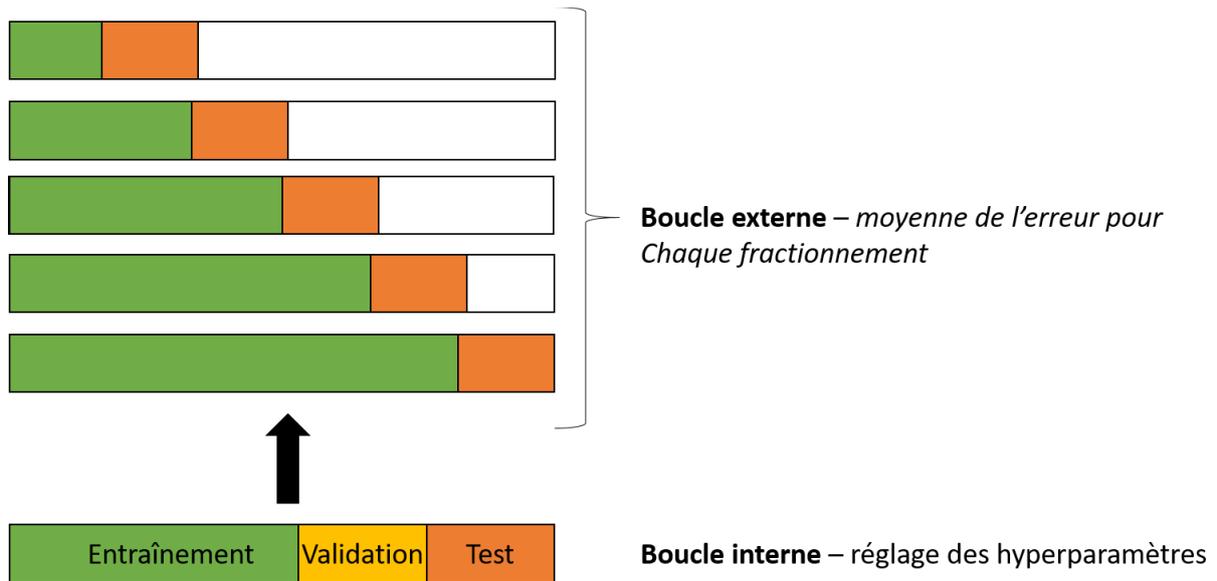


Figure 125 : Procédure de validation croisée imbriquée avec réduction mensuelle des données développée pour la calibration du modèle.

La performance du modèle est évaluée à travers une série de mesures d’erreurs statistiques, notamment le coefficient de détermination (R^2), le critère d’efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE), et la racine carrée de l’erreur quadratique moyenne ($RMSE$).

Le coefficient de détermination (R^2) varie de 0 à 1 et décrit la quantité de variance observée expliquée par le modèle. Une valeur de 1 suggère que le modèle peut expliquer toute la variance observée, tandis qu’une valeur de 0 implique l’absence de corrélation.

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(y'_i - \bar{y}'))^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (y'_i - \bar{y}')^2} \quad \text{Eq. (11)}$$

Où y_i représente la variable observée au temps i , y'_i la variable simulée au temps i , \bar{y} et \bar{y}' les moyennes des valeurs observées et simulées au temps i , et n le nombre de points pris en compte.

La racine carrée de l’erreur quadratique moyenne ($RMSE$) correspond à l’écart type des résidus (erreurs de prédiction). Les résidus sont une mesure d’éloignement des points de donnée de la ligne de régression. Elle évalue donc la façon dont les prédictions correspondent aux observations. Les valeurs peuvent varier du non-ajustement ($+\infty$) à l’ajustement parfait (0) en fonction du changement relatif des données.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{n}} \quad \text{Eq. (12)}$$

Le critère d’efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE ; Nash & Sutcliffe, 1970) indique la capacité d’un modèle à prédire des variables différentes de la moyenne et donne la proportion de la variance initiale prise en compte par le modèle. Les valeurs du NSE varient entre $-\infty$ (mauvais modèle) et 1, indiquant un ajustement parfait entre les valeurs observées et celles prédites.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{Eq. (13)}$$

Une évaluation supplémentaire a été réalisée en comparant les prédictions du modèle pour différentes pluies de projet avec les valeurs obtenues en utilisant la loi d'extrémum généralisée (GEV). C'est un outil classique, largement répandu pour la modélisation des événements extrêmes des précipitations ou des débits fluviaux (Carreau et al., 2013 ; De Michele & Avanzi, 2018). Nous avons donc évalué la distribution des valeurs extrêmes sur la chronique de flux sédimentaire à la station de captage AEP, à partir de l'extraction des blocks maximaux annuels pour les années hydrologiques complètes (n = 22), en utilisant le package « extRemes » du logiciel R (R Development Core Team, 2008 ; Gilleland & Katz, 2016). Cette procédure permet alors de déterminer le flux sédimentaire maximum observable pour différentes pluies de projet, et ces résultats servent de base de comparaison pour s'assurer que le modèle développé fonctionne correctement.

3.4 Scénarios et projections futures

Six scénarios, dont cinq à l'horizon 2050, sont proposés dans le cadre de ces simulations : (i) un scénario actuel (2018), (ii) trois scénarios d'évolution de l'occupation du sol, et (iii) deux scénarios de projections climatiques. Ces scénarios sont détaillés ci-dessous :

1. **Scénario actuel (actu)** : Ce scénario sert de référence pour les modélisations et l'analyse économique. Il a été construit à partir des dernières données cartographiques détaillées dans le volume 2 de ce rapport. Les ouvrages existants en 2018 ont été considérés et extraits de la BD CASTOR, comptant pour 45 barrages et bassins, 16 mares, 1 fascine, et 4 haies.
2. **Scénario d'aménagement d'hydraulique douce ambitieux (amb)** : Ce scénario est basé sur l'expertise de l'AREAS et propose un plan d'aménagement ambitieux constitué de 181 fascines et 13,1 ha de bandes enherbées, en complément des aménagements existants (Figure 126). Les bandes enherbées sont positionnées sur les chemins préférentiels d'écoulement dans un périmètre rapproché des bétouilles connectées. Les fascines sont déployées sur l'ensemble du bassin versant, également sur les axes préférentiels d'écoulement et en bordure de parcelles. Le placement des aménagements a été optimisé selon les résultats de modélisation issu du scénario actuel.

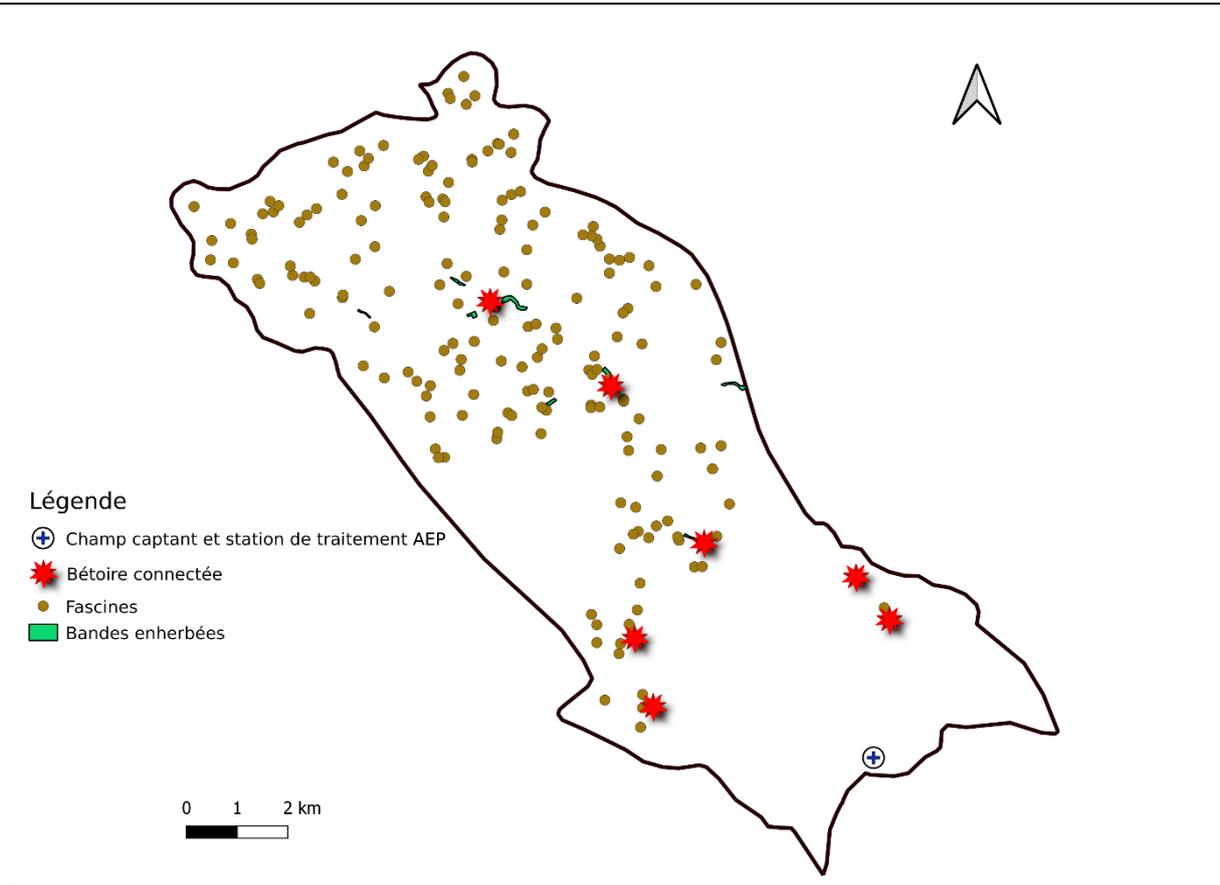


Figure 126 : Cartographie du programme d'aménagement d'hydraulique douce ambitieux théorique proposé par l'AREAS sur le BAC de Radicatel à l'horizon 2050, et localisation des bétaires connectées.

- 3. Scénario de réduction des surfaces en herbe (herb) :** Sur la période 1970-2010 dans le Pays de Caux, nous observons en moyenne la conversion de 1,8%/an des prairies en culture. L'extrapolation en 2050 amène à une conversion de 33% des prairies actuelles en culture (Figure 127). La sélection des prairies à retourner est réalisée selon un critère de pente, en priorisant les prairies à pente faible, donc principalement sur le plateau en amont du bassin versant.

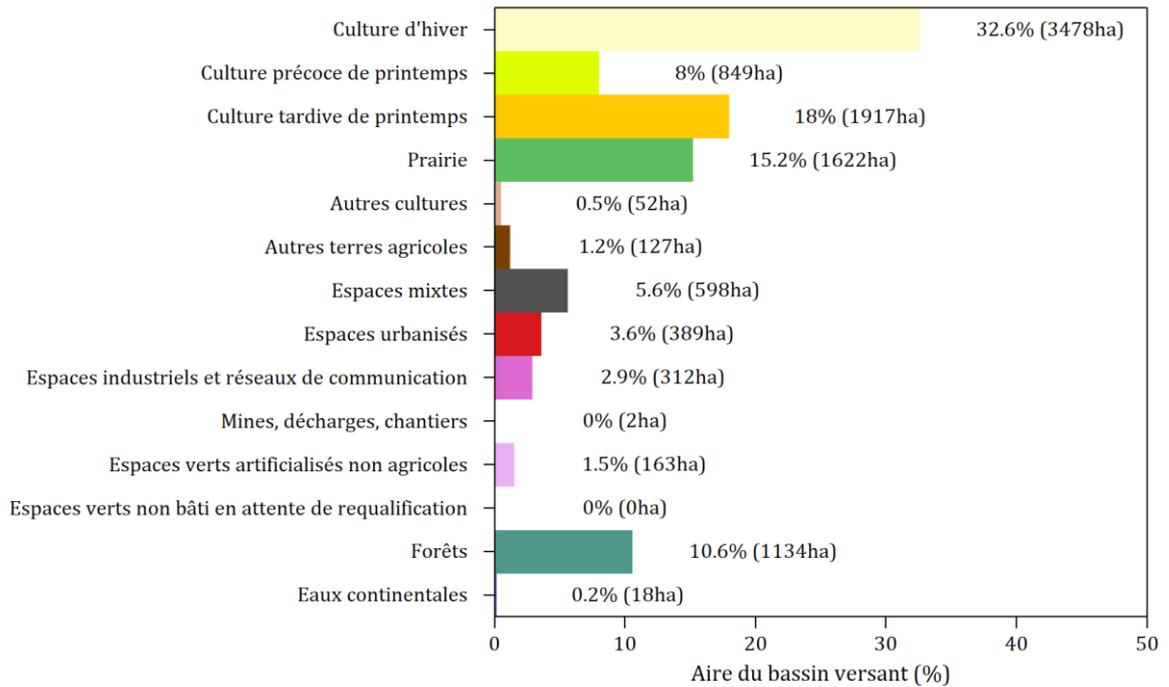


Figure 127 : Proportions de chaque classe d'occupation du sol en 2050, sur le BAC de Radicatel, dans le cadre du scénario « herb ».

4. **Scénario d'amélioration des pratiques agricoles (agr)** : Ce scénario considère l'adoption de meilleures pratiques agricoles visant à augmenter l'infiltration sur le bassin versant (augmentation de la couverture et retardement de l'apparition de la croûte de battance). 50% des parcelles existantes ont été sélectionnées aléatoirement et nous avons appliqué une augmentation de 15% de la capacité d'infiltration en respectant les proportions de culture d'hiver et de printemps (Figure 128). Des exemples concrets d'amélioration des pratiques agricoles et leurs effets sont détaillés dans le volume 2 du rapport.

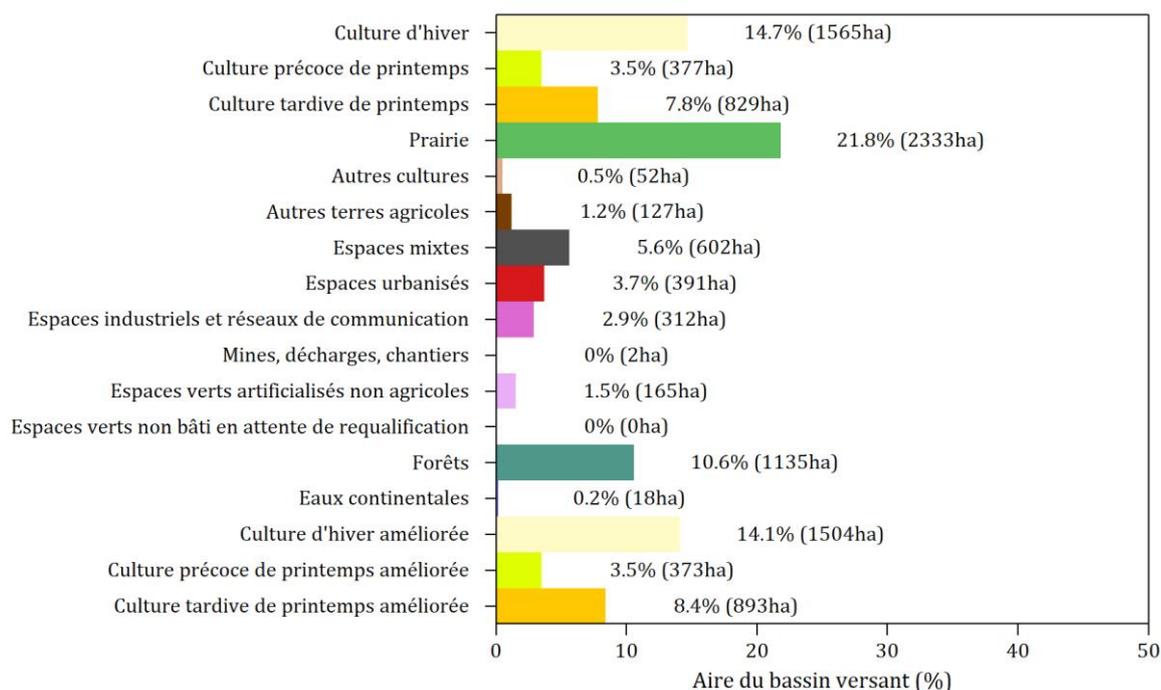


Figure 128 : Proportions de chaque classe d'occupation du sol en 2050, sur le BAC de Radicatel, dans le cadre du scénario « agr ».

- Scénario de changement climatique moyen et fort (ccm-ccf) :** Ce scénario est basé sur les scénarios du GIEC (RCP4.5 et 8.5), qui induisent une augmentation de l'intensité des pluies extrêmes entre 2 et 5%. L'augmentation des intensités se traduit dans les modèles par une baisse de la période de retour des pluies. Ainsi, les périodes de retour des épisodes extrêmes de précipitations ont été diminuées (ex : $P_{100} \rightarrow P_{80}$ (RCP4.5 = ccm) $\rightarrow P_{65}$ (RCP8.5 = ccf)).

3.5 Définition des pluies de projet

Chacun des scénarios cités précédemment est simulé selon cinq pluies de projet (Tableau 64). Les périodes de retour définies sont 1/2, 2, 10, 50, et 100 ans. Les pluies de projet $P_{0,5}$ et P_2 correspondent à des épisodes hivernaux, caractéristiques de la région étudiée, avec une légère pluie génératrice de ruissellements puisque précédée de cumuls de précipitations importants. Les pluies de projet P_{10} , P_{50} , et P_{100} correspondent à des épisodes printaniers intenses et ont des cumuls de pluie équivalents à ceux utilisés dans le Volume 2 de ce rapport.

Tableau 64 : Définition des pluies de projet utilisées dans le cadre de la modélisation.

Période de retour (années)	Précipitations journalières cumulées (mm)	Intensité maximale à 6 min	Précipitations antécédentes (48h)	Saison
0,5	19	25	45	Hiver
2	31,4	25	45	Hiver
10	51,9	45	0	Printemps
50	74,7	45	0	Printemps
100	87	45	0	Printemps

3.6 Fonction de coût de traitement de l'AEP & indicateurs économiques

Nos entretiens auprès des gestionnaires AEP, et plus particulièrement le LHSM (Le Havre Seine Métropole), nous ont permis de récolter des données chiffrées relatives au coût de traitement de la turbidité au captage AEP. Selon les éléments communiqués, nous pouvons affirmer que les postes impactés par la turbidité sont les suivants :

- L'électricité
 - Les pompes de lavage des filtres
 - Les surpresseurs pour le lavage à l'air des filtres
 - L'ensemble traitement coagulation :
 - Les injections de réactifs (FeCl₃, polymère, CAP)
 - Le dispositif de récupération et de recirculation des boues
 - Le fonctionnement de l'épaississeur
 - Les centrifugeuses
- Les filtres (renouvellement tous les 15 ans)
- L'évacuation des boues
- Les réactifs

A partir d'un diagnostic énergétique, datant de 2015, à la station de traitement de Radicatel, nous avons été en mesure de déterminer la consommation énergétique annuelle de chaque poste impacté par la turbidité. En parallèle, nous avons pris en compte le renouvellement d'un filtre, évalué à 80 000 € H.T tous les 15 ans. D'autre part, en 2018 sur Radicatel, 165 tonnes de boues ont été évacuées pour un montant de 13 000 € H.T. En croisant les données de flux hydro-sédimentaire disponibles à la station, nous avons été en mesure de faire correspondre une masse de boue évacuée avec une charge sédimentaire en entrée de station, et ainsi de calculer un coût économique de l'évacuation des sédiments en entrée de station entre 2015 et 2018. Enfin, des données relatives au réapprovisionnement des stocks de réactifs ont été utilisées sur les quatre dernières années. En première approche, le réapprovisionnement du stock de l'année n a été considéré comme révélateur de la consommation en réactif sur cette même année. L'ensemble de ces données sur la station de traitement AEP de Radicatel nous a permis de créer une fonction de dommage liée au traitement de la charge sédimentaire à la station de traitement (Figure 129). A partir des différents postes de dépenses considérés, nous sommes en mesure d'évaluer le coût de traitement du flux sédimentaire selon la relation suivante : Coût (€₂₀₁₈ H.T) = 2,1715 * Flux sédimentaire (kg j⁻¹).

A partir de cette fonction de dommage, et des résultats de modélisation, il est alors possible de calculer les courbes de fréquence-dommage. Il est également envisageable de quantifier les dommages moyens annuels (DMA) et les DEMA (dommages évités moyens annuels) pour comparer les scénarios entre eux. La signification et l'utilisation de ces indicateurs économiques sont développées plus en détail dans le Volume 3.

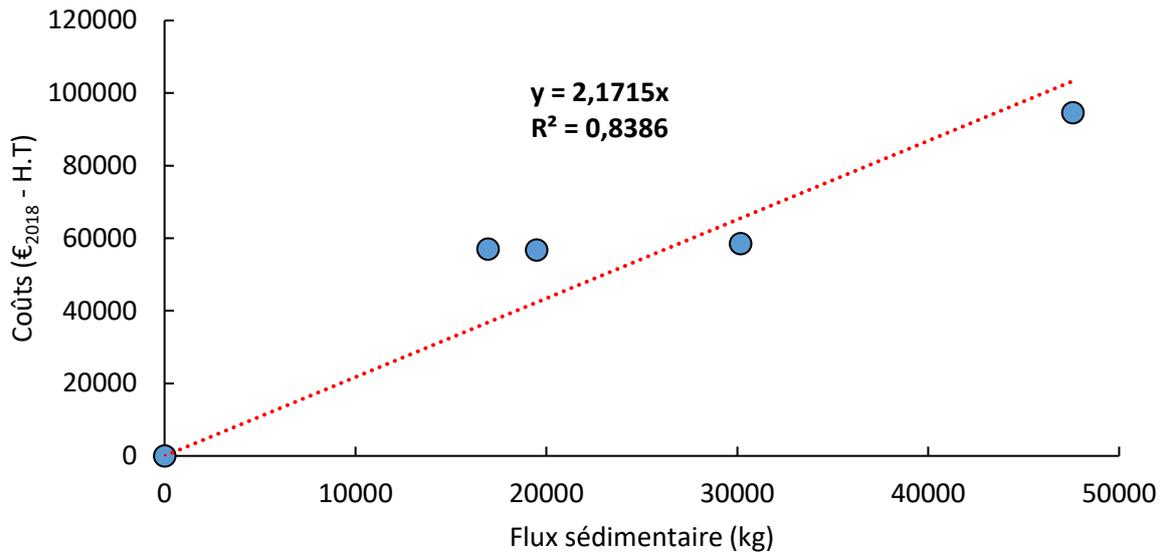


Figure 129 : Fonction de coût de traitement des sédiments à la station de traitement AEP du BAC de Radicatel (années 2015 à 2018).

4 Calibration & Résultats

4.1 Modélisation de l'érosion et du ruissellement

Considérant que l'érosion et le ruissellement n'apparaît que pour des épisodes de précipitations significatifs ($P > 2,5$ mm ; seuil en deçà duquel aucune pluie efficace n'est engendrée), 269/731 évènements ont été simulés avec le modèle *WaterSed*. Les résultats de simulation fournissent ainsi pour chaque évènement une cartographie des axes de ruissellement (maillage au pas de 5 m) sur l'ensemble du bassin d'alimentation de captage de Radicatel. Les flux sédimentaires (SY_{WS} ; $kg\ j^{-1}$) et les volumes ruisselés (V_{WS} ; m^3) modélisés avec le modèle *WaterSed* ont été extraits au droit de chaque béttoire connectée puis sommés. La Figure 130 montre que d'Octobre 1998 à Septembre 2000, les épisodes de précipitation ont induit un transfert hydro-sédimentaire significatif au droit des béttoires. Sur ces deux années, le flux sédimentaire (SY) cumulé est estimé à $SY_{WS} = 262\ 806$ kg et les volumes ruisselés cumulés sont de $V_{WS} = 213\ 225$ m^3 . La grande majorité des évènements sont intervenus durant les périodes printanières ($SY_{WS_pri} = 131\ 672$ kg ; $V_{WS_pri} = 94\ 732$ m^3) et hivernales ($SY_{WS_hiv} = 88\ 413$ kg ; $V_{WS_hiv} = 62\ 590$ m^3). Sur les 269 évènements modélisés, seuls 126 évènements ont induit une réponse hydro-sédimentaire sur le BAC. 61% du flux sédimentaire ($SY_{WS} = 162\ 168$ kg) et 52% des volumes ruisselés ($V_{WS} = 110\ 877$ m^3) ont été transportés au droit des béttoires connectées au cours de sept évènements majeurs (i.e. 0,95% du temps). Ces résultats mettent en avant le caractère évènementiel inhérent à ces processus. Sur les 126 évènements, le flux sédimentaire et le volume ruisselé maximum ont atteint respectivement 38 380 kg et 38 471 m^3 . En moyenne, le flux sédimentaire pour chaque évènement est de 2 102 kg et le volume ruisselé de 1 705 m^3 , mais on observe une très forte variabilité selon la nature de l'évènement ($\sigma SY_{WS} = 5\ 826$ kg ; $\sigma V_{WS} = 4\ 437$ m^3).

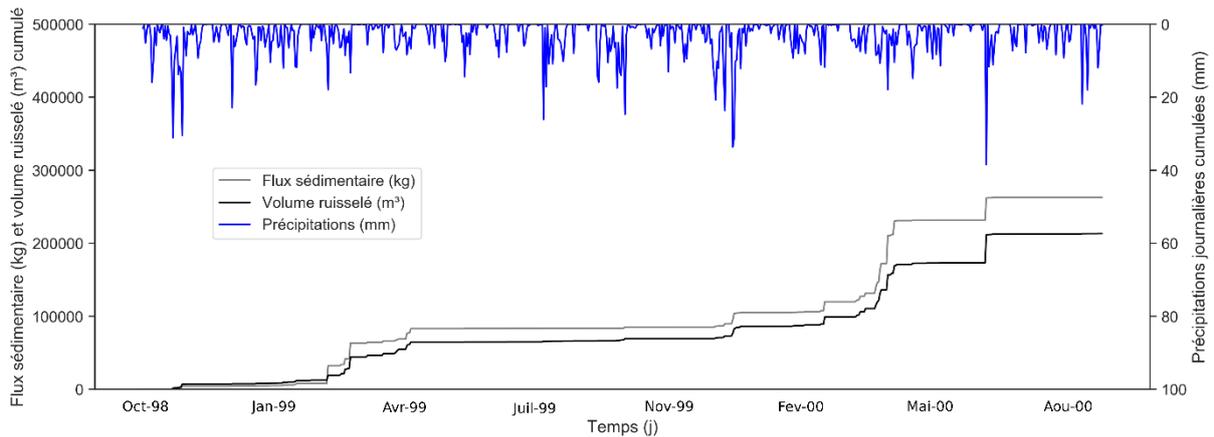


Figure 130 : Flux sédimentaire (kg) et volume ruisselé (m³) cumulés, simulés par le modèle *WaterSed*, puis extraits et sommés au droit des bétoires connectées d'Octobre 1998 à Septembre 2000.

4.2 Réseau de neurones profond : calibrage & incertitudes

Les résultats de modélisation du modèle *WaterSed*, sur les deux années hydrologiques H12 et H13, et au droit des bétoires connectées ont ainsi été utilisés comme données d'entrée du réseau de neurones profond. Les chroniques de précipitations (P , P_{48}) ont également été considérées comme données d'entrée pour le réseau de neurones profond. La chronique de turbidité transformée en flux sédimentaire (à l'aide du débit de pompage) à l'entrée de la station de traitement a quant à elle été utilisée comme donnée de sortie (i.e. variable à prédire). Le réseau de neurones profond a été entraîné sur la période d'octobre 1998 à février 2000 (511 évènements), et les 220 évènements restants (de mars à septembre 2000) ont été utilisés comme ensemble de test. Les résultats de modélisation du réseau de neurones profond (Figure 131) nous montrent une excellente capacité du modèle à reproduire la variabilité temporelle des flux sédimentaires mais aussi les pics observés à la station de traitement. Les valeurs des critères d'efficacité sont globalement très satisfaisantes sur la période de test ($NSE = 0,82$; $RMSE = 383$ kg) et légèrement moins performantes sur la période d'entraînement ($NSE = 0,6$; $RMSE = 420$ kg). Ces valeurs sont au-dessus des conditions limites basses d'efficacité suggérées dans la littérature ($0,5 < NSE < 0,65$; Moriasi et al., 2007 ; Ritter et al., 2013).

Sur la période étudiée, le flux sédimentaire cumulé observé à la station de traitement est de 158 611 kg alors que le flux sédimentaire cumulé simulé est de 129 253kg (sous-estimation de 19%). En comparant le flux sédimentaire cumulé observé à la station AEP et celui-ci simulé par le modèle *WaterSed* au droit des bétoires, on observe un taux de restitution de 60%, ce qui est en adéquation avec les résultats de traçage connus sur le BAC de Radicatel. En effet, Hanin (2011) suggère l'existence de connections karstiques rapides entre les bétoires connectées et les sources AEP sur le BAC de Radicatel avec des taux de restitution de 62%. En considérant le flux sédimentaire simulé par le réseau de neurones profond, le taux de restitution chute à 50%. Pour les 126 évènements pour lesquels du ruissellement est observé sur la surface du BAC de Radicatel, les flux sédimentaires observés et prédits sont estimés respectivement à 88 114 kg et 78 870 kg, ce qui suggère que le transfert direct compte pour 55-61% du signal. Ces résultats sont globalement cohérents mais légèrement inférieurs à ceux de Masséi et al. (2003) sur le système karstique de Norville, qui évalue la part du transfert direct à 73% lors d'épisodes érosifs.

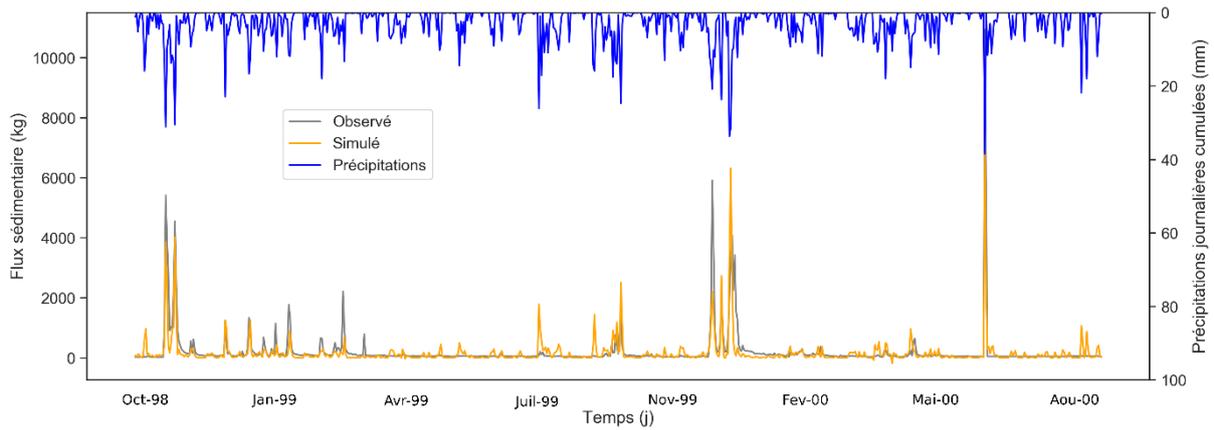


Figure 131 : Flux sédimentaire (kg) observé (en gris) et simulé (en orange) par le réseau de neurones profonds à la station de traitement AEP du BAC de Radicatel.

La procédure de validation croisée imbriquée avec réduction mensuelle des données permet d'évaluer la capacité de généralisation du réseau de neurones profonds sur un nouveau set de données. Cette procédure a été répétée douze fois sur le set de données, tout en gardant à minima une année hydrologique complète en entrée de modélisation (Figure 132). Les résultats de modélisation (et donc de généralisation) sont moins performants que pour le set de données complet mais globalement satisfaisants. La médiane du NSE pour les ensembles d'entraînement et de test se situe au-dessus de la limite basse du seuil fixée à 0,5 (Moriassi et al., 2007 ; Ritters et al., 2013). La valeur médiane du $RMSE$ sur les ensembles d'entraînement et de test se situe dans le même ordre de grandeur que pour le set de données complet (370-500 kg). Malgré des performances très honorables, les difficultés du modèle à généraliser suggèrent un problème classique en machine learning, le dilemme biais-variance (Geman et al., 1992). Idéalement, le modèle doit refléter avec précision les irrégularités dans les données d'apprentissage tout en se généralisant aux données test, mais il est impossible de faire les deux en même temps. Les valeurs de NSE plus élevées et de $RMSE$ plus faibles sur les ensembles d'entraînement, suggèrent un modèle complexe avec une variance élevée et un biais fiable qui représente assez bien les données d'apprentissage mais présente un risque de surapprentissage sur les données test. Le modèle peut ainsi représenter une partie du bruit aléatoire du jeu d'apprentissage.

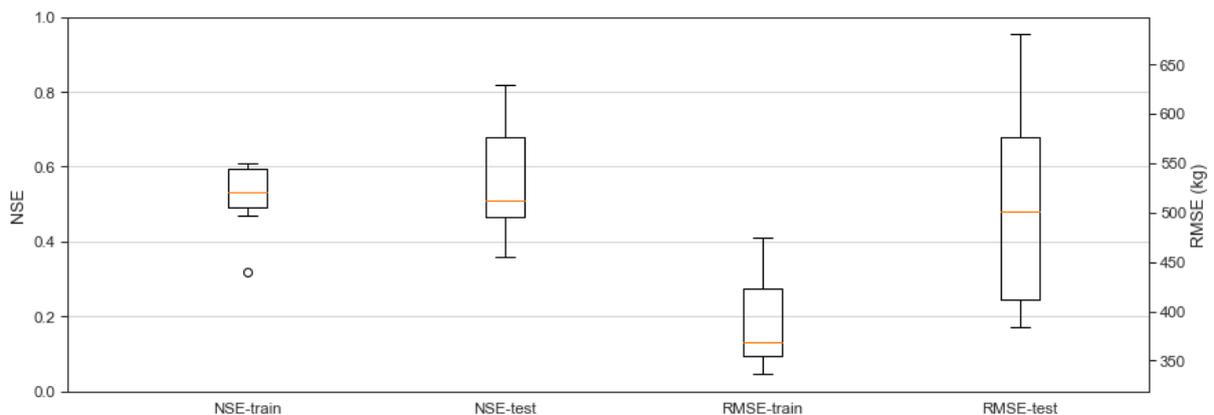


Figure 132 : Boxplots des critères d'efficacité (NSE , $RMSE$) calculés pour les différents sous-ensembles produits lors de la procédure de validation croisée imbriquée avec réduction mensuelle.

La seconde étape de validation vise à confronter le flux sédimentaire simulé à la station de traitement AEP par le réseau de neurones profonds avec les valeurs obtenues en utilisant la loi

d'extrémum généralisée pour les cinq pluies de projet. Dans un premier temps, nous avons modélisé les flux sédimentaires au droit des bétaires connectées pour les cinq pluies de projet sur le scénario de base. Nos résultats indiquent que le flux sédimentaire au droit des bétaires connectées s'élève à 8 215 kg ; 37 207 kg ; 86 102 kg ; 145 718 kg ; et 178 960 kg pour les pluies de projet $P_{0,5}$, P_2 , P_{10} , P_{50} , et P_{100} . Les résultats de modélisation du modèle *WaterSed* ont ensuite été utilisées comme données d'entrée du réseau de neurones profond avec les caractéristiques des cinq pluies de projet (Figure 133). Les résultats de simulation du réseau de neurones profond sont en parfaite adéquation avec la distribution des valeurs extrêmes modélisées par GEV ($R^2 = 0,99$). Ainsi, les flux sédimentaires simulés par le réseau de neurones profond sont respectivement de 5 901 kg ; 9 841 kg ; et 12 200 kg pour P_{10} , P_{50} , et P_{100} . Les prédictions sont plus faibles pour $P_{0,5}$ et P_2 avec respectivement 576 et 2 616 kg en entrée de station de traitement.

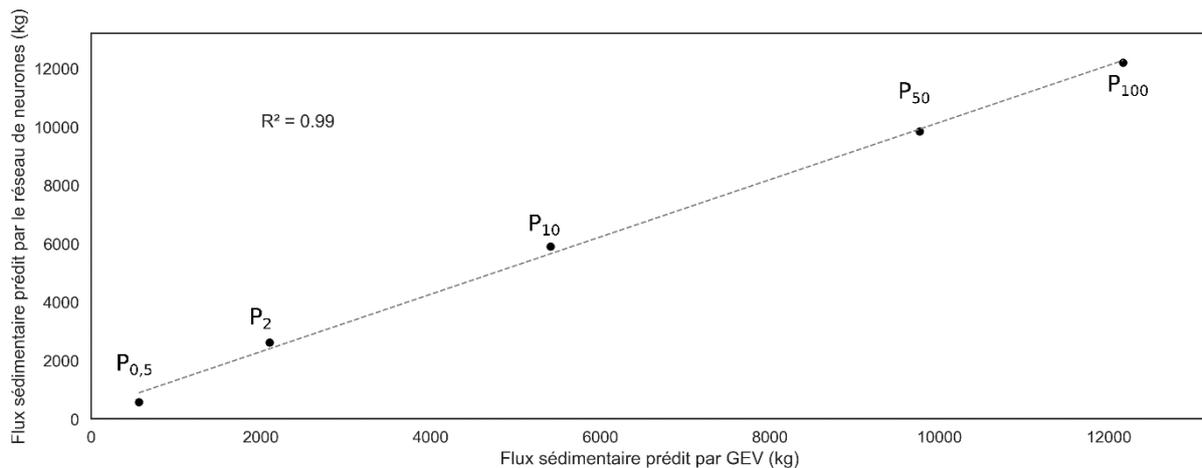


Figure 133 : Comparaison entre le flux sédimentaire (kg) prédit par la loi d'extrémum généralisée et simulé par le réseau de neurones profonds pour les cinq pluies de projet.

4.3 Application du modèle couplé aux scénarios

Une fois la phase de calibration du modèle réalisée et l'architecture du réseau de neurones profond définie, nous pouvons appliquer le modèle pour les différents scénarios prédéfinis. Comme précédemment, la première étape consiste à modéliser les ruissellements avec le modèle *WaterSed* sur le BAC de Radicatel, pour les différents scénarios, qui serviront de données d'entrée au réseau de neurones profond. Les simulations réalisées avec le modèle *WaterSed* permettent d'apprécier la variabilité des flux hydro-sédimentaires en entrée des bétaires connectées selon les différents scénarios (Figure 134).

Dans le cas d'un retournement de 33% des prairies existantes en culture, on constate une augmentation de l'extension spatiale des ruissellements sur le BAC qui se traduit par une légère augmentation des flux hydro-sédimentaires aux entrées des bétaires. Les flux sédimentaires se situent alors dans une fourchette entre 8 468 et 188 264 kg, ce qui induit une augmentation moyenne de 4,74% par rapport aux résultats de modélisation du scénario de base. L'augmentation de flux sédimentaire est la plus importante pour la P_{10} (7,45%). L'impact sur les volumes ruisselés est plus important, avec une augmentation moyenne de 8,4% pour les cinq pluies de projet, qui se situent entre 2 211 et 67 097 m³.

Concernant le scénario d'aménagement d'hydraulique douce ambitieux (rappel : 181 fascines et 13,1 ha de bandes enherbées), on observe une diminution significative des flux sédimentaires arrivant au droit des bétaires. Les flux sont estimés entre 1 659 et 133 485 kg, ce qui induit une

réduction moyenne de 44%. Ce plan d'aménagement est plus efficace sur les faibles périodes de retour (i.e. 0,5 et 2 ans) avec une réduction des flux comprise entre 79 et 55% respectivement. L'impact sur les périodes de retour plus importantes diminue entre 25 et 34%. L'effet sur les volumes ruisselés n'est pas significatif, avec une diminution de l'ordre de 7%. Ces résultats sont toutefois logiques puisque ce plan d'aménagement ne comprend que 13,1 ha de bandes enherbées, et l'intérêt principal des fascines repose sur leur capacité à piéger les matières en suspensions, notamment les éléments les plus grossiers (AREAS, 2012).

Enfin, pour le dernier scénario qui considère l'adoption de meilleures pratiques agricoles sur 50% des cultures (i.e. +15% de capacité d'infiltration), les résultats de simulation montrent une réduction très significative des flux hydro-sédimentaires, avec une moyenne de 49% pour les flux sédimentaires (741 – 134 001 kg ; $P_{0,5}$ – P_{100}) et une moyenne de 42% pour les volumes ruisselés (720 – 47 442 m³ ; $P_{0,5}$ – P_{100}). Ce scénario est plus efficace que le scénario d'aménagement d'hydraulique douce ambitieux, quelle que soit la pluie de projet sélectionnée.

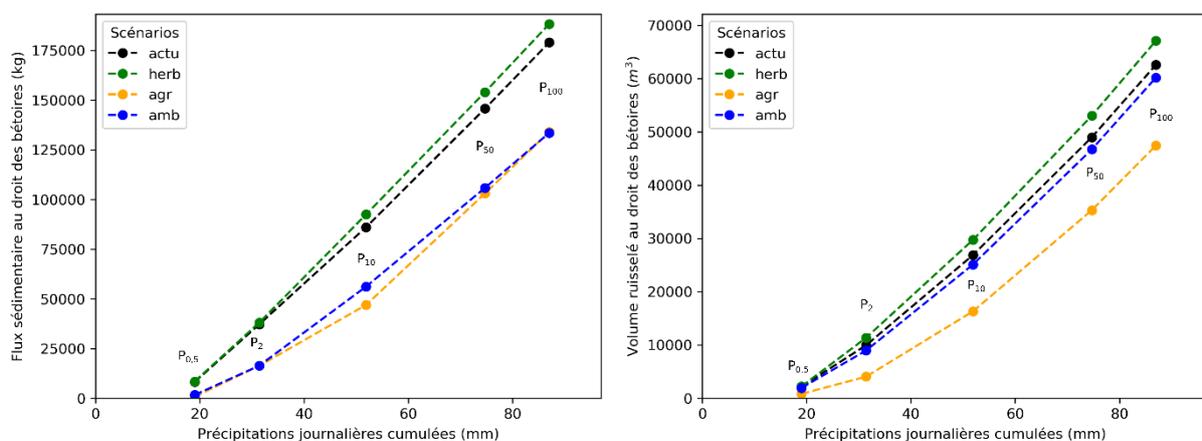


Figure 134 : Flux sédimentaires (kg) et volumes ruisselés (m³) simulés par le modèle WaterSed au droit des bétaires connectées sur le BAC de Radicatel pour les cinq pluies de projet selon les différents scénarios prédéfinis. (actu = scénario actuel 2018 ; amb = scénario d'aménagement d'hydraulique douce ambitieux ; agr = amélioration des pratiques agricoles sur 50% des surfaces en culture ; herb = retournement de 33% des prairies).

Les prédictions du modèle *WaterSed* ont ensuite été injectées en entrée du réseau de neurones profond avec les caractéristiques des pluies de projet afin de simuler les flux sédimentaires en entrée de station AEP pour les différents scénarios. Pour rappel, les flux sédimentaires simulés pour le scénario de base s'étendent de 576 à 12 200 kg pour les cinq périodes de retour modélisées. Les tendances des résultats de simulation pour les autres scénarios sont présentées dans la Figure 135.

On constate une augmentation du flux sédimentaire en entrée de station pour le scénario de retournement des prairies par rapport au scénario de base (4,5% en moyenne), avec un flux sédimentaire maximum de 12 894 kg pour la P_{100} . L'augmentation est moins significative pour les périodes de retour faibles (+0,42-3,29%) que pour les périodes de retour plus élevées (+5,68-6,82%).

Pour le scénario d'aménagement d'hydraulique douce ambitieux, les résultats de simulation montrent une diminution significative du flux sédimentaire en entrée de station. Ainsi, les flux sédimentaires décroissent entre 515 et 9 810 kg, pour respectivement la $P_{0,5}$ et la P_{100} , pour une diminution moyenne de l'ordre de 25,4%. La réduction des flux est particulièrement efficace pour la P_2 , avec une diminution de 44,7%. Ces résultats sont globalement en adéquation avec ce que l'on peut observer sur le territoire, en particulier les valeurs sont du même ordre de grandeur que celles trouvées par Fournier et al. (2008), qui montrent par un modèle d'interpolation paramétrique que les

aménagements installés sur l'aquifère du Caumont (principalement aménagements de bétaires), ont induit une réduction de 36% de la turbidité au captage des Varras (27).

Enfin, pour le dernier scénario (i.e. amélioration des pratiques agricoles), la réduction du flux sédimentaire est particulièrement efficace. Les flux simulés sont de 223 à 9 165 kg, pour respectivement la $P_{0,5}$ et la P_{100} . Les flux sédimentaires en entrée de station sont en moyenne réduits de 43%. Ce scénario d'aménagement peut même atteindre plus de 50% de réduction sur les pluies de projet P_2 et P_{10} .

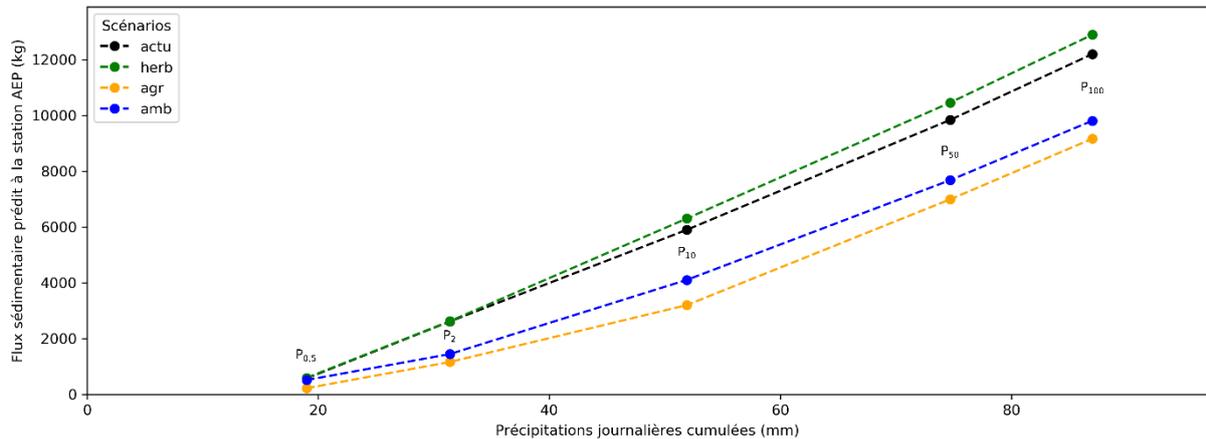


Figure 135 : Flux sédimentaire (kg) simulé à l'entrée de la station de traitement AEP par le réseau de neurones profond pour les cinq pluies de projet et les différents scénarios. (actu = scénario actuel 2018 ; amb = scénario d'aménagement d'hydraulique douce ambitieux ; agr = amélioration des pratiques agricoles sur 50% des surfaces en culture ; herb = retournement de 33% des prairies).

L'ensemble des résultats de modélisation sont récapitulés dans le Tableau 65.

Tableau 65 : Synthèse des résultats de modélisation du modèle WaterSed et du réseaux de neurones profond sur le BAC de Radicatel pour les 5 pluies de projets et les scénarios retenus (SY = flux sédimentaire ; V = volume ruisselé ; actu = scénario actuel 2018 ; amb = scénario d'aménagement d'hydraulique douce ambitieux ; agr = amélioration des pratiques agricoles sur 50% des surfaces en culture ; herb = retournement de 33% des prairies).

WaterSed																				
Scéna rio	Période de retour de la pluie																			
	P _{0,5}				P ₂				P ₁₀				P ₅₀				P ₁₀₀			
	SY (kg)	Diff (%)	V (m ³)	Diff (%)	SY (kg)	Diff (%)	V (m ³)	Diff (%)	SY (kg)	Diff (%)	V (m ³)	Diff (%)	SY (kg)	Diff (%)	V (m ³)	Diff (%)	SY (kg)	Diff (%)	V (m ³)	Diff (%)
Actu	8 215	-	2 174	-	37 207	-	9 952	-	86 102	-	26878	-	145 718	-	48 986	-	178 960	-	62 580	-
Amb	1 659	-79,8	1 949	-10	16 420	-55,8	8 960	-9,9	56 212	-34,7	25107	-6,6	105 869	-27,3	46 707	-4,6	133458	-25,4	60 189	-3,8
Agr	741	-90,9	823	-62	16 347	-56	4 058	-59	46 990	-45,4	16321	-39,3	103077	-29,2	35 302	-27,9	134 001	-25,1	47 442	-24,1
Herb	8 468	+3,1	2 211	+1,7	38 065	+2,3	1 1359	+14	92 518	+7,4	29728	+10,6	154 019	+5,7	53 030	+8,3	188 264	+5,2	67 097	+7,2
Réseau de neurones profond																				
Scéna rio	Période de retour de la pluie																			
	P _{0,5}		P ₂		P ₁₀		P ₅₀		P ₁₀₀											
	SY (kg)	Diff (%)	SY (kg)	Diff (%)	SY (kg)	Diff (%)	SY (kg)	Diff (%)	SY (kg)	Diff (%)										
Actu	576	-	2 616	-	5 901	-	9 841	-	12 200	-										
Amb	515	-10,6	1 445	-44,8	4 104	-30,5	7 680	-21,9	9 810	-19,6										
Agr	223	-61,3	1 161	-55,6	3 200	-45,8	6 994	-28,9	9 165	-24,9										
Herb	595	+3,3	2 627	+0,4	6 304	+6,8	10 461	+6,3	12 894	+5,7										

4.4 Analyse économique

L'application de la fonction de coût de traitement définie dans la partie 3.6, aux résultats de simulations du réseau de neurones profond permet d'évaluer les dommages pour chaque pluie de projet à la station de traitement AEP. Ici, l'évaluation porte sur les quatre scénarios simulés avec le réseau de neurones profond, plus deux scénarios de changement climatique (pour rappel, les scénarios liés au changement climatique sont définis par translation des périodes de retour : voir partie 3.3). En prenant comme référence les résultats de simulation du scénario actuel, nous observons une diminution des coûts de traitement pour les scénarios d'aménagements ambitieux et d'amélioration des pratiques agricoles (Figure 136).

Le scénario d'amélioration des pratiques agricoles (i.e. +15% infiltration sur 50% des cultures) est le plus efficace avec en moyenne une diminution de 43% des coûts. Dans le cas d'une P_{100} , la réduction des coûts est estimée à 24%, passant de 26 492 €₂₀₁₈ H.T à 19 901 €₂₀₁₈ H.T. Elle est la plus élevée pour les pluies de projet P_2 à P_{10} avec une réduction moyenne de l'ordre de 58%.

Dans l'hypothèse de la mise en place d'un scénario d'aménagement d'hydraulique douce ambitieux (i.e. 181 fascines et 13,1 ha de bandes enherbées), on observe une réduction moyenne des coûts de traitement de 25,4%. La réduction est plus importante pour la pluie de projet P_2 , où les coûts passent de 5 680 €₂₀₁₈ H.T à 3 137 €₂₀₁₈ H.T. Les bénéfices de ces aménagements tendent à diminuer sur les périodes de retour plus importantes, avec par exemple pour la P_{100} une diminution des coûts de 26 492 €₂₀₁₈ H.T à 21 302 €₂₀₁₈ H.T (-19%).

Concernant le scénario de retournement de 33% des prairies actuellement existantes, on note cette fois une augmentation des coûts de traitement à la station AEP. L'augmentation est plus importante sur les périodes de retour élevées, notamment P_{10} à P_{100} , avec une augmentation moyenne de l'ordre de 6,27%. Dans le cas d'une P_{100} , les coûts de traitement passeraient de 26 492 €₂₀₁₈ H.T à 27 999 €₂₀₁₈ H.T.

Conformément à nos hypothèses de travail, les coûts de traitement dans le cadre d'un changement climatique sont équivalents aux coûts du scénario actuel, mais translatés temporellement. A titre d'exemple, les coûts de traitement induits par la P_2 sont de 5 680 €₂₀₁₈ H.T avec une période de retour de 24 mois pour le scénario « actu ». Pour les scénarios « ccm » et « ccf », le coût est toujours de 5 680 €₂₀₁₈ H.T pour une P_2 , mais les périodes de retour sont respectivement de 20 et 16 mois.

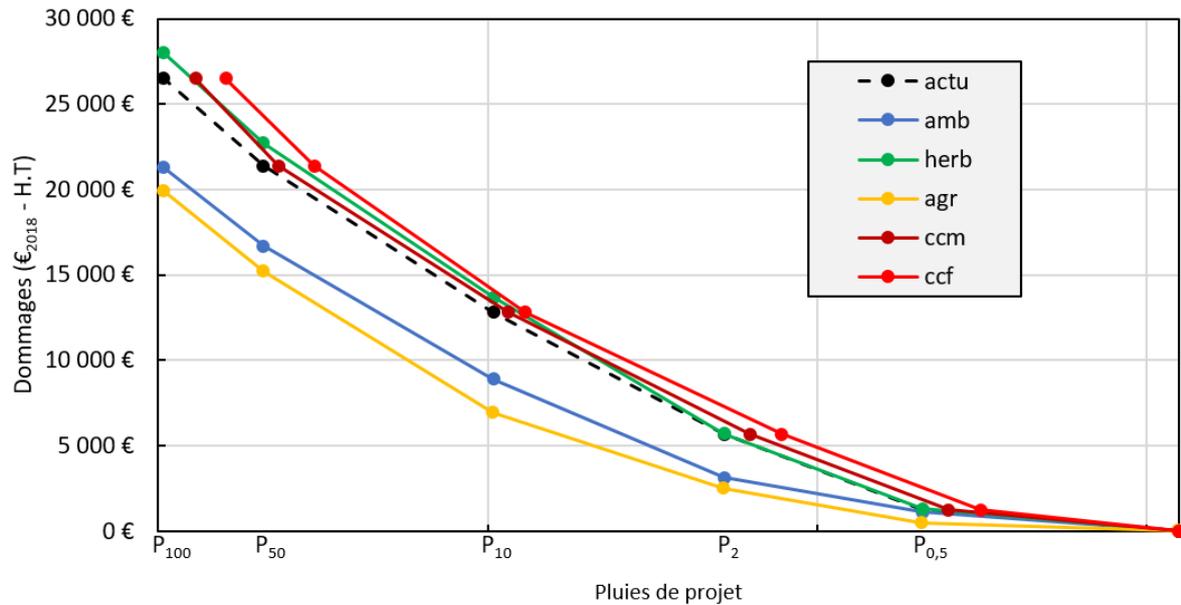


Figure 136 : Courbes fréquence-dommage pour les six scénarios modélisés dans le cadre de l'étude. (actu = scénario actuel 2018 ; amb = scénario d'aménagement d'hydraulique douce ambitieux ; agr = amélioration des pratiques agricoles sur 50% des surfaces en culture ; herb = retournement de 33% des prairies ; ccm = changement climatique moyen basé sur le scénario RCP4.5 ; et ccf = changement climatique fort basé sur le scénario 8.5).

L'analyse des courbes fréquence-dommage permet d'évaluer l'évolution du dommage moyen annuel (DMA) pour chaque scénario. Le DMA pour le scénario de référence (actuel) est estimé à 17 089 €₂₀₁₈ H.T. Pour les scénarios d'amélioration des pratiques et d'aménagement d'hydraulique douce ambitieux, le DMA diminue respectivement à 7 878 et 12 673 €₂₀₁₈ H.T à l'horizon 2050. Concernant le scénario de retournement des prairies, le DMA en 2050 est évalué à 17 646 €₂₀₁₈ H.T. Enfin, dans l'hypothèse d'un changement climatique moyen à fort, le DMA est en augmentation entre 18 928 et 21 679 €₂₀₁₈ H.T.

Par inter-comparaison avec le scénario de référence (actuel), il est ainsi possible de quantifier le dommage évité moyen annuel (DEMA) à l'horizon 2050 pour chaque scénario modélisé (Figure 137). Ainsi, le scénario le plus efficace est celui qui considère une amélioration des pratiques agricoles avec un DEMA de 9 210 €₂₀₁₈ H.T. Pour le scénario d'aménagement ambitieux, le DEMA s'élève à 4 415 €₂₀₁₈ H.T. Dans le cas d'un retournement de 33% des prairies existantes, le DEMA est de -556 €₂₀₁₈ H.T. Et enfin, dans l'hypothèse d'un changement climatique moyen à fort, le DEMA est respectivement de -1 839 et -4 589 €₂₀₁₈ H.T.

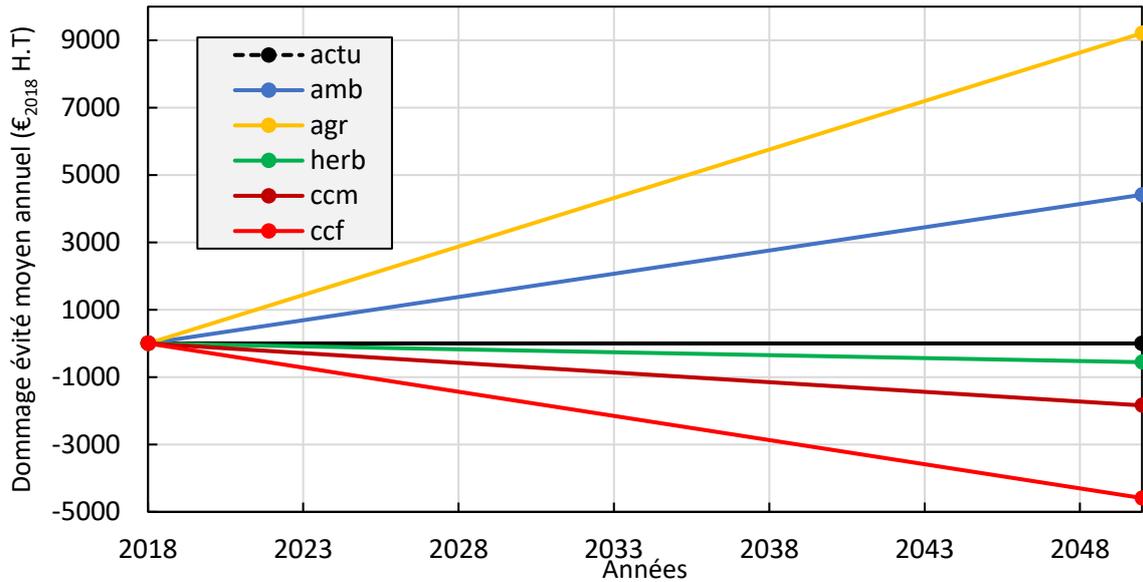


Figure 137 : Evolution des dommages évités moyens annuels (DEMA) sur la période 2018-2050 et induits par les coûts de traitement des flux sédimentaires à la station AEP de Radicatel. Ces résultats montrent les différents scénarios d'évolution future considérés dans le cadre de l'étude (actu = scénario actuel 2018 ; amb = scénario d'aménagement d'hydraulique douce ambitieux ; agr = amélioration des pratiques agricoles sur 50% des surfaces en culture ; herb = retournement de 33% des prairies ; ccm = changement climatique moyen basé sur le scénario RCP4.5 ; et ccf = changement climatique fort basé sur le scénario 8.5).

L'ensemble des résultats de l'analyse économique sont récapitulés dans le Tableau 66.

Tableau 66 : Synthèse des résultats de l'analyse économique sur le BAC de Radicatel pour les 5 pluies de projets et les scénarios retenus (DMA = dommage moyen annuel ; DEMA= dommage évité moyen annuel ; actu = scénario actuel 2018 ; amb = scénario d'aménagement d'hydraulique douce ambitieux ; agr = amélioration des pratiques agricoles sur 50% des surfaces en culture ; herb = retournement de 33% des prairies, ccm = changement climatique moyen, ccf = changement climatique fort).

Coût des dommages à la station AEP										
Scéna rio	Période de retour de la pluie									
	P _{0,5}		P ₂		P ₁₀		P ₅₀		P ₁₀₀	
	Coût (€)	Diff (%)	Coût (€)	Diff (%)	Coût (€)	Diff (%)	Coût (€)	Diff (%)	Coût (€)	Diff (%)
Actu	1 250,8	-	5 680,6	-	12 814	-	21 369,7	-	26 492,3	-
Amb	1 118,3	+10,6	3 137,8	-44,7	8 911,8	-30,4	21 302,4	-21,9	21 302,4	-19,6
Agr	484,2	-61	2 521,1	-55,6	6 948,8	-45,7	19 901,8	-28,9	19 901,8	-24,9
Herb	1 292	+3,3	5 704,5	+0,4	13 689,1	+6,8	22 716	+6,3	27 999,3	5,7
Indicateurs économiques										
Scéna rio	DMA (€ ₂₀₁₈ H.T)			Diff (%)			DEMA (€ ₂₀₁₈ H.T)			
Actu	17 089,2			-			-			
Amb	12 673,4			-25,8			4 415,85			
Agr	7 878,89			-54			9 210,3			
Herb	17 646,1			+3,2			-556,9			
Ccm	18 928,8			+10,7			-1 839,6			
Ccf	21 679,1			+26,8			-4 589,9			

5 Bilan du Volume 4

Pour répondre aux objectifs initiaux, cette étude s'est attachée à développer une approche de modélisation originale, capable de simuler la variabilité des transferts sédimentaires au captage AEP du BAC de Radicatel, selon différentes pluies de projet et plusieurs scénarios d'occupation du sol.

Le modèle ainsi développé est issu d'un couplage entre un modèle semi-dynamique d'érosion et de ruissellement (WaterSed) et un modèle de réseau de neurones profond (Deep Learning). Cette approche permet d'utiliser les flux hydro-sédimentaires prédits par le modèle *WaterSed*, au droit des bêttoires connectées sur le BAC, comme données d'entrées pour le réseau de neurones profond.

Le modèle couplé a montré d'excellentes capacités de prédiction des flux sédimentaires à la station AEP lors de la phase de calibration/validation, et a ainsi pu être utilisé sur les différents scénarios. L'application du modèle couplé révèle que la mise en place d'un programme d'aménagements d'hydraulique douce ambitieux (181 fascines + 13,1 ha de bandes enherbées), ou bien une amélioration des pratiques agricoles (+15% capacité d'infiltration) sur le BAC de Radicatel, entraîne une réduction moyenne des flux sédimentaires entrant à la station AEP entre 25,4 et 43%. En revanche, le retournement de 33% des prairies existantes actuellement entraînerait une augmentation des flux sédimentaires à la station AEP de 4,5% (ces résultats semblent toutefois influencés par la localisation des prairies retournées).

Sur la base de données fournies par le LHSM (gestionnaires du captage AEP de Radicatel), une fonction de coût de traitement a été créée et appliquée aux résultats de simulation du modèle couplé. L'analyse économique, à l'horizon 2050, révèle que dans le cas de la mise en place d'un programme d'aménagement ambitieux, ou bien de l'amélioration des pratiques agricoles, le dommage moyen annuel sera significativement réduit, entre 25,8 et 54%. En revanche, dans l'hypothèse d'un retournement de 33% des prairies existantes, ou bien d'un changement climatique moyen à fort, le dommage moyen annuel augmentera respectivement de 3,2 à 26,8%.

Ces résultats fournissent des éléments clés pour une éventuelle adaptation de la politique publique visant à réduire l'érosion et le ruissellement, sur ce territoire. Compte tenu de la tendance actuelle (i.e. changement climatique), il semble important d'orienter les actions visant à réduire les ruissellement et l'érosion, vers une modification des pratiques agricoles, tout en maintenant la création d'aménagement d'hydraulique douce.

Toutefois, l'extrapolation de ces résultats sur d'autres territoires n'est pas envisageable pour le moment. Il semble indispensable de généraliser cette étude sur d'autres sites, afin d'évaluer le comportement du modèle dans d'autres contextes. Également, il semble important de tester de nouvelles combinaisons d'occupation du sol afin d'évaluer la sensibilité de ces paramètres (i.e. localisation des prairies retournées, localisation des parcelles améliorées, localisation/combinaison des aménagements) sur la variabilité des flux sédimentaires.

Conclusion finale :

Enseignements et perspectives

Conclusion finale

L'objectif du programme « Evapore » est d'évaluer l'efficacité des actions menées pour réduire les impacts du ruissellement et de l'érosion des sols en Seine-Maritime et dans l'Eure depuis le début des années 2000. Il porte sur une Analyse Coût Bénéfice des dommages et des mesures liées aux inondations et coulées boueuses consécutives au ruissellement, et à la turbidité aux captages d'eau potable. Ce travail a été mené par trois partenaires aux compétences complémentaires : le Laboratoire Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C) de l'Université de Rouen Normandie, l'Association de Recherche sur le Ruissellement, l'Erosion et l'Aménagement des sols (AREAS) et le Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM), avec le soutien de l'Agence de l'Eau Seine Normandie et des départements de la Seine-Maritime et de l'Eure. C'est la première fois qu'une démarche de ce type est menée en Normandie sur les inondations par coulées d'eau boueuse et la dégradation de la qualité de l'eau par la turbidité en lien avec le ruissellement.

Les résultats attendus sont de trois ordres :

- Réaliser une évaluation technico-économique de la politique menée depuis 2000 en Seine-Maritime et dans l'Eure, visant à réduire le ruissellement, l'érosion des sols, les coulées de boues/inondations et la turbidité aux captages AEP,
- Tester des scénarios de généralisation de ces mesures et des scénarios d'évolutions d'occupation du sol et du climat ;
- Proposer une adaptation ou réorientation si besoin de la stratégie d'intervention publique.

Le premier volume de ce rapport porte sur le bilan économique global des actions et des dommages liés aux inondations par ruissellement, à l'érosion des sols et à la turbidité aux captages en Haute-Normandie, depuis les événements marquants de la fin des années 1990 et du début des années 2000. Les dommages aux particuliers et aux entreprises sont estimés à plus de 220 millions d'euros sur la période 1998-2016 pour les événements classés « Catastrophes Naturelles », à partir des données de la Caisse Centrale de Réassurance. Les dommages aux infrastructures, notamment les routes et le réseau ferroviaire, sont moins bien renseignés et n'ont pas pu être évalués de manière exhaustive. Selon les données de l'Agence Régionale de Santé, les dommages liés à la turbidité aux captages se répartissent en 2 catégories : coûts consécutifs aux arrêts temporaires de distribution d'eau potable (5 millions d'euros entre 1992 et 2018) et aux abandons de captages (5 millions d'euros pour 2 captages abandonnés entre 1999 et 2017, mais une trentaine de captages avaient déjà été abandonnés avant). Sur les 2 départements de la Seine-Maritime et de l'Eure, les investissements des collectivités pour les actions visant à réduire les impacts du ruissellement et de l'érosion des sols atteignent 300 à 400 millions d'euros entre 2000 et 2017 (d'après les données compilées des différents financeurs). Les dommages ainsi que les investissements sont nettement plus élevés en Seine-Maritime que dans l'Eure. Ces coûts ne sont pas exhaustifs, en particuliers pour les dommages. Certains impacts ne sont pas pris en compte dans cette étude, notamment la dégradation de la qualité des cours d'eau ou les pertes de terres agricoles.

Ce bilan rétrospectif permet de mesurer l'ampleur de la problématique à l'échelle de 2 départements sur une période récente, mais il ne suffit pas à évaluer l'efficacité des actions menées sur le long terme. Pour cela, deux études approfondies ont été menées sur des territoires plus restreints : une analyse coût bénéfice sur les inondations par ruissellement dans le bassin versant de la Lézarde (208 km²), et une analyse économique des impacts de la turbidité sur les coûts de traitement de l'eau potable au captage de Radicatel (bassin d'alimentation de captage de 106 km²).

La méthodologie mise en œuvre, basée sur des modélisations, permet de comparer plusieurs scénarios entre eux, pour des évènements de différentes périodes de retour :

- Des scénarios avec ou sans actions, afin d'évaluer l'efficacité des aménagements réalisés depuis 2000 ;
- Des scénarios d'aménagement ambitieux, visant à tester l'efficacité finale des programmes d'aménagements en cours de réalisation ;
- Des scénarios prospectifs pour évaluer l'efficacité des actions actuelles dans des contextes qui évoluent : changement climatique, réduction des surfaces en herbe et adoption de pratiques agricoles limitant le ruissellement (agriculture de conservation).

L'analyse coût bénéfice (ACB) des actions réalisées depuis 2000 sur le bassin versant de la Lézarde (76) s'appuie sur la mise en œuvre de 2 modèles complémentaires : modèle hydrologique-hydraulique Mike et modèle de ruissellement et d'érosion des sols WaterSed. Le premier modèle simule l'aléa inondation par débordement de cours d'eau alors que le second simule l'aléa inondation par ruissellement et coulée de boue. Partant des cartographies des aléas, l'ACB a été réalisée sur une période comprise entre 2000 et 2050, en suivant la méthodologie proposée dans le guide « Analyse multicritère des projets de prévention des inondations - Guide méthodologique 2018 » (Commissariat Général au Développement Durable, 2018). Le coût des dommages liés aux inondations est ainsi estimé à partir de fonctions de dommages basées principalement sur la hauteur d'eau modélisée.

Sur le Bassin d'Alimentation de Captage (BAC) de Radicatel (76), le développement d'une approche de modélisation originale a permis de simuler la variabilité des transferts sédimentaires au captage AEP. Le modèle ainsi développé est issu d'un couplage entre le modèle WaterSed et un modèle d'apprentissage automatique (Deep Learning). Cette approche innovante a permis de comparer les coûts de traitement de la turbidité dans l'eau du captage pour plusieurs scénarios.

Sur le bassin de la Lézarde, les résultats de modélisation montrent que les **ouvrages structurants de rétention** (50 bassins et petits barrages en terre sur talwegs secs représentant près d'un million de m³) réduisent significativement les surfaces inondées par débordement de rivière (- 37% pour la période de retour 10 ans). Ces ouvrages structurants, dimensionnés sur la base de références locales sur le ruissellement acquises par l'AREAS, sont rentables d'un point de vue économique, les bénéfices étant environ deux fois plus élevés que les coûts, même si des dommages moyens annuels résiduels persistent à hauteur d'environ 1,4 M€.

Comme prévu, les **aménagements d'hydraulique douce** (haies, fascines, noues, zones enherbées) ont très peu d'impact sur le volume de ruissellement et sur le débit de pointe dans la rivière, même dans le scénario ambitieux. Le dommage évité moyen annuel reste négligeable même pour ce scénario ambitieux. Ces aménagements permettent surtout de réduire localement la charge sédimentaire des écoulements, afin de protéger des enjeux ponctuels (ouvrages, routes, bâti...) contre le dépôt de sédiments. La densité d'aménagements actuels (0,5/km²) est insuffisante pour réduire significativement le flux sédimentaire à l'échelle du bassin versant de la Lézarde. Cependant le scénario ambitieux (5,5 aménagements/km² et 182 ha de zones enherbées) pourrait réduire de 35% le flux sédimentaire à l'échelle du BV (T 50 ans). Sur le BAC de Radicatel, le programme d'aménagement ambitieux proposé (1,7 aménagements /km² et 13 ha de zones enherbées), réduirait significativement le flux de sédiments au captage et donc les coûts de traitement (- 26% en moyenne).

Les scénarios de **changement climatique**, ont permis d'évaluer l'efficacité des ouvrages structurants actuels dans un contexte d'augmentation de la fréquence des évènements extrêmes sur

le bassin versant de la Lézarde. Dans l'hypothèse moyenne (basée sur le scénario « RCP 4.5 » du GIEC), où l'intensité des pluies extrêmes augmenterait de 2%, un événement centennal actuel se produirait en moyenne tous les 80 ans. Dans l'hypothèse forte (basée sur le scénario « RCP 8.5 » du GIEC) où l'intensité des pluies extrêmes augmenterait de 5%, cette période de retour passerait à 65 ans. Le dommage évité moyen annuel augmenterait de 300 k€/an dans l'hypothèse moyenne, et de 1,1 M€/an dans l'hypothèse forte. Cela montre que la pertinence de ces ouvrages est d'autant plus importante que l'on intègre les effets du changement climatique, mais d'un autre côté, le montant des dommages résiduels augmente lui aussi. Sur le BAC de Radicatel, le changement climatique entraînerait une augmentation des coûts de traitement de la turbidité dans l'eau de +10% (hypothèse moyenne) à +27% (hypothèse haute).

Le scénario de **réduction des surfaces en herbe** évalue l'effet d'une baisse d'un tiers des surfaces en prairie à horizon 2050, avec les ouvrages actuels. Il s'agit d'une hypothèse modérée, basée sur la dynamique observée de 1970 à 2010. Sur le BV de la Lézarde, la part de surfaces en prairie passerait ainsi de 16% à 11%. Cette évolution entraînerait une augmentation des volumes de ruissellement (+19% pour T 50 ans) et des flux sédimentaires (+22% pour T 50 ans). Le dommage moyen annuel augmenterait de 400 k€/an (+27%). Dans le cas du BAC de Radicatel (où la part de surfaces en herbe passerait de 22% à 15%), ce scénario entraînerait une faible augmentation du transfert de sédiments vers la nappe à travers le karst, et donc des coûts de traitement (+3% en moyenne). Cependant, l'influence de la position des prairies retournées dans le bassin versant n'a pas été étudiée et il est probable que l'impact sur les coûts de traitement pourrait être plus important, par exemple si les prairies retournées sont à proximité immédiate des bétoures. Une autre hypothèse pourrait être l'existence d'un effet de seuil, caractérisé par une augmentation plus forte des dommages lorsque la part des prairies passe sous une certaine valeur.

Le scénario d'**adaptation des pratiques agricoles** est basé sur la mise en œuvre de pratiques agricoles favorisant l'infiltration et limitant le ruissellement (type agriculture de conservation) sur 50% des surfaces cultivées à horizon 2050. Ce scénario conduirait à une forte diminution du ruissellement (-40% pour T 50 ans) et du flux sédimentaire (-49% pour T 50 ans) sur le BV de la Lézarde. 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 diminution du dommage moyen annuel de 250 k€/an (-20%). Dans le cas du BAC de Radicatel, ce scénario entraînerait une forte réduction du transfert de sédiments dans les bétoures et des coûts de traitement associés (-54%).

Les méthodes mises en œuvre dans ce programme de recherche appliquée présentent plusieurs limites. La représentation de l'infiltration dans les talwegs secs et bétoures nécessite de connaître la capacité d'infiltration de chaque bétoure, qui varie en fonction de nombreux paramètres dont le débit de ruissellement. En l'absence de données de mesure sur ces paramètres, des hypothèses simplistes ont été retenues. Le modèle hydro-sédimentaire ne permet pas de représenter correctement les dépôts de sédiments sur les routes et dans le bâti. De plus, les fonctions de dommage utilisées sont basées sur la hauteur d'eau et n'intègrent pas de paramètres relatifs à la charge sédimentaire des écoulements. 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 aujourd'hui de construire des fonctions de dommage permettant de saisir ce phénomène. Les coûts intangibles ne sont pas non plus pris en compte dans la balance. Par ailleurs, la fonction de coûts construite à partir d'enquêtes auprès de gestionnaires d'eau potable, bien qu'innovante, ne permet pas d'intégrer tous les impacts de la turbidité aux captages. L'amélioration de ces fonctions de coûts constitue une perspective pour des travaux de recherches futures. Les gestionnaires pourraient être encouragés à collecter les données nécessaires. Cela permettrait de

mieux connaître les impacts du ruissellement et de l'érosion, et de réaliser une meilleure appréciation des bénéfices fournis par les aménagements d'hydraulique douce notamment.

Même si les fonctions de dommages basées sur les dépôts de sédiments et les fonctions de coûts de traitement liés à la turbidité restent à affiner, la méthode a permis de quantifier l'effet des aménagements d'hydraulique douce sur les transferts de sédiments à plusieurs échelles : échelle locale (bétoire, ouvrages de rétention), échelle du bassin versant, et même à l'échelle du bassin d'alimentation de captage comprenant les circulations karstiques (prédiction de la turbidité au captage). De plus, ces types d'aménagements apportent aussi des bénéfices purs en termes de création d'habitats naturels favorables à la biodiversité, d'amélioration de la recharge des aquifères, de stockage de carbone, de protection des cultures voisines par hébergement d'auxiliaires, d'amélioration de la vie du sol et de sa fertilité, de production de bois énergie, de bois d'œuvre, de fourrage, de création d'emplois, d'amélioration de l'aménité paysagère des territoires agricoles.

Le programme Evapore porte spécifiquement sur les impacts du ruissellement et de l'érosion des sols du point de vue des inondations, coulées boueuses, et de la turbidité aux captages d'eau potable. Ces phénomènes ont d'autres conséquences sur les masses d'eau : pics de pollution ponctuels des nappes par entraînement de polluants à travers le karst (pesticides, phosphore, contamination bactérienne), ensablement et pollution des rivières pouvant entraîner la dégradation des écosystèmes aquatiques.

Enfin, l'érosion des sols et la perte de fertilité qui en résulte peuvent avoir à terme des impacts majeurs sur la production agricole et l'alimentation des populations.

Enseignements et Perspectives

Les ouvrages structurants de réduction de l'aléa, tels qu'ils ont été dimensionnés (à partir de références régionales) et mis en œuvre sur le bassin versant de la Lézarde, sont efficaces pour réduire le coût des dommages liés aux inondations. Le choix de créer de nouveaux ouvrages dans des secteurs non encore protégés doit cependant reposer sur une évaluation préalable de leur efficacité par une analyse spécifique de type coût bénéfice ou multi-critères. Dans tous les cas, ces ouvrages ne permettent pas de supprimer l'aléa, et les dommages résiduels restent conséquents (1,4 M€/an en moyenne sur le bassin versant de la Lézarde). Il reste donc indispensable de mettre en œuvre des actions complémentaires : développement d'outils de prévision des crues, d'alerte, formation à la gestion de crise, réduction de la vulnérabilité des enjeux existants et prise en compte du risque dans les nouveaux aménagements. Ces actions doivent reposer sur le développement d'une culture du risque parmi la population, les acteurs économiques et les décideurs.

Les aménagements d'hydraulique douce ne constituent pas une réponse aux inondations par ruissellement et coulées boueuses. Leur efficacité se limite à la protection d'enjeux ponctuels vis-à-vis des dépôts de boue (voiries, réseaux, ouvrages de rétention, bâti), et vis-à-vis du transfert de sédiments à travers le karst (bétoires) vers les captages d'eau potable. Sur le bassin versant de la Lézarde, une densité de 5 aménagements par km² permettrait de réduire significativement les transferts de sédiments (de l'ordre de 35% pour T 50 ans). La densité actuelle étant de 0,5 aménagement par km², il faudrait multiplier par 10 le nombre d'aménagements pour atteindre ce niveau d'efficacité. Le constat est similaire sur le bassin d'alimentation du captage de Radicatel. Au-delà de la densité d'aménagement, le choix des types d'aménagements et la manière de les combiner dans l'espace en fonction des objectifs retenus sont des pistes de travail à approfondir si l'on souhaite optimiser l'efficacité des programmes d'hydraulique douce.

Sur la base des hypothèses retenues, le changement climatique risque d'aggraver le ruissellement et l'érosion des sols, et donc les inondations, coulées boueuses et turbidité aux captages d'eau potable à horizon 2050, surtout dans l'hypothèse forte (basée sur le scénario « RCP 8.5 » du GIEC). Les effets du changement climatique sont évalués à occupation du sol constante. Or, le changement climatique entraînera certainement une évolution des pratiques agricoles, des cultures, et de l'occupation des sols, difficile à appréhender aujourd'hui, mais qui influencera à son tour le ruissellement et l'érosion des sols.

Les résultats du programme Evapore montrent que les principaux leviers d'action pour limiter le ruissellement, l'érosion des sols et leurs impacts sont :

- **La préservation des surfaces en herbe ;**
- **L'adoption par les agriculteurs de pratiques limitant le ruissellement sur les surfaces en culture.**

L'avantage de ces solutions est qu'elles limitent le ruissellement à la source, et réduisent donc l'ensemble des impacts, y compris l'érosion des sols. Leur principale difficulté est qu'elles reposent toutes deux sur les agriculteurs, qui sont soumis par ailleurs à de multiples pressions. **L'enjeu des politiques de réduction du ruissellement et de l'érosion est aujourd'hui d'accompagner l'adoption de pratiques, voire de systèmes agricoles favorisant l'infiltration de l'eau dans le sol, tout en générant des revenus pour l'agriculteur.** Ces solutions émergent aujourd'hui y compris en Haute-Normandie : il s'agit notamment de l'agriculture de conservation des sols, et des systèmes d'élevage herbager économes en intrants. Une des motivations pour l'adoption de ces systèmes par les agriculteurs est la baisse des charges d'exploitation. Mais ces changements de systèmes nécessitent une prise de risque pendant la phase de transition, ce qui peut constituer un obstacle pour beaucoup d'exploitants.

Ces politiques peuvent se traduire par des actions de communication, d'accompagnement, de formation des agriculteurs, à travers le partage d'expériences de transition réussies, par un accompagnement financier des agriculteurs souhaitant s'engager, par la création de débouchés pour valoriser les produits agricoles issus de ces systèmes. Des outils sont en train d'émerger pour permettre aux collectivités de porter des actions de ce type (paiements pour services environnementaux, projets alimentaires de territoire...).

Peu de collectivités locales sont aujourd'hui en mesure de mettre en œuvre ces actions. Les politiques de prévention des risques d'inondation par ruissellement en Haute-Normandie restent très focalisées sur la promotion des aménagements d'hydraulique douce, la gestion des ouvrages structurants, et la maîtrise de l'urbanisation dans les zones à risque. Les actions sur les pratiques agricoles sont principalement mises en œuvre dans les bassins d'alimentation de captages prioritaires, où les enjeux sont multiples (turbidité, pesticides, nitrates).

Ces actions sont basées principalement sur un travail d'animation sur le terrain. Elles nécessitent des compétences particulières, et doivent s'appuyer sur les organismes agricoles existants : conseil agricole au sens large, groupes d'agriculteurs.

Un effort de recherche et de développement devrait accompagner la mise en œuvre de ces actions. Un certain nombre de références existent déjà en Haute-Normandie, acquises à partir de mesures de terrain sur le ruissellement et l'érosion, qui peuvent aider à développer des systèmes agricoles et des pratiques culturelles moins ruisselants. Les méthodes mises en œuvre dans le cadre du projet Evapore ouvrent des pistes pour :

- Prioriser les bétoures à tracer et à protéger, à partir de la connaissance des transferts hydro-sédimentaires au sein de leur bassin d'alimentation,
- Localiser les surfaces en herbe stratégiques à maintenir dans les bassins versants et les bassins d'alimentation de captage sensibles au ruissellement et à l'érosion,
- Optimiser les programmes d'aménagements d'hydraulique douce, complémentaires des actions sur les pratiques agricoles pour la réduction des transferts de sédiments...

Plus généralement, grâce au projet Evapore, nous disposons aujourd'hui d'**outils pour évaluer a priori l'efficacité de différents programmes d'actions de réduction du ruissellement et de l'érosion**, sous l'influence de paramètres climatiques et d'occupation du sol. A ce jour, ces méthodes ont pu être appliquées sur un bassin versant et un bassin d'alimentation de captage. Elles pourraient être développées sur des territoires différents, concernés par des problématiques d'inondation par ruissellement et coulées boueuses, et/ou de turbidité aux captages en lien avec le karst.

Bibliographie

- [1]. Abadi, M., Agarwal, A., Barham, P., Brevdo, E., Chen, Z., Citro, C., Corrado, G. S., Davis, A., Dean, J., Devin, M., Ghemawat, S., Goodfellow, I., Harp, A., Irving, G., Isard, M., Jia, Y., Jozefowicz, R., Kaiser, L., Kudlur, M., Levenberg, J., Mane, D., Monga, R., Moore, S., Murray, D., Olah, C., Schuster, M., Shlens, J., Steiner, B., Sutskever, I., Talwar, K., Tucker, P., Vanhoucke, V., Vasudevan, V., Viegas, F., Vinyals, O., Warden, P., Wattenberg, M., Wicke, M., Yu, Y., and Zheng, X. (2016). TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Systems, available at: <https://www.tensorflow.org/>
- [2]. 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).
- [3]. AREAS (2012). Fascines & Haies pour réduire les effets du ruissellement érosif. Caractérisation de l'efficacité et conditions d'utilisation. 68p.
- [4]. ARS (2013). Bilan 2013 de la qualité des eaux destinées à la consommation humaine et la protection des captages en Seine-Maritime https://www.normandie.ars.sante.fr/sites/default/files/2017-03/bilan_76_qualite_eau_2013.pdf
- [5]. Bai, Y., Chen, Z., Xie, J., Li, C. (2016). Daily reservoir inflow forecasting using multiscale deep feature learning with hybrid models. *Journal of Hydrology*, 532, 193-206 pp.
- [6]. 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.
- [7]. BRGM (2010). <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-58294-FR.pdf>
- [8]. BRGM (2017). Analyse de l'érosion des sols sur le vignoble champenois de la Marne. BRGM/RP-66688-FR. Février 2017.
- [9]. CA Hauts-de-France (2018). Guide de l'érosion : Lutte contre l'érosion. <https://hautsdefrance.chambres-agriculture.fr/publications/la-publication-en-detail/actualites/guide-de-lerosion-2018/>
- [10]. CA Seine-Maritime (2019). Indemnisation des servitudes ou conventions. <https://seine-maritime.chambres-agriculture.fr/territoires/indemnisations/amenagements-hydrauliques/indemnisation-des-servitudes-ou-conventions/>
- [11]. Carreau, J., Neppel, L., Arnaud, P., Cantet, P. (2013). Extreme rainfall analysis at ungauged sites in the south of France: Comparison of three approaches. *Journal de la Société Française de Statistique*, 154(2), 119-138 pp.
- [12]. CCR (2017). Les catastrophes naturelles en France : Bilan 1982-2017. Bilan du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles depuis sa création en 1982. <https://catastrophes-naturelles.ccr.fr/-/les-catastrophes-naturelles-en-france-bilan-1982-2017>
- [13]. CEPRI, 2011. L'ACB (analyse coût/bénéfice) : une aide à la décision au service de la gestion des inondations 42.
- [14]. CEPRI, 2013. Méthode d'évaluation et de caractérisation des déchets post-inondation.
- [15]. CEPRI, 2016. Le territoire et ses réseaux techniques face au risque d'inondation 88.
- [16]. Cerdan, O., Souchère, V., Lecomte, V., Couturier, A., & Le Bissonnais, Y. (2002a). Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model: Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management. *Catena*, 46, 189-209 pp.
- [17]. 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>
- [18]. 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>

- [19]. Cerdan, O., Auzet, AV., Bouzit, M., Van Dijk, P., Guyonnet, J., Moquet, JS., Cruz-Mermy, D., Heitz, C. (2009). Enjeux économiques liés à l'aléa d'érosion des sols : étude pilote de faisabilité d'une évaluation des coûts dans une région française (Alsace). Rapport BRGM/RP56932. 62p.
- [20]. 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>
- [21]. CGDD, 2018. Analyse multicritère des projets de prévention des inondations - Guide méthodologique 2018.
- [22]. 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.
- [23]. Chédeville, S. (2015). Etude de la variabilité du fonctionnement hydro-sédimentaire des karsts de l'Ouest du Bassin de Paris à partir de la comparaison des remplissages sédimentaires karstiques anciens, actuels et du signal turbide des eaux souterraines. Thèse de doctorat, Université de Rouen-Normandie, France, 458p.
- [24]. Chollet, F. (2015). Keras, available at <https://github.com/fchollet/keras>
- [25]. 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>
- [26]. De Michele, C. & Avanzi, F. (2018). Superstatistical distribution of daily precipitation extremes: A worldwide assessment. *Scientific Reports*, 8:14204; doi: 10.1038/s41598018-31838-z
- [27]. Douvinet, J. (2008). Les bassins versants sensibles aux « crues rapides » dans le bassin Parisien – Analyse de la structure et de la dynamique de systèmes spatiaux complexes. Thèse de doctorat de l'Université de Caen – Basse Normandie. Géographie. 394p.
- [28]. 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.
- [29]. Evrard, O., Nord, G., Cerdan, O., Souchère, V., Le Bissonnais, Y., Bonté, P. (2010). Modelling the impact of land use change and rainfall seasonality on sediment export from an agricultural catchment of the northwestern European loess belt. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Elsevier Masson, 138(1-2), 83-94 pp. <https://doi:10.1016/j.agee.2010.04.003>
- [30]. 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>
- [31]. 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.
- [32]. Fournier, M., Mouhri, A., Ratajczak, M., Rossi, A., Slimani, S., Mesquita, J. (2008). Fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère de Caumont et incidence des aménagements de bassin versant sur la qualité des eaux du forage des Varras. <https://www.unicaen.fr/m2c/IMG/pdf/rapportsersaep.pdf?262/447a7b605f6dbc8a8df025b439812a0bc73d39bf>
- [33]. 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>
- [34]. Geman, S., Bienenstock, E., Doursat, R. (1992). Neural networks and the bias/variance dilemma. *Neural Computation*, 4, 1-58 pp.
- [35]. Gilleland, E. & Katz, R.W. (2016). extRemes 2.0: An extreme Value Analysis Package in R. *Journal of Statistical Software*, 72(8), 1-39 pp; doi:10.18637/jss.v072.i08
- [36]. Hafeez, S., Sing Wong, M., Chak Ho, H., Nazeer, M., Nichol, J., Abbas, S., Tang, D., Ho Lee, K., Pun, L. (2019). Comparison of machine learning algorithms for retrieval of water quality indicators in case-II waters: a case study of Hong-Kong. *Remote Sensing*, 11, 617; <https://doi:10.3390/rs11060617>

- [37]. 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>
- [38]. Hallegatte, S., Rentschler, J., Rozenberg, J., 2019. Lifelines, The resilient Infrastructure Opportunity.
- [39]. 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>
- [40]. Hanin, G. (2011). Contrôles structural et hydrogéologique sur la dynamique d'un champ captant en contexte crayeux karstique et sa sensibilité aux variations du signal climatique : Implications en matière de vulnérabilité de la ressource. PhD thesis, University of Rouen, France, 320p.
- [41]. Hartmann, A., Goldscheider, N., Wagener, T., Lange, J. and Weiler, M. (2014). Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches. *Rev. Geophys.*, 52, 218-242, <https://doi.org/10.1002/201RG000443>
- [42]. Hu, C., Wu, Q., Jian, S., Li, N., Lou, Z. (2018). Deep learning with a long short-term memory networks approach for rainfall-runoff simulation. *Water*, 10, 1543; doi:10.3390/w10111543
- [43]. Institution Adour, 2016. Démarche de lutte contre l'érosion des sols : De la préparation à la mise en oeuvre Guide pratique Erosion.
- [44]. Jourde, H., Masséi, N., Mazzilli, N., Binet, S., Batiot-Guilhe, C., Labat, D., Steinmann, M., Bailly-Comte, V., Seidel, J-L., Arfib, B., Charlier, J-B., Guinot, V., Jardani, A., Fournier, M., Aliouache, M., Babic, M., Bertrand, C., Brunet, P., Boyer, J-F., Bricquet, J-P., Camboulive, T., Carrière, S-D., Celle-Jeanton, H., Chalikakis, K., Chen, N., Cholet, C., Clauzon, V., Dal Soglio, L., Danquigny, C., Défargue, C., Denimal, S., Emblanch, C., Hernandez, F., Gillon, M., Gutierrez, A., Hidalgo Sanchez, L., Hery, M., Houillon, N., Johannet, A., Jouves, J., Jozja, N., Ladouche, B., Leonardi, V., Lorette, G., Loup, C., Marchand, P., de Montety, V., Muller, R., Ollivier, C., Sivelle, V., Lastennet, R., Lecoq, N., Maréchal, J-C., Perotin, L., Perrin, J., Petre, M-A., Peyraube, N., Pistre, S., Plagnes, V., Probst, J-L., Simler, R., Stefani, V., Valdes-Lao, D., Viseur, S., Wang, X. (2018). SNO KARST: A French network of observatories for the multidisciplinary study of critical zone processes in karst watersheds and aquifers. *Vadose Zone J.* 17:180094. [doi:10.2136/vzj2018.04.0094](https://doi.org/10.2136/vzj2018.04.0094)
- [45]. Kourgialas, N.N., Dokou, Z., Karatzas, G.P. (2015). Statistical analysis and ANN modeling for predicting hydrological extremes under climate change scenarios: The example of a small Mediterranean agro-watershed. *Journal of Environmental Management*, 154, 86-101 pp.
- [46]. Kratzert, F., Klotz, D., Brenner, C., Schulz, K., Herregger, M. (2018). Rainfall-runoff modelling using Long Short-Term Memory (LSTM) networks. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 6005-6022 pp.
- [47]. Lafren, J.M., Lane, L.J., Foster, G.R. (1991). WEPP: a new generation of erosion prediction technology. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46, 34-38 pp.
- [48]. Laignel, B. (2003). Caractérisation et dynamique érosive de systèmes géomorphologiques continentaux sur substrat crayeux. Exemple de l'Ouest du Bassin de Paris dans le contexte Nord-Ouest Européen, mémoire HDR, 138p.
- [49]. Landemaine, V. (2016). Erosion 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, France, 236p.
- [50]. Lautridou, J-P. (1985). Le cycle périglaciaire pléistocène en Europe du Nord-Ouest et plus particulièrement en Normandie. PhD thesis, University of Caen, France, 908p.
- [51]. Le, X-H., Ho, H.V., Lee, G. & Jung, S. (2019). Application of Long Short-Term Memory (LSTM) Neural Network for Flood Forecasting. *Water*, 11, 1387; doi:10.3390/w11071387
- [52]. Le Bissonnais, 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 m2 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)
- [53]. Le Bissonnais, Y., Thorette, J., Bardet, C., Daroussin, J. (2002). L'érosion hydrique des sols en France. Ifen, INRA et SIGMAP, 106p. <http://prodinra.inra.fr/?locale=fr#!ConsultNotice:69099>

- [54]. Le Bissonnais, 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)
- [55]. Le Bissonnais, 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>
- [56]. 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))
- [57]. LIOSE (2018). Etude de conception d'un plan d'hydraulique douce sur le bassin versant du Clignon amont. Phase 2 : Scenarios. <http://www.union-des-syndicats.fr/Projetsencours/fiche/id/39>
- [58]. 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>
- [59]. Mangin, A. (1984). Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. *Journal of Hydrology*, 67 (1-4), 25-43 pp.
- [60]. Mansotte, F. (1998). Pluviométrie et qualité des eaux d'alimentation en Seine-Maritime. Impact de 8 épisodes pluvieux de décembre 1992 à avril 1998. Préfecture du Département de la Seine-Maritime. Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales. Service Santé et Environnement, Octobre 1998.
- [61]. 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>
- [62]. Massei, N., Wang, H.Q., Dupont, J.P., Rodet, J., Laignel, B. (2003). Assessment of direct transfer and resuspension of particles during turbid floods at a karstic spring. *Journal of Hydrology*, 275, 109-121 pp.
- [63]. Massei, N., Dupont, J.P., Mahler, B.J., Laignel, B., Fournier, M., Valdes, D., Ogier, S. (2006). Investigating transport properties and turbidity dynamics of a karst aquifer using correlation, spectral, and wavelet analyses. *Journal of Hydrology*, 329, 244-255 pp.
- [64]. Merritt, W.S., Letcher, R.A., Jakeman, A.J. (2003). A review of erosion and sediment transport models. *Environmental modelling & software*, 18(8-9), 761-799 pp.
- [65]. Meyers, G., Kapelan, Z., Keedwell, E., Randall-Smith, M. (2016). Short-term forecasting of turbidity in a UK water distribution system. *Procedia Engineering*, 154, 1140-1147 pp.
- [66]. Meyers, G., Kapelan, Z., Keedwell, E. (2017). Short-term forecasting of turbidity in trunk main networks. *Water research*, 124, 67-76 pp.
- [67]. Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bigner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885-900 pp. ISSN 0001-2351
- [68]. Nash, J.E. & Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—a Discussion of Principles*. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290 pp.
- [69]. Nathan, R.J., McMahon, T.A., 1990. Evaluation of Automated Techniques for Base Flow and Recession Analyses. *Water Resour. Res.* 26, 1465–1473.
- [70]. Ouvry, J.F., Richet, J.B., Helloco, F. (2003). Système d'anticipation des épisodes pluvieux hivernaux générateurs de désordres hydrologiques – Conclusions de l'étude de faisabilité. http://www.areas-asso.fr/images/poster/poster_etude_meteo.jpg
- [71]. Ouvry, J.F., Coufourier, N., Richet, J.B., Lhëriteau, 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.

- [72]. Ouvry, J.F., Richet, J.B., Bricard, O., Lh riteau, M., Bouzid, M., Saunier, M., 2012b. Fascines et haies pour réduire les effets du ruissellement érosif - Caractérisation de l'efficacité et conditions d'utilisation.
- [73]. Papy F., Boiffin, J., 1988. Influence des systemes de culture sur les risques d'erosion par ruissellement concentré. II. Evaluation des possibilités de maitrise du phénomène dans les exploitations agricoles. *Agronomie* 8, 745–756.
- [74]. Patault, E., Ledun, J., Landemaine, V., Soullignac, A., Richet, J-B., Ramaekers, F., Cikowski, N., Cabaz, B., Fournier, M., Ouvry, J-F., Rinaudo, J-D., Cerdan, O., Laignel, B. (2019). Coupled modeling of hydro-sedimentary transfer processes and socio-economic dynamics evaluating public policies to control runoff and erosion: case study in Normandy (France). AGU Fall Meeting 2019, San Francisco, USA. <https://doi.org/10.1002/essoar.10501408.1>
- [75]. Przulski, V., Hallegatte, S., 2011. Indirect Costs of Natural Hazards 40.
- [76]. Ramaekers, F. (2018). Etude technico-économique sur les actions et les impacts des inondations par ruissellement en Seine-Maritime sur la période 2000-2017. Master 2 Gestion de l'Environnement parcours Gestion Durable des Hydrog osyst mes. 81p.
- [77]. R Development Core Team (2008). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- [78]. Renard, K.G & Freidmund J.R. (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology*, 157, 287-306 pp.
- [79]. Richet, J.-B., Gril, J.-J., Ouvry, J., 2006. Infiltrabilit  de dispositifs enherb s du Pays de Caux , premiers résultats.
- [80]. Ritters, A., Muñoz-Carpena, R. (2013). Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology*, 480, 33-45 pp.
- [81]. Savary, M., Johannet, A., Massei, N., Dupont, J-P., Hauchard, E. (2017). Operational turbidity forecast using both recurrent and feed-forward based multilayer perceptrons. In: Rojas, I., Pomares, H., Valenzuela, O. (eds) *Advances in time series analysis and forecasting*. ITISE 2016. Contributions to Statistics. Springer, Cham.
- [82]. Shen, C. (2018). A transdisciplinary review of deep learning research and its relevance for water resources scientists. *Water Resources Research*, 54, 8558-8593 pp. <https://doi.org/10.1029/2018WR022643>
- [83]. Shen, C., Laloy, E., Elshorbagy, A., Albert, A., Bales, J., Chang, F-J., Ganguly, S., Hsu, K-L., Kifer, D., Fang, Z., Fang, K., Li, D., Li, X., Tsai, W-P. (2018). HESS Opinions: Incubating deep-learning-powered hydrologic science advances as a community. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 5639-5656 pp.
- [84]. Siou, L.K.A., Johannet, A., Borrell, V., Pistre, S. (2011). Complexity selection of a neural network model for karst flood forecasting: The case of the Lez Basin (southern France). *Journal of Hydrology*, 403, 367-380 pp.
- [85]. Souadi, T., King, C., Le Bissonnais, Y., 2000. Cartographie régionale de l'al a érosion des sols en région Haute-Normandie. BRGM/RP-50454-FR 95.
- [86]. Souchère, V., Cerdan, O., Dubreuil, N., Le Bissonnais, Y., King, C. (2005). Modelling the impact of agri-environmental scenarios on runoff in a cultivated catchment (Normandy, France). *Catena*, 61, 229-240 pp.
- [87]. Stevenson, M. & Bravo, C. (2019). Advanced turbidity prediction for operational water supply planning. *Decision Support Systems*, 119, 72-84 pp.
- [88]. Takken, I., Beuselinck, L., Nachtergaele, J., Govers, G., Poesen, J., Degraer, G. Spatial Evaluation of physically-based distributed erosion model (LISEM). *Catena*, 37(3-4), 431-447 pp.
- [89]. Varma, S., & Simon, R. (2006). Bias in error estimation when using cross-validation for model selection. *BMC Bioinformatics*, 7, 91; <https://doi:10.1186/1471-2105-7-91>
- [90]. Vidal, J.P., Martin, E., Franchisteguy, L., Baillon, M. & Soubeyroux, J.M. (2010). A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, 30, 1627-1644 pp.

- [91]. ZH29 (2012). Création de talus en limite de zones humides.
http://www.zoneshumides29.fr/telechargement/GTAGZH_Creation_talus_ceinture_032012.pdf

Liste des figures

Figure 1 : Approche pluridisciplinaire proposée dans le cadre du projet EVAPORE.	3
Figure 2 : Localisation des territoires d'études. L'emprise de la Lézarde correspond au bassin versant, et l'emprise de Radicatel correspond au bassin d'alimentation de captage (Source fond de carte : BD Ortho IGN).	4
Figure 3 : Montant subventionnable des projets retenus et subventions accordées par financeur pour la période 2000-2017 sur la Haute-Normandie, pour les actions « ruissellement / érosion ».....	11
Figure 4 : Représentation schématique du mode de définition des ratios appliqués pour extraire la part du financement des actions relevant uniquement de la réduction de la turbidité aux captages AEP.	12
Figure 5 : Estimation basse du montant investi en Haute-Normandie entre 2000 et 2017 par catégorie d'action, 196 M€ au total.	14
Figure 6 : Estimation haute du montant investi en Haute-Normandie entre 2000 et 2017 par catégorie d'action, 305 M€ au total.	14
Figure 7 : Subventions accordées par catégorie et par an pour les actions « Ruissellement / Erosion » (AESN, CD76, CD27 et CRHN).	15
Figure 8 : Investissements dans l'Eure par catégorie entre 2000 et 2017 pour les actions « Ruissellement / Erosion » (total 28 027 586 €).	16
Figure 9 : Subventions accordées en Eure par catégorie et par an pour les actions « Ruissellement / Erosion » (AESN, CD76, CD27 et CRHN).	17
Figure 10 : Investissements en Seine-Maritime par catégorie entre 2000 et 2017 pour les actions « ruissellement/érosion ». En haut, l'estimation haute (total 227 M€ H.T) ; en bas l'estimation basse (total 167 M€ H.T).	18
Figure 11 : Subventions accordées en Seine-Maritime par catégorie et par an pour les actions « Ruissellement / Erosion » (AESN, CD76, CD27 et CRHN).	19
Figure 12 : Montant total des projets par département et par type de bénéficiaire pour les actions « Ruissellement / Erosion ».	20
Figure 13 : Actions liées aux aménagements d'hydraulique douce en Haute-Normandie, par type, estimation basse (haut ; 26 M€ H.T) et estimation haute (bas ; 28M€ H.T).....	22
Figure 14 : Répartition par grandes catégories du volume total d'investissement (€ H.T) pour les actions visant à réduire la turbidité pour l'AEP sur les départements de Seine-Maritime et de l'Eure pour la période 2000-2017.....	23
Figure 15 : Variabilité temporelle des investissements pour les actions visant à réduire la turbidité pour l'AEP par grandes catégories et par programme d'actions de l'AESN sur les départements de Seine-Maritime et de l'Eure pour la période 2000-2017.	25
Figure 16 : Répartition du volume total investi (€ H.T) par type de bénéficiaires pour les actions visant à réduire la turbidité pour l'AEP sur les départements de la Seine-Maritime et de l'Eure pour la période 2000-2017.	26
Figure 17 : Répartition par actions du volume investi (€ H.T) pour la grande catégorie « Aménagements des points d'engouffrement/bétoires » sur les départements de Seine-Maritime et de l'Eure pour la période 2000-2017.	27
Figure 18 : Répartition par actions du volume investi (€ H.T) pour la grande catégorie « Ouvrages structurants » sur les départements de Seine-Maritime et de l'Eure pour la période 2000-2017.....	28

Figure 19 : Répartition par actions du volume investi (€ H.T) pour la grande catégorie « Aménagements d’hydraulique douce » sur les départements de Seine-Maritime et de l’Eure pour la période 2000-2017. Une échelle log a été appliquée sur l’axe des abscisses pour plus de lisibilité. ...	29
Figure 20 : Répartition par actions du volume investi (€ H.T) pour la grande catégorie « Animation » sur les départements de Seine-Maritime et de l’Eure pour la période 2000-2017.....	30
Figure 21 : Répartition par actions du volume investi (€ H.T) pour la grande catégorie « Etudes globales » sur les départements de Seine-Maritime et de l’Eure pour la période 2000-2017. Une échelle log a été appliquée sur l’axe des abscisses pour plus de lisibilité.....	30
Figure 22 : Répartition par actions du volume investi (€ H.T) pour la grande catégorie « Gestion quantitative de l’AEP » sur les départements de Seine-Maritime et de l’Eure pour la période 2000-2017. Une échelle log a été appliquée sur l’axe des abscisses pour plus de lisibilité.....	31
Figure 23 : Répartition par actions du volume investi (€ H.T) pour la grande catégorie « Potabilisation » sur les départements de Seine-Maritime et de l’Eure pour la période 2000-2017. Une échelle log a été appliquée sur l’axe des abscisses pour plus de visibilité.	31
Figure 24 : Bilan des investissements publics pour réduire les impacts du ruissellement et de l’érosion en Haute-Normandie de 2000 à 2017.	32
Figure 25 : Evolution de l’indice 2018 base 100 du coût de production des travaux publics (ICP-TP).....	40
Figure 26 : Volume total des coûts d’entretien (€ ₂₀₁₈ H.T) par type d’aménagement sur les départements de la Seine-Maritime et de l’Eure, selon l’hypothèse haute de calcul sur les ouvrages structurants.	41
Figure 27 : Nombre de procédures CatNat par an liés aux inondations et coulées de boue sur les départements de Seine-Maritime et de l’Eure de 1983 à 2018.	43
Figure 28 : Répartition mensuelle des procédures CatNat sur les départements de la Seine - Maritime et de l’Eure de 1983 à 2018 (hors 24 et 25/12/1999) – source : BD Gaspar	43
Figure 29 : Carte du nombre d’arrêtés CatNat inondation/coulée boueuse par commune en Haute-Normandie de 1983 à 2018 (BD Gaspar).....	44
Figure 30 : Evolution temporelle du coût des dommages directs lié aux inondations et coulées boueuses, et répertoriés par la CCR sur les départements de Seine-Maritime et de l’Eure.	45
Figure 31 : Montant « réel » recalculé à partir des données CCR par commune en Haute-Normandie de 1998 à 2016.....	46
Figure 32 : Montant et montant cumulé des dommages (€ H.T) supportés par la SNCF pour les évènements de type inondation, glissement de terrain, et coulées de boue sur les territoires de l’Eure et de la Seine-Maritime entre 2012 et 2018.	50
Figure 33 : Nombre d’arrêts de distribution de l’eau potable et restrictions d’usage sur les départements de l’Eure et de la Seine-Maritime pour la période 1992-2018 (données ARS).	52
Figure 34 : Protocole de diffusion de l’information lorsque la population est impactée par un arrêt de distribution de l’eau potable (Mansotte, 1998).	53
Figure 35 : Evolution des coûts induits par les arrêts de distribution de l’eau potable sur les départements de Seine-Maritime et de l’Eure entre 1992 et 2018.....	55
Figure 36 : Plan de situation du bassin versant de la Lézarde.....	61
Figure 37 : Périmètre d’action du modèle MIKE et du modèle WaterSed sur le bassin versant de la Lézarde.....	62
Figure 38 : Projection d’évolution des hauteurs de pluie journalières selon 2 hypothèses de changement climatique à horizon 2050 (exemple de la station Rouen-Boos pour la série 1969-2007 hiver).	65

Figure 39 : Diagramme de pentes par occupation du sol sur le bassin versant de la Lézarde, pente décroissantes selon la surface cumulée ramenée à la surface totale de l'occupation du sol concernée.....	66
Figure 40 : Evolution de l'occupation du sol de 1970 à 2010 dans le Pays de Caux (source : RA-DRAAF Normandie)	67
Figure 41 : Découpage du bassin versant de la Lézarde en neuf bassins versants.	68
Figure 42 : Localisation des stations pluviométriques. En noir, les limites du bassin versant de la Lézarde.	69
Figure 43 : Pluviométrie mesurée à la station du Cap de la Hève pour l'évènement de 2003.....	70
Figure 44 : Débit mesuré à la station de Montivilliers pour l'évènement de 2003.....	70
Figure 45 : Courbes HDF sur la période 1996-2006 à la station Cap de la Hève. Source : Météo France.....	71
Figure 46 : Hyétogrammes des pluies de projet et de la pluie de juin 2003.....	72
Figure 47 : Description du mécanisme de production de ruissellement.	73
Figure 48 : Mécanisme de pluie brute et pluie efficace.	74
Figure 49 : Illustration de la méthode du double réservoir linéaire (extrait du document : « adaptation de MOUSE à l'hydrologie française », avril 1992).	74
Figure 50 : Occupation du sol sur le bassin versant de la Lézarde.....	75
Figure 51 : Décomposition en sous bassins versants et points d'injection des débits issus des modèles de talweg dans le modèle global.	77
Figure 52 : Découpage en sous bassins versants du modèle hydraulique de rivière (DHI 2006)	79
Figure 53 : Exemple de débits max injectés : scénario ref1 (état actuel avec ouvrages), période de retour T10 ans, avant abattement de la pluie (Mike)	80
Figure 54 : Répartition de la pluie par rapport à la station du Cap-de-la-Hève	81
Figure 55 : (A) Volume total ruisselé, (B) volume max stocké, et (C) débit de pointe à Montivilliers pour les différents scénarios (« hors cc ») et période de retour (modèle MIKE).	86
Figure 56 : Hydrogrammes modélisés à la station de Montivilliers par scénario et par période de retour (m ³ /s).....	87
Figure 57 : Exemples de cartes d'inondation issues de la modélisation MIKE sur le bassin versant de la Lézarde pour l'évènement décennal : (A) scénario ref0, et (B) scénario ref1.....	88
Figure 58 : Extraits de cartes d'aléa inondation issues de la modélisation MIKE sur le bassin versant de la Lézarde pour l'évènement décennal : (A) scénario ref0, et (B) scénario ref1.....	89
Figure 59 : Surface inondée par débordement de rivière pour les différents scénarios et périodes de retour modélisés hors «cc » (modèle MIKE).	90
Figure 60 : Cartographie finale des axes de ruissellement digitalisés.....	92
Figure 61 : Exemple d'interconnexion entre les ouvrages recensés (points blancs numérotés de 1 à 5) et le réseau d'axe de ruissellement (trait jaune).	94
Figure 62 : Cartographie des ouvrages de gestion des eaux de ruissellement intégrés au modèle hydraulique.	94
Figure 63 : Etapes de construction de la cartographie de l'occupation des sols à partir des cartographies OSCOM et RPG.	95
Figure 64 : (Gauche) Cartographie de l'occupation des sols OSCOM 2016 ; (Droite) Cartographie de l'occupation des sols 2016 OSCOM + RPG.	98
Figure 65 : Statistiques de l'occupation des sols 2016 sur le bassin de la Lézarde.....	99
Figure 66 : Cartographie simplifiée des textures de sol sur le bassin de la Lézarde, construite à partir du Référentiel Régional Pédologique de Haute-Normandie.....	100
Figure 67 : Triangle des textures et niveau d'érodibilité de chacune des classes.....	100

Figure 68 : Principe général de paramétrisation du modèle WaterSed.....	101
Figure 69 : Méthode d'évaluation de l'état de surface du sol selon la couverture végétale, le faciès sédimentaire, et la rugosité du sol.....	101
Figure 70 : Cartographie des bétouilles sur le bassin de la Lézarde.	106
Figure 71 : 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.	107
Figure 72 : 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).....	107
Figure 73 : Hyétogramme et hydrogramme de la crue de janvier 2018 de la Lézarde enregistrée au niveau de la station hydrométrique de Montivilliers.....	108
Figure 74 : 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.....	110
Figure 75 : Hyétogramme et hydrogramme de la crue de juin 2003 de la Lézarde enregistrée au niveau de la station hydrométrique de Montivilliers.....	111
Figure 76 : 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.....	112
Figure 77 : Exemple de cartographie des débits de pointe en sortie du modèle WaterSed..	114
Figure 78 : Caractéristiques des profils en travers tracés pour extraire la géométrie des talwegs.	115
Figure 79 : (Gauche) Cas 1 : profil en travers parallèle à la direction du versant ; (Droite) Cas 2 : profil en travers recoupant deux talwegs.	115
Figure 80 : 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.	116
Figure 81 : 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).	116
Figure 82 : (Gauche) Méthode de calcul de la section mouillée pour chaque point du profil ; (Droite) Exemple de relation section mouillée – hauteur.....	117
Figure 83 : Représentation du profil en travers de 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.	117
Figure 84 : Représentation d'un profil en travers après traitement. Chaque profil se résume en 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.	118
Figure 85 : Procédure de calcul de la cartographie des hauteurs d'eau.....	119
Figure 86 : Cartographie du programme d'aménagement d'hydraulique douce du Syndicat SMBV Pointe de Caux Etretat, actualisé en 2019.....	122
Figure 87 : Superficie cumulée des prairies permanentes sur le bassin de la Lézarde, classée suivant la pente maximale de chaque parcelle de prairie.	123
Figure 88 : Statistiques de l'occupation des sols du scénario « herb » sur le bassin de la Lézarde.	123
Figure 89 : 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.....	124
Figure 90 : 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 (d'après Maetens et al. (2012)).	126
Figure 91 : Statistiques de l'occupation des sols du scénario « agr » sur le bassin de la Lézarde.	127

Figure 92 : Volume de ruissellement à Montivilliers pour les cinq scénarios et pour les trois pluies de projet.....	128
Figure 93 : Débit de pointe à Montivilliers pour les cinq scénarios et pour les trois pluies de projet.....	129
Figure 94 : Flux sédimentaire à Montivilliers pour les cinq scénarios et pour les trois pluies de projet.....	129
Figure 95 : Fonction de dépôt de sédiments des fascines et des haies dans le modèle WaterSed.	132
Figure 96 : Taux de dépôt de sédiment des aménagements sur le bassin de la Lézarde pour les trois pluies de projet et pour le scénario « actu » ; 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 %.....	133
Figure 97 : 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 %.....	133
Figure 98 : 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 « actu » sont celles de la pluie de période de retour 10 ans.	136
Figure 99 : Cas synthétique illustrant le principe d'aménagement en cascade permettant de maintenir un abattement élevé aux différentes échelles spatiales.....	137
Figure 100 : Cas synthétique illustrant l'impact bénéfique de l'amélioration des pratiques culturales aux différentes échelles spatiales.....	138
Figure 101 : Extrait de la cartographie des hauteurs d'eau pour le scénario « ref1 » et pour la pluie de période de retour 10 ans.....	139
Figure 102 : Extrait de la cartographie des flux sédimentaires pour le scénario « ref1 » et pour la pluie de période de retour 10 ans.	139
Figure 103 : Emprise de l'inondation pour chaque scénario et pour chaque pluie de projet sur le bassin de la Lézarde.....	140
Figure 104 : Masse totale de sédiment piégée par l'ensemble des ouvrages du bassin de la Lézarde pour chaque scénario et chaque pluie de projet.....	142
Figure 105 : Synoptique des grandes étapes de l'ACB, adapté de (CEPRI, 2011).	149
Figure 106 : Zoom sur une zone exposée à l'inondation par débordement de cours d'eau pour un évènement d'occurrence centennale et identification des enjeux exposés.	156
Figure 107 : Répartition géographique des bâtiments exposés aux aléas d'occurrence centennale.....	156
Figure 108 : Exemple de fonctions de dommage utilisées extraites du guide du CGDD de 2018.	159
Figure 109 : Extrait du site internet du centre commercial de la Lézarde (source : https://www.lezarde.fr/boutiques/).....	160
Figure 110 : Fonction de dommage au bâtiment du centre commercial de la Lézarde.....	161
Figure 111 : Courbes d'endommagement aux bâtis et équipements des établissements publics.	164
Figure 112 : Indice du coût de production des travaux publics (base 100 année 2000 ; Source INSEE).	167
Figure 113 : Construction des fonctions de coût d'investissement pour les ouvrages d'HS (€ ₂₀₀₀).	168

Figure 114 : Courbes fréquence-dommage pour l'aléa débordement de cours d'eau dans les scénarios sans changement climatique.....	172
Figure 115 : Evolution des dommages évités moyens annuels (DEMA) des ouvrages d'hydraulique structurante dans les scénarios sans et avec évolution des pratiques agricoles.	173
Figure 116 : Evolution des dommages évités moyens annuels (DEMA) avec et sans changement climatique.....	175
Figure 117 : Courbes fréquence-dommage pour l'aléa coulée boueuse dans les scénarios sans changement climatique.....	178
Figure 118 : (A) Localisation de la station de traitement AEP de Radicatel et des sept bétoires connectées positivement aux sources, et (B) Localisation du bassin d'alimentation de captage (BAC) de Radicatel dans la basse vallée de la Seine (Normandie, France), sur la Rive droite de la Seine (Hanin, 2011). Le fond de carte est issu de la BD Ortho de l'IGN.	187
Figure 119 : Précipitations journalières cumulées (mm ; en bleu) extraites de la base de données SAFRAN sur le BAC de Radicatel et turbidité maximale journalière enregistrée à l'entrée de la station de traitement de 1987 à 2017.	188
Figure 120 : Diagramme de dispersion des valeurs de turbidité maximales journalières observées à la station de traitement de Radicatel pour les années hydrologiques complètes sur la période 1987-2017.....	189
Figure 121 : Cartographie des ouvrages de gestion des eaux de ruissellement extraits de la BD CASTOR et intégrés au modèle WaterSed.....	190
Figure 122 : Proportions de chaque classe d'occupation du sol (base 2016) sur le BAC de Radicatel.....	191
Figure 123 : Cartographie simplifiée des textures de sol sur le BAC de Radicatel, construite à partir du Référentiel Régional Pédagogique de Haute-Normandie, et localisation des axes de ruissellement.....	192
Figure 124 : Structure d'un neurone artificiel. Le neurone calcule la somme de ses entrées puis cette valeur passe à travers la fonction d'activation pour produire sa sortie.	192
Figure 125 : Procédure de validation croisée imbriquée avec réduction mensuelle des données développée pour la calibration du modèle.....	194
Figure 126 : Cartographie du programme d'aménagement d'hydraulique douce ambitieux théorique proposé par l'AREAS sur le BAC de Radicatel à l'horizon 2050, et localisation des bétoires connectées.	196
Figure 127 : Proportions de chaque classe d'occupation du sol en 2050, sur le BAC de Radicatel, dans le cadre du scénario « herb ».	197
Figure 128 : Proportions de chaque classe d'occupation du sol en 2050, sur le BAC de Radicatel, dans le cadre du scénario « agr ».	198
Figure 129 : Fonction de coût de traitement des sédiments à la station de traitement AEP du BAC de Radicatel (années 2015 à 2018).....	200
Figure 130 : Flux sédimentaire (kg) et volume ruisselé (m ³) cumulés, simulés par le modèle WaterSed, puis extraits et sommés au droit des bétoires connectées d'Octobre 1998 à Septembre 2000.....	201
Figure 131 : Flux sédimentaire (kg) observé (en gris) et simulé (en orange) par le réseau de neurones profond à la station de traitement AEP du BAC de Radicatel.....	202
Figure 132 : Boxplots des critères d'efficacité (<i>NSE</i> , <i>RMSE</i>) calculés pour les différents sous-ensembles produits lors de la procédure de validation croisée imbriquée avec réduction mensuelle.....	202
Figure 133 : Comparaison entre le flux sédimentaire (kg) prédit par la loi d'extrémum généralisée et simulé par le réseau de neurones profonds pour les cinq pluies de projet.	203

Figure 134 : Flux sédimentaires (kg) et volumes ruisselés (m³) simulés par le modèle WaterSed au droit des bétouilles connectées sur le BAC de Radicatel pour les cinq pluies de projet selon les différents scénarios prédéfinis. (actu = scénario actuel 2018 ; amb = scénario d'aménagement d'hydraulique douce ambitieux ; agr = amélioration des pratiques agricoles sur 50% des surfaces en culture ; herb = retournement de 33% des prairies)..... 204

Figure 135 : Flux sédimentaire (kg) simulé à l'entrée de la station de traitement AEP par le réseau de neurones profond pour les cinq pluies de projet et les différents scénarios. (actu = scénario actuel 2018 ; amb = scénario d'aménagement d'hydraulique douce ambitieux ; agr = amélioration des pratiques agricoles sur 50% des surfaces en culture ; herb = retournement de 33% des prairies).... 205

Figure 136 : Courbes fréquence-dommage pour les six scénarios modélisés dans le cadre de l'étude. (actu = scénario actuel 2018 ; amb = scénario d'aménagement d'hydraulique douce ambitieux ; agr = amélioration des pratiques agricoles sur 50% des surfaces en culture ; herb = retournement de 33% des prairies ; ccm = changement climatique moyen basé sur le scénario RCP4.5 ; et ccf = changement climatique fort basé sur le scénario 8.5). 208

Figure 137 : Evolution des dommages évités moyens annuels (DEMA) sur la période 2018-2050 et induits par les coûts de traitement des flux sédimentaires à la station AEP de Radicatel. Ces résultats montrent les différents scénarios d'évolution future considérés dans le cadre de l'étude (actu = scénario actuel 2018 ; amb = scénario d'aménagement d'hydraulique douce ambitieux ; agr = amélioration des pratiques agricoles sur 50% des surfaces en culture ; herb = retournement de 33% des prairies ; ccm = changement climatique moyen basé sur le scénario RCP4.5 ; et ccf = changement climatique fort basé sur le scénario 8.5). 209

Liste des tableaux

Tableau 1 : Bilan des données technico-économiques collectées auprès des financeurs sur l’Eure et la Seine-Maritime (OS = ouvrages structurants, AHD = aménagements d’hydraulique douce).	8
Tableau 2 : Numéros des comptes de consommation extraits de la base de données « Interventions » de l’AESN pour l’identification des actions liées à la réduction de l’érosion, du ruissellement, et de la turbidité aux captages AEP.	9
Tableau 3 : Définition des ratios appliqués pour extraire la part du financement des actions relevant uniquement de la réduction de la turbidité aux captages AEP.	12
Tableau 4 : Montants investis en Haute-Normandie entre 2000 et 2017 par catégorie d’action, estimation basse et estimation haute.	13
Tableau 5 : Volume d’investissement total (€ H.T) par grandes catégories et par catégories pour les actions visant à réduire l’érosion, le ruissellement, et la turbidité aux captages AEP en Seine-Maritime et dans l’Eure.	33
Tableau 6 : Liste d’aménagements (structurants et hydraulique douce) extraits de la BD CASTOR et localisés sur les départements de Seine-Maritime et de l’Eure.	34
Tableau 7 : travaux de réfection de corps de digues dus à l’apparition de bétoires, selon le CD76	37
Tableau 8 : Coûts d’entretien du parc d’ouvrages structurants.	38
Tableau 9 : Synthèse des coûts d’entretien retenus pour les aménagements d’hydraulique douce.	39
Tableau 10 : Coût réel des dommages aux particuliers et aux professionnels sur les départements de Seine-Maritime et de l’Eure.	46
Tableau 11 : Estimation du coût global d’intervention pour le nettoyage des routes départementales de Seine-Maritime en 2018 (année érosive).	48
Tableau 12 : Estimation du coût global d’intervention pour les routes départementales de l’Eure en lien avec l’érosion et le ruissellement.	48
Tableau 13 : Nombre d’équivalent temps plein (ETP) de la DDASS mobilisés pour la diffusion de l’information à la suite de l’épisode turbide de janvier 1998.	54
Tableau 14 : Subventions accordées au SIAEPA de Bretteville St-Maclou par l’AESN et le CD76 à la suite de l’abandon de captage (n°BSS : 00751X0020).	56
Tableau 15 : Bilan des coûts des actions de réduction des impacts du ruissellement, de l’érosion et de la turbidité aux captages en Haute-Normandie.	57
Tableau 16 : Bilan des dommages connus liés au ruissellement, à l’érosion et à la turbidité aux captages en Haute-Normandie.	58
Tableau 17 : Principales caractéristiques des scénarios modélisés sur le bassin versant de la Lézarde	63
Tableau 18 : Cumul des pluies de projet.	72
Tableau 19 : Valeurs du Curve Number pour chaque type d’occupation du sol sur le périmètre d’étude.	75
Tableau 20 : Caractéristiques des sous bassins versants pris en compte dans la modélisation (situation actuelle).	76
Tableau 21 : Débits observés à Montivilliers (source : Banque Hydro).	81
Tableau 22 : Débits obtenus par simulation avec le modèle Mike.	81
Tableau 23 : Scénarios testés dans le cadre de la modélisation de l’aléa inondation par ruissellement et débordement de rivière sur le bassin versant de la Lézarde.	82

Tableau 24 : Paramètres d’occupation du sol et de ruissellement des différents scénarios modélisés (Mike).....	84
Tableau 25 : Synthèse des principaux résultats pour les différents scénarios et périodes de retour modélisés hors « cc » (Mike).....	85
Tableau 26 : Lame ruisselée et coefficient de ruissellement moyens sur le BV de la Lézarde pour les différents scénarios et périodes de retour modélisés hors « cc » (Mike)	85
Tableau 27 : Surface inondée par débordement de rivière pour les différents scénarios et périodes de retour modélisés hors « cc » (modèle MIKE).	90
Tableau 28 : Aire drainée et largeur de plein bord des deux points utilisés pour construire la relation empirique aire drainée – largeur de plein bord.	92
Tableau 29 : Nomenclature de la cartographie finale de l’occupation des sols 2016.	96
Tableau 30 : Table de conversion de la nomenclature OSCOM.	96
Tableau 31 : Table de conversion de la nomenclature RPG.	97
Tableau 32 : Calendrier cultural spécifiant par type de culture et 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 vert respectivement.	103
Tableau 33 : Evolution 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.	103
Tableau 34 : Table de conversion état de surface du sol – capacité d’infiltration.....	104
Tableau 35 : Table de conversion état de surface du sol – coefficient de Manning.....	104
Tableau 36 : Table de conversion état de surface du sol - érodibilité	104
Tableau 37 : Caractéristiques de chaque type d’aménagement d’hydraulique douce ; XXX : volume spécifique à chaque ouvrage.....	105
Tableau 38 : Valeurs des différents paramètres après calibration du modèle WaterSed.	106
Tableau 39 : 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 48h.....	109
Tableau 40 : 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.	113
Tableau 41 : Vue d’ensemble des différents scénarios étudiés dans l’ACB.	120
Tableau 42 : Statistiques sur les ouvrages structurants et les ouvrages d’hydraulique douce du scénario « actu ».	121
Tableau 43 : Statistiques du programme d’aménagement d’hydraulique douce du Syndicat SMBV Pointe de Caux Etretat, actualisé en 2019 et intégré au scénario « amb ».....	121
Tableau 44 : Liste des mesures de conservation des sols étudiées par Maetens et al. (2012).	125
Tableau 45 : Caractéristiques des pluies de projet.	127
Tableau 46 : Synthèse des volumes de ruissellement (A), des débits de pointe (B), et des masses de sédiment transportés par les eaux (C) au droit de la station de Montivilliers pour les cinq scénarios et pour les trois pluies de projet.	130
Tableau 47 : Emprise de l’inondation pour chaque scénario et pour chaque pluie de projet sur le bassin de la Lézarde.....	141
Tableau 48 : Masse totale de sédiment piégée par l’ensemble des ouvrages du bassin de la Lézarde pour chaque scénario et chaque pluie de projet.....	142
Tableau 49 : 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.	143

Tableau 50 : Synthèse des résultats de modélisation des aléas utilisés pour le calcul économique dans chacun des scénarios.....	152
Tableau 51 : Périodes de retours retenues pour la prise en compte du changement climatique dans la modélisation des phénomènes de débordement.....	154
Tableau 52 : Périodes de retours retenues pour la prise en compte du changement climatique dans la modélisation des phénomènes de coulée boueuse.	154
Tableau 53 : Synthèse des bâtiments exposés au risque et qualifiés pour les besoins de l'ACB.	157
Tableau 54 : Statistiques utilisées pour la construction des deux fonctions de dommage spécifiques au centre commercial de la Lézarde.	160
Tableau 55 : 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.....	163
Tableau 56 : Liste et quantité des ouvrages considérés dans les modélisations.	166
Tableau 57 : Coûts d'entretien du parc d'ouvrages structurants.....	168
Tableau 58 : Résumé des coûts de références utilisés et des valeurs retenues pour le chiffrage des actions relatives aux ouvrages d'hydraulique douce.	170
Tableau 59 : Coûts utilisés pour l'hydraulique douce.	171
Tableau 60 : Montant des dommages causés par les débordements de cours d'eau en k€ ₂₀₀₀	172
Tableau 61 : Résultats des deux indicateurs synthétiques de l'analyse coût-bénéfice pour le scénario de débordement avec et sans changement des pratiques agricoles.	173
Tableau 62 : Résultats des deux indicateurs synthétiques de l'ACB pour les scénarios de débordement avec et sans changement climatique.	175
Tableau 63 : Montant des dommages causés par les coulées boueuses.....	178
Tableau 64 : Définition des pluies de projet utilisées dans le cadre de la modélisation.	198
Tableau 65 : Synthèse des résultats de modélisation du modèle WaterSed et du réseaux de neurones profond sur le BAC de Radicatel pour les 5 pluies de projets et les scénarios retenus (SY = flux sédimentaire ; V = volume ruisselé ; actu = scénario actuel 2018 ; amb = scénario d'aménagement d'hydraulique douce ambitieux ; agr = amélioration des pratiques agricoles sur 50% des surfaces en culture ; herb = retournement de 33% des prairies).....	206
Tableau 66 : Synthèse des résultats de l'analyse économique sur le BAC de Radicatel pour les 5 pluies de projets et les scénarios retenus (DMA = dommage moyen annuel ; DEMA= dommage évité moyen annuel ; actu = scénario actuel 2018 ; amb = scénario d'aménagement d'hydraulique douce ambitieux ; agr = amélioration des pratiques agricoles sur 50% des surfaces en culture ; herb = retournement de 33% des prairies, ccm = changement climatique moyen, ccf = changement climatique fort).....	210

Annexes du Volume 1

1.1 Typologie des actions

GRANDE CATEGORIE	CATEGORIE	ACTION	cote_A	cote_GCCA	action (rappel)	érosion / inondation	turbidité
globales	Etudes globales	Etudes hydrauliques de bassins versants	10	10010	Etudes hydrauliques de bassins versants	1	1
globales	Etudes globales	Etudes protection de captages AEP	11	10011	Etudes protection de captages AEP	1	1
globales	Etudes globales	Etudes SAGE volet érosion	12	10012	Etudes SAGE volet érosion	1	1
globales	Etudes globales	Etudes d'impacts	13	10013	Etudes d'impacts	1	1
globales	Etudes globales	Etudes d'orientation / Etudes stratégiques / Suivis des actions	15	10015	Etudes d'orientation / Etudes stratégiques / Suivis des actions	1	1
globales	Etudes globales	Projets de recherches	16	10016	Projets de recherches	1	1
globales	Etudes globales	Enquêtes publiques, dossiers loi sur l'eau, DUP, DIG	20	10020	Enquêtes publiques, dossiers loi sur l'eau, DUP, DIG	1	1
globales	Etudes globales	Création d'outils de prévision et d'alerte pour les inondations	40	10040	Création d'outils de prévision et d'alerte pour les inondations	1	0
globales	Etudes globales	Schémas de gestion des eaux pluviales	50	10050	Schémas de gestion des eaux pluviales	1	0
globales	Etudes globales	Plans communaux de sauvegarde	60	10060	Plans communaux de sauvegarde	1	0
Ouvrages structurants	Etudes pour ouvrage structurant	Etudes préalables, acquisitions foncières et maîtrise d'œuvre pour ouvrages structurants	10	20110	Etudes préalables, acquisitions foncières et maîtrise d'œuvre pour ouvrages structurants	1	0
Ouvrages structurants	Etudes pour ouvrage structurant	Acquisitions foncières pour ouvrages structurants	20	20120	Acquisitions foncières pour ouvrages structurants	1	0

Ouvrages structurants	Travaux et réhabilitations ouvrages structurants	Travaux de création de barrages	11	20311	Travaux de création de barrages	1	0
Ouvrages structurants	Travaux et réhabilitations ouvrages structurants	Travaux de création de bassins de retenues	12	20312	Travaux de création de bassins de retenues	1	0
Ouvrages structurants	Travaux et réhabilitations ouvrages structurants	Travaux d'agrandissement d'ouvrages structurants	21	20321	Travaux d'agrandissement d'ouvrages structurants	1	0
Ouvrages structurants	Travaux et réhabilitations ouvrages structurants	Travaux de réhabilitation d'ouvrages structurants	22	20322	Travaux de réhabilitation d'ouvrages structurants	1	0
Ouvrages structurants	Travaux et réhabilitations ouvrages structurants	Travaux d'étanchéité d'ouvrages structurants	23	20323	Travaux d'étanchéité d'ouvrages structurants	1	0
Ouvrages structurants	Travaux et réhabilitations ouvrages structurants	Travaux réseaux eaux pluviales	30	20330	Travaux réseaux eaux pluviales	1	0
Ouvrages structurants	Travaux et réhabilitations ouvrages structurants	Travaux de création de zones d'expansion de crues	60	20360	Travaux de création de zones d'expansion de crues	1	0
Ouvrages structurants	Entretien ouvrages structurants	Entretien ouvrages structurants	10	20510	Entretien ouvrages structurants	1	0
Aménagements d'hydraulique douce	Etudes pour aménagements hydraulique douce	Etudes inventaire mares	10	30110	Etudes inventaire mares	1	1
Aménagements d'hydraulique douce	Etudes pour aménagements hydraulique douce	Etudes préalables, acquisitions foncières et maîtrise d'œuvre pour aménagements hydraulique douce	20	30120	Etudes préalables, acquisitions foncières et maîtrise d'œuvre pour aménagements hydraulique douce	1	1
Aménagements d'hydraulique douce	Etudes pour aménagements hydraulique douce	Etudes de plans d'aménagements d'hydraulique douce	30	30130	Etudes de plans d'aménagements d'hydraulique douce	1	1
Aménagements d'hydraulique douce	Etudes pour aménagements hydraulique douce	Acquisitions foncières pour hydraulique douce	90	30190	Acquisitions foncières pour hydraulique douce	1	1
Aménagements d'hydraulique douce	Travaux et aménagement hydraulique douce	Implantations de cultures intermédiaires	10	30310	Implantations de cultures intermédiaires	1	1
Aménagements d'hydraulique douce	Travaux et réhabilitations	Travaux de création de bandes enherbées	21	30321	Travaux de création de bandes enherbées	1	1

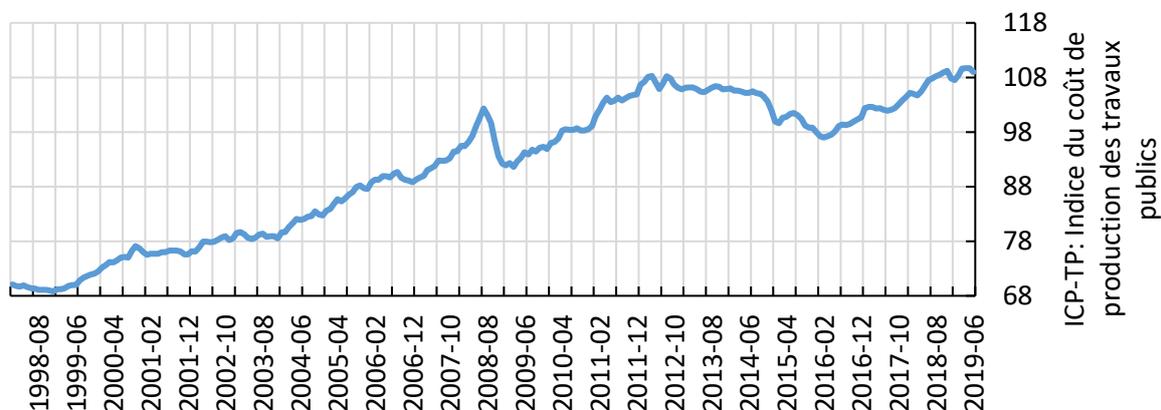
	aménagement hydraulique douce						
Aménagements d'hydraulique douce	Travaux et réhabilitations aménagement hydraulique douce	Travaux de création de fascines	22	30322	Travaux de création de fascines	1	1
Aménagements d'hydraulique douce	Travaux et réhabilitations aménagement hydraulique douce	Travaux de création de fossés	23	30323	Travaux de création de fossés	1	1
Aménagements d'hydraulique douce	Travaux et réhabilitations aménagement hydraulique douce	Travaux de création de haies	24	30324	Travaux de création de haies	1	1
Aménagements d'hydraulique douce	Travaux et réhabilitations aménagement hydraulique douce	Travaux de création de haies et fascines	25	30325	Travaux de création de haies et fascines	1	1
Aménagements d'hydraulique douce	Travaux et réhabilitations aménagement hydraulique douce	Travaux de création de mares	26	30326	Travaux de création de mares	1	1
Aménagements d'hydraulique douce	Travaux et réhabilitations aménagement hydraulique douce	Travaux de création de noues enherbées	27	30327	Travaux de création de noues enherbées	1	1
Aménagements d'hydraulique douce	Travaux et réhabilitations aménagement hydraulique douce	Travaux de création de talus	28	30328	Travaux de création de talus	1	1
Aménagements d'hydraulique douce	Travaux et réhabilitations aménagement hydraulique douce	Travaux de création d'aménagements hydraulique douce divers	29	30329	Travaux de création d'aménagements hydraulique douce divers	1	1
Aménagements d'hydraulique douce	Travaux et réhabilitations aménagement hydraulique douce	Travaux de réhabilitation de mares	30	30330	Travaux de réhabilitation de mares	1	1
Aménagements d'hydraulique douce	Travaux et réhabilitations aménagement hydraulique douce	Travaux de correction de ravines	50	30350	Travaux de correction de ravines	1	1
Aménagements d'hydraulique douce	Entretiens hydraulique douce	Entretiens hydraulique douce	10	30510	Entretiens hydraulique douce	1	1

Aménagements hydrauliques non précisés	Etudes préalables et maîtrises d'œuvres pour aménagements hydrauliques non précisés	Etudes préalables et maîtrises d'œuvres pour aménagements hydrauliques non précisés	10	40110	Etudes préalables et maîtrises d'œuvres pour aménagements hydrauliques non précisés	1	1
Aménagements hydrauliques non précisés	Etudes préalables et maîtrises d'œuvres pour aménagements hydrauliques non précisés	Acquisitions foncières pour aménagements hydrauliques non précisés	90	40190	Acquisitions foncières pour aménagements hydrauliques non précisés	1	1
Aménagements hydrauliques non précisés	Travaux de création d'ouvrage structurant et d'aménagement hydraulique douce	Travaux de créations d'ouvrages hydrauliques non précisés	10	40310	Travaux de créations d'ouvrages hydrauliques non précisés	1	1
Potabilisation	Etudes de infrastructures de potabilisation	Etudes pour le suivi des qualités des eaux	10	50110	Etudes pour le suivi des qualités des eaux	0	1
Potabilisation	Etudes de infrastructures de potabilisation	Etudes préalables à la création d'unités de traitement AEP	11	50111	Etudes préalables à la création d'unités de traitement AEP	0	1
Potabilisation	Travaux et réhabilitations infrastructures de potabilisation	Travaux de créations de traitement AEP	20	50320	Travaux de créations de traitement AEP	0	1
Potabilisation	Travaux et réhabilitations infrastructures de potabilisation	Travaux de réhabilitation de traitement AEP	21	50321	Travaux de réhabilitation de traitement AEP	0	1
Gestion quantitative de l'AEP	Etudes de sécurisation des infrastructures AEP	Etudes recherche de nouveaux captages	10	60110	Etudes recherche de nouveaux captages	0	1
Gestion quantitative de l'AEP	Etudes de sécurisation des infrastructures AEP	Etudes diagnostics forages	11	60111	Etudes diagnostics forages	0	1
Gestion quantitative de l'AEP	Etudes de sécurisation des infrastructures AEP	Etudes diagnostics réseaux	12	60112	Etudes diagnostics réseaux	0	1
Gestion quantitative de l'AEP	Travaux et réhabilitations sécurisation des infrastructures AEP	Travaux de créations de captages/forages	20	60320	Travaux de créations de captages/forages	0	1

Gestion quantitative de l'AEP	Travaux et réhabilitations sécurisation des infrastructures AEP	Travaux de réhabilitations captages/forages	21	60321	Travaux de réhabilitations captages/forages	0	1
Gestion quantitative de l'AEP	Travaux et réhabilitations sécurisation des infrastructures AEP	Travaux et réhabilitations sources	22	60322	Travaux et réhabilitations sources	0	1
Gestion quantitative de l'AEP	Travaux et réhabilitations sécurisation des infrastructures AEP	Travaux d'interconnexions pour l'AEP	40	60340	Travaux d'interconnexions pour l'AEP	0	1
Gestion quantitative de l'AEP	Travaux et réhabilitations sécurisation des infrastructures AEP	Travaux d'instrumentations pour l'AEP	60	60360	Travaux d'instrumentations pour l'AEP	0	1
Aménagement des points d'engouffrement / bétoires	Etudes aménagements des points d'engouffrement / bétoires	Etudes préalables aux aménagements de bétoires	11	70111	Etudes préalables aux aménagements de bétoires	0	1
Aménagement des points d'engouffrement / bétoires	Etudes aménagements des points d'engouffrement / bétoires	Etudes hydrogéologiques et traçages	12	70112	Etudes hydrogéologiques et traçages	0	1
Aménagement des points d'engouffrement / bétoires	Etudes aménagements des points d'engouffrement / bétoires	Acquisitions foncières pour aménagement points d'engouffrement / bétoires sur PPI	20	70120	Acquisitions foncières pour aménagement points d'engouffrement / bétoires sur PPI	0	1
Aménagement des points d'engouffrement / bétoires	Etudes aménagements des points d'engouffrement / bétoires	Acquisitions foncières pour protection points d'engouffrement / bétoires en amont PPI	21	70121	Acquisitions foncières pour protection points d'engouffrement / bétoires en amont PPI	0	1
Aménagement des points d'engouffrement / bétoires	Travaux et réhabilitations des points d'engouffrement / bétoires	Travaux de créations d'ouvrages de protection points d'engouffrement / bétoires sur PPI	10	70310	Travaux de créations d'ouvrages de protection points d'engouffrement / bétoires sur PPI	1	1
Aménagement des points d'engouffrement / bétoires	Travaux et réhabilitations des points d'engouffrement / bétoires	Travaux de protection forages	15	70315	Travaux de protection forages	1	1
Aménagement des points d'engouffrement / bétoires	Travaux et réhabilitations des points d'engouffrement / bétoires	Travaux de réhabilitations d'ouvrages de protection points d'engouffrement / bétoires sur PPI	20	70320	Travaux de réhabilitations d'ouvrages de protection points d'engouffrement / bétoires sur PPI	1	1

Aménagement des points d'engouffrement / bétaires	Travaux et réhabilitations des points d'engouffrement / bétaires	Indemnisations pour changements de pratiques	70	70370	Indemnisations pour changements de pratiques	1	1
Réduction de la vulnérabilité aux inondations	Etudes pour la réduction de la vulnérabilité	Etudes préalables réduction vulnérabilités inondations	10	80110	Etudes préalables réduction vulnérabilités inondations	1	0
Réduction de la vulnérabilité aux inondations	Etudes pour la réduction de la vulnérabilité	Acquisitions foncières réduction vulnérabilité inondations	20	80120	Acquisitions foncières réduction vulnérabilité inondations	1	0
Réduction de la vulnérabilité aux inondations	Travaux et réhabilitations réduction vulnérabilité	Travaux réduction de la vulnérabilité inondations	10	80310	Travaux réduction de la vulnérabilité inondations	1	0
Réduction de la vulnérabilité aux inondations	Entretiens réduction vulnérabilité	Entretiens réduction vulnérabilité inondations	10	80510	Entretiens réduction vulnérabilité inondations	1	0
Animation	Animation	Animation agricole	10	90010	Animation agricole	1	1
Animation	Animation	Conseil agricole individuel	11	90011	Conseil agricole individuel	0	0
Animation	Animation	Animation bassins versants	20	90020	Animation bassins versants	1	1
Animation	Animation	Animation mares	30	90030	Animation mares	1	1
Animation	Animation	Animation promotion des AHD	40	90040	Animation promotion des AHD	1	1
Animation	Animation	Animation ressources en eau et BAC	50	90050	Animation ressources en eau et BAC	selon le BAC	1
Animation	Animation	Animation SAGE	60	90060	Animation SAGE	selon le SAGE	1
Animation	Animation	Organisation colloques	90	90090	Organisation colloques	1	1

1.2 Evolution de l'indice de coût de production des travaux publics



1.3 Liste d'évènements CCR

Liste des évènements ayant touché l'Eure et/ou la Seine-Maritime entre 1998 et 2016 :

- Orages de Normandie le 13 mai 1998 : < 10 M€ marché (19 communes 76)
- Orages du Nord le 5 et 6 juin 1998 : 11 M€ (58 communes 27 +76)
- 30 octobre 1998 (4 communes près Pont-Audemer 27)
- 7 mai 1999 (8 communes près Rouen 76)
- 6 août 1999 (6 communes 27 + 76)
- 3 octobre 1999 (4 communes / Lézarde 76)
- Inondations par coulées boueuses 24 au 29 décembre 1999 (toutes les communes)
- Seine-Maritime du 5 au 12 mai 2000 : 30 M€ (> 153 communes 76)
- Orages du 3 au 10 juillet 2000 : 16 M€ (10 communes 76)
- Décembre 2000 (27 -> 2 communes)
- Novembre 2000 (27 -> 13 communes)
- Mai 2000 (2 -> 8 communes)
- La Somme en 2000-2001 : 110 M€
- Inondations Bretagne – Normandie de janvier 2001 : 28 M€ (27)
- Orages du 15 juin (2 communes / Lézarde 76) et du 6 au 9 juillet 2001 (6 communes / Tréport 76) : 42 M€
- Nord-Ouest du 26-27 juillet 2001 : < 10 M€ (8 communes 27) et 2-3 août 2001 (Le Havre et Bolbec 76)
- Inondations du 31 mai au 1er juin 2003 : 35 M€ (27 communes / Lézarde 76), et du 14 juin 2003 (même secteur 76)
- Inondations du Nord 23-28 juin (près Dieppe 76) et les 3 et 4 juillet 2005 (près Rouen 76) : 24 M€
- 23 octobre 2006 (4 communes 76)
- (Orages du Nord et de l'Est le 7 juillet 2007 : 19 M€)
- 8 juin 2007 (4 communes 76) + 19 juin 2007 (3 communes 76) et 16 juillet 2007 (34 communes / Cailly 76) +
- 16 au 28 mai 2008 (surtout Pays de Bray mais aussi Austreberthe 76)
- 3 au 4 août 2008 (4 communes vers Yvetot 76)

- 3 au 7 novembre 2009 (12 communes / Lézarde 76)
- 26 mai 2010 (Dieppe 76)
- 10 juin 2010 (près de Rouen 76)
- 21 juin 2012 (2 communes / Dun 76)
- 7 août 2013 (2 communes près Rouen avec entreprises inondées 76)
- 13 et 14 octobre 2013 (6 communes / pointe de Caux 76)
- 21 mai 2014 (8 communes près Dieppe + Fresquiennes 76)
- 4 juillet 2014 (4 communes secteur Haye-Malherbe 27)
- 19 juillet 2014 (9 communes près Bourg-Achard 27)
- 13 août 2015 (8 communes 76)
- (Orages du 4 et 5 juin 2015 : < 10 M€)
- Orages du 27 au 29 mai 2016 : 10 à 25 M€ (12 communes dont Buchy 27 + 76)
- Inondations de Seine et Marne en janvier 2018 : environ 200 M€

1.4 Dépenses engagées suite évènement turbidité

COMMUNAUTE DE L'AGGLOMERATION HAVRAISE
Direction Eau et Assainissement
Dépenses engagées suite pollution de l'eau d'Octobre 2004
ANNEE 2004

Fournisseurs	Objet	Engagement	Date d'engagement	Montant HT	Taux de TVA	Montant TTC	Mandaté TTC	imputation budgetaire	Reste engagé TTC	Observations
Oïssel Transport	Transport pour ravitaillement en eau potable de la clinique du Petit Col Moulin à Harfleur	8011757	27/10/2004	1 700,00 €	19,6%	2 033,20 €	2 033,20 €	02 / 6248 / 69	0,00 €	mandat 2591 du 29/11/2004
Auchan Montivilliers	Achat d'eau en bouteilles	8007366	21/10/2004	9 500,00 €	5,5%	10 022,50 €			1 027,78 €	Pas eu de facture complémentaire à ce jour 25/08/2005
		8007366					6 216,00 €	02 / 6061.0 / 69		Mandat 2475 du 23/11/2004
		8007366					2 526,72 €	02 / 6061.0 / 69		Mandat 2477 du 23/11/2005
		8007366					252,00 €	02 / 6061.0 / 69		mandat 2612 du 6/12/2004
Intermarché Montivilliers	eau de source en bouteilles	8003459	28/10/2004	95,55 €	5,5%	100,80 €	100,80 €	02 / 6061.0 / 69	0,00 €	Commande de la ville de Montivilliers.mandat 2476/1 du 23/11/2004
Intermarché Montivilliers	eau de source en bouteilles	8003461	02/11/2004	95,55 €	5,5%	100,80 €	100,80 €	02 / 6061.0 / 69	0,00 €	Commande de la ville de Montivilliers.mandat 2476/2 du 23/11/2005
Champion Epouville	eau de source en bouteilles	8003460	02/11/2004	162,43 €	5,5%	171,36 €	171,36 €	02 / 6061.0 / 69	0,00 €	Commande de la ville de Montivilliers.mandat 2703 du 14/12/2004
Auchan Montivilliers	Achat d'eau en bouteilles	8004729	20/10/2004	796,21 €	5,5%	840,00 €	840,00 €	02 / 6061.0 / 69	0,00 €	Mandat 2380 du 8/11/2004
Hypermarché LECLERC OCEANE	25 Palettes eau cristalline	5265	17/11/2004	1 871,09 €	5,5%	1 974,00 €	1 974,00 €	02 / 6061.0 / 69	0,00 €	mandat 2478 du 23/11/2004
TOTAL							14 214,88 €			

ANNEE 2005

Fournisseurs	Objet	Engagement	Date d'engagement	Montant HT	Taux de TVA	Montant TTC	Mandaté TTC	imputation budgetaire	Reste engagé TTC	Observations
Ville de Gonfreville l'Orcher	remboursement des frais engagés par cette commune suite à la pollution de l'eau d'octobre 2004 (délibération du conseil communautaire n° 20050203)	6093	09/08/2005	10 562,68 €	0,0%	10 562,68 €	10 562,68 €	02 / 678 / 69	0,00 €	mandat 1787 du 17/08/2005
TOTAL							10 562,68 €			

TOTAL Année 2004 et 2005 24 777,56 €

Annexes du Volume 2

2.1 Note de présentation du scénario changement climatique à horizon 2050 (« cc »)

Définition des paramètres d'entrées pour le scénario « changement climatique – horizon 2050 »

Contexte

Le programme EVAPORE a pour objectif d'évaluer l'efficacité des actions menées depuis 2000 pour réduire les impacts du ruissellement et de l'érosion des sols à l'échelle du territoire Seine aval. Il prévoit également d'étudier leur efficacité future dans un contexte changeant, notamment du point de vue climatique. L'horizon temporel retenu est 2050, car il est suffisamment éloigné pour impliquer des changements significatifs, et suffisamment proche pour être pris en compte dans les politiques d'aménagement.

Pour cela, l'équipe projet prévoit de modéliser les ruissellements sur les versants (*WATERSED*) et les enveloppes d'inondations (*modèle DHI*) sur les deux bassins versants pilotes (Lézarde, Austreberthe). Ces simulations à une échelle temporelle plus lointaine nécessitent donc de prendre en compte la variabilité induite par le changement climatique, toutes autres choses restant égales par ailleurs (occupation du sol, enjeux, aménagements). Trois leviers principaux ont été identifiés :

1. L'évolution des cumuls de précipitations
2. L'évolution des événements climatiques extrêmes (intensités de précipitations)
3. L'évolution des débits des cours d'eau

En effet, selon le GIEC/IPCC (2013), la fréquence et l'intensité des phénomènes extrêmes vont probablement augmenter dans les régions des latitudes moyennes (Amérique du Nord et Europe). Les projections à l'horizon 2100 indiquent que la fréquence et l'intensité des épisodes de fortes précipitations devraient continuer à augmenter (Laignel & Nouaceur, 2018).

L'objectif ici est de réaliser un état de l'art des projections climatiques afin de fixer le cadrage de ce scénario prospectif.

Etat de l'art

Les projections climatiques

Pour répondre aux interrogations sur le changement climatique et ses impacts, le GIEC utilise des modèles climatiques et des études éco-démographiques qui représentent un large panel d'évolution possibles du climat. Pour simuler au mieux cette évolution, des forçages naturels et anthropiques doivent être pris en compte (activité solaire, émissions de GES, etc.). Pour les simulations futures, les forçages anthropiques sont déterminés au travers de scénarios d'émissions.

Les scénarios du GIEC

Depuis la fin des années 1990, les projections climatiques étaient basées sur les scénarios SRES selon plusieurs évolutions socio-économiques possibles. Ces scénarios sont établis par des modèles d'évaluation intégrée (évolution de la population, développement industriel et agricole, etc.) à partir d'hypothèses sur le développement économique et les conséquences probables sur l'environnement. Ces modèles fournissent ainsi des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (GES) introduits comme

forçages dans les simulations climatiques. Mais les anciens scénarios SRES ne prenaient pas en compte l'effet des politiques climatiques récentes sur la réduction des GES, et le contexte socio-économique mondial a depuis beaucoup évolué. Depuis 2013, et le 5^{ème} rapport du GIEC, un ensemble de quatre nouveaux scénarios a été défini selon des profils d'évolution de concentration des GES et de niveau de forçages radiatifs (Tableau 1).

Tableau 1 : Description des différents scénarios utilisés pour les projections climatiques. En gris, les anciens scénarios SRES. En vert les nouveaux scénarios utilisés par le GIEC d'après Moss et al., 2010.

Scénario	Description
B1	Scénario « optimiste »
A1B	Scénario « médian »
A2	Scénario « pessimiste »
RCP 2.6	Forçage radiatif vers 2100 = 2,6 W/m ² : CO ₂ vers 2100 = 475 ppm ; Profil d'évolution = pic puis déclin
RCP 4.5	Forçage radiatif vers 2100 = 4,5 W/m ² : CO ₂ vers 2100 = 630 ppm ; Profil d'évolution = stabilisation avant 2100
RCP 6.0	Forçage radiatif vers 2100 = 6 W/m ² : CO ₂ vers 2100 = 800 ppm ; Profil d'évolution = stabilisation après 2100
RCP 8.5	Forçage radiatif vers 2100 = 8,5 W/m ² : CO ₂ vers 2100 = 1313 ppm ; Profil d'évolution = croissant (sans politique climatique)

La comparaison avec les anciens scénarios SRES (Figure 1) montre que le RCP8.5 est plus fort que l'ancien scénario A2 sur une même échelle temporelle. Les RCP 6.0 et 4.5 sont proches respectivement des anciens scénarios A1B et B1. Le nouveau scénario RCP2.6 n'a quant à lui pas d'équivalent dans les anciens scénarios puisqu'il intègre les effets de politique de réduction des émissions pour limiter le réchauffement à 2.0°C.

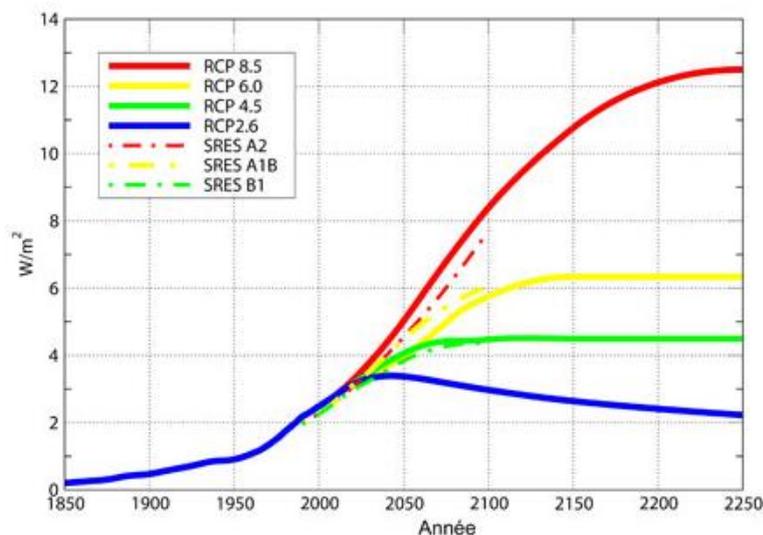


Figure 1: Evolution du bilan radiatif de la terre ou « forçage radioactif » en W/m² sur la période 1850-2250 selon les différents scénarios (sources : Météo France).

✚ Les modèles globaux, régionaux, et les descentes d'échelles

Les simulations climatiques sont produites à partir de modèles numériques dits Modèles de Circulations Générale (GCM). Il s'agit de modèles couplés océan-atmosphère qui modélisent la partie organisée des écoulements atmosphériques et océaniques, responsables du climat. Mais ces GCM

possèdent généralement une résolution de l'ordre de quelques centaines de kilomètres ce qui se révèle trop peu précis pour des études d'impact à l'échelle régionale (Figure 2). La descente d'échelle est donc nécessaire pour les études où les simulations climatiques sont utilisées comme données d'entrée de modèles hydrologiques (Explore 2070, 2012).

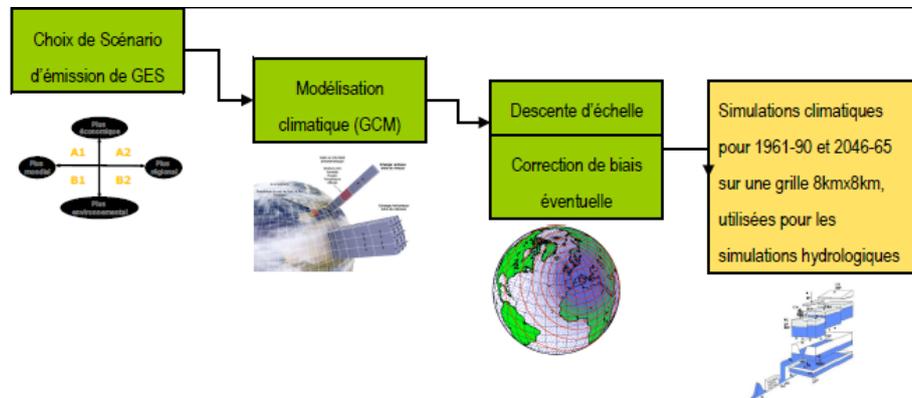


Figure 2: Principe de modélisations des projections climatiques (Source : Explore 2070, 2012).

Deux approches existent pour la descente d'échelle :

1. L'approche dynamique qui consiste à résoudre la physique et la dynamique du système climatique régional. Les modèles climatiques régionaux sont de même nature que les modèles atmosphériques ou océaniques globaux utilisés par le GIEC mais ont l'avantage d'opérer à une résolution beaucoup plus fine sur la région étudiée.
2. L'approche statistique qui nécessite de rechercher une relation statistique entre les variables à grande échelle et les variables locales de surface. Cette relation se base sur le fait que le climat à l'échelle régionale dépend de deux facteurs, à savoir, le climat à grande échelle, et les caractéristiques locales telles que le type de surface, la topographie, la couverture du sol, etc.

Les modèles climatiques à échelle régionale (RCM) ont donc été développés pour fournir des informations sur le changement climatique adaptées aux études d'impact. Pour l'espace européen, les projets PRUDENCE et ENSEMBLES ont fourni des simulations régionales imbriquées dans le projet d'inter-comparaison de modèles GCM couplés - phase 3 (CMIP3) sur des tailles de grille inférieures à 50km. Récemment, un ensemble de RCM Européen à haute-résolution dans le cadre du programme EURO-CORDEX¹⁶ a été établi avec des résolutions spatiales allant jusqu'à 12,5 km (Tableau 2).

Tableau 2: Liste des modèles climatiques compris dans l'ensemble multi-modèle EURO-Cordex d'après le site du DRIAS.

Modèle	Type	Institut
ARPEGE	GCM	Météo-France CNRM/GMGECE
CNRM-CM5	GCM	Météo-France CNRM/GMGECE
ESM	GCM	Max Planck Institute for Meteorology
EC-EARTH	GCM	European EC-Earth consortium
HadGEM2	GCM	Met Office Hadley Center
ALADIN52	RCM	Météo-France CNRM
WRF331F	RCM	National Center for Atmospheric Research (USA)
CCLM4-8-17	RCM	Climate Limited Area Modelling Community (Allemagne)
REMO019	RCM	Climate Service Center (Allemagne)

¹⁶ <https://www.hzg.de/ms/euro-cordex/index.php/en>

HIRHAM5	RCM	Danish Meteorological Institute
RACM022E	RCM	National Center for Atmospheric Research (USA)
RCA4	RCM	Swedish meteorological and Hydrological Institute
RegCM4-3	RCM	

Les simulations de précipitations

✚ A l'échelle globale

Les résultats de modélisation de l'ensemble multi-modèle CMIP5 (modèles globaux) de Kharin et al. (2013) à l'échelle du globe indiquent une tendance à l'augmentation pour les extrêmes annuels journaliers de précipitations simulés en comparaison avec les résultats historiques (période 1986-2005). A l'horizon 2050, on note une augmentation de 6, 8, et 12% pour les scénarios RCP2.6, RCP4.5, et RCP8.5. D'autre part, les périodes de retour correspondant aux épisode de retour 20 ans pour la période 1986-2005 sont réduits à 14, 12, et 11 ans.

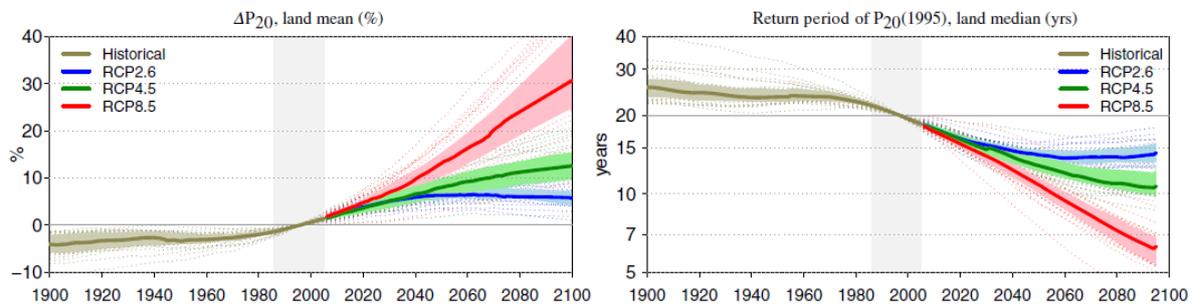


Figure 3 : Résultats de simulations de l'ensemble multi-modèle CMIP5 d'après Kharin et al. 2013. A gauche, les extrêmes annuels de précipitations journalières ΔP_{20} (%) moyenné sur les surfaces continentales par rapport aux données historiques 1986-2005 pour les scénarios RCP2.6, 4.5, et 8.5. A droite, les périodes de retour correspondantes pour les épisodes de précipitations extrêmes.

En Europe, plusieurs projections climatiques ont été réalisées à partir de RCM dans les années 2010 (projet PRUDENCE et ENSEMBLES) et de nouvelles projections issues du projet CORDEX commencent à être publiées. Le tableau 3 synthétise quelques résultats majeurs qui pourraient s'appliquer à notre zone d'étude dans le cadre du projet EVAPORE. Les résultats semblent traduire une augmentation généralisée des précipitations (variable selon le scénario choisi) et un renforcement des extrêmes de précipitations.

Tableau 3 : Synthèse de quelques principaux résultats des projections climatiques régionales à l'échelle de l'Europe.

Etendue spatiale des simulations	Scénarios	Modèle	Résolution	Echelle temporelle de référence	Echelle temporelle simulée	Principales conclusions	Référence
Europe	rcp4.5 / rcp8.5	EURO-Cordex	12,5 km	1971-2000	2021-2050 ; 2071-2100	Sur la période 2071-2100, augmentation de 15 à 25% des précipitations extrêmes en hiver, et de 5 à 15% en été (scénario RCP 8.5). Sur la même période, augmentation de 5 à 15% des précipitations extrêmes en hiver et de 0 à 5% sur la période estivale (scénario rcp 4.5)	Jacob et al., 2014
Europe Centrale	A1B	12 projections climatiques régionales (EU-projet ENSEMBLES)	25 km	1961-1990	2070-2099	En moyenne sur les 12 modèles, les quantités de pluie vont augmenter de 18% en hiver et diminuer de 10% en été. Pour les épisodes extrêmes, les qtés de pluie vont augmenter de 22% en hiver, et d'environ 20% en été (quelques différences selon les périodes de retour des épisodes extrêmes. ici sont simulées les périodes de retour 20, 50 et 100 ans pour les épisodes extrêmes).	Kysely et al., 2011
Allemagne (partie Est)	A1B	12 projections climatiques régionales (EU-projet ENSEMBLES)	25 km	1961-1990	2021-2050 ; 2071-2100	Ici on regarde que 2021-2050 puisque c'est ce qui nous intéresse. Augmentation des précipitations en hiver, automne et printemps et diminution des précipitations en été. Augmentation de 5-20% des précipitations en hiver et de 0-15% en automne sur la période 2021-2050 (la tendance est moins marquée sur les autres saisons. Certains modèles montrent des augmentations et d'autres des diminutions). Pour les augmentations des épisodes extrêmes, l'augmentation est d'autant plus importante pour les événements très extrêmes. Ainsi, sur la période 2021-2050, on note une augmentation entre 0 et 40% en hiver/automne pour les événements extrêmes modérés, et entre 0 et 80% pour les événements les plus extrêmes. La tendance est moins marquée en été et printemps, avec une augmentation entre 0 et 30%.	Schwarzak et al., 2015
Belgique	rcp4.5 / rcp8.5	EURO-Cordex	0.11° et 0.44°	1961-2000 (1971-2000 pour WRF331F et RCA4 RCMs)	2071-2100	Selon les scénarios RCP 4.5 et 8.5, augmentation des intensités de précipitations entre 50 et 70% (pour un épisode de période de retour 10 ans) pour la résolution fine à 0.11°. Pour la résolution plus basse à 0.44°, l'augmentation est plus faible pour les intensités de précipitations de retour 10 ans, 25% et 50% pour les deux scénarios.	Hosseinzadehtalaei et al., 2018

✚ A l'échelle nationale

A l'échelle de la France, l'évolution des précipitations issues des modélisations présente une forte incertitude et peuvent masquer de fortes disparités locales. Une majorité de simulations issues des GCM convergent vers une diminution des précipitations annuelles marquée par une plus grande disparité entre les périodes hivernales et estivales (Météo France, 2013).

Les résultats de simulations de Terray et al. (2013) sur l'ensemble multi-modèle CMIP5 (modèle global) mettent en évidence ces variations saisonnières (Figure 4). A l'horizon 2050, on note une augmentation de +0,2 à +0,3 mm/jour pour les anomalies de précipitations en hiver selon les différents scénarios RCP, à contrario on note une diminution des anomalies de précipitations en période estivale de l'ordre de -0,09 à -0,3 mm/jour selon les scénarios.

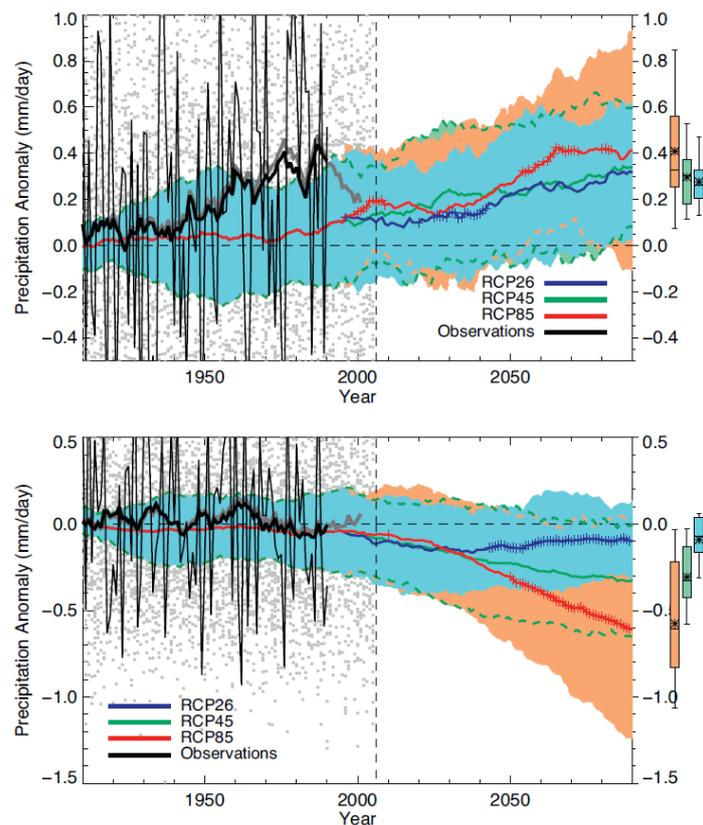


Figure 4: Evolution temporelle des anomalies de précipitations (mm/jour) en France pour les observations (en noir et gris) et pour les simulations des ensemble multi-modèle selon les différents scénarios RCP, d'après Terray et al. (2013). En haut la saison hivernale et en bas la saison estivale.

Mais les simulations issues des RCM semblent traduire une autre tendance. En effet, les résultats récents de Ouzeau et al. (2014), d'après des modèles climatiques régionaux WRF et Aladin-Climat, montrent une légère augmentation des précipitations hivernales de l'ordre de +0,1 à +0,85 mm/jour selon les scénarios et les modèles à l'horizon 2071-2100, et une augmentation plus faible voir une diminution l'été de -0,38 à +0,32 mm/jour. Les résultats issus de l'ensemble de modèles régionaux Euro-Cordex semblent quant à eux indiquer une tendance à la baisse pour les périodes estivales entre -0,7 et 0 mm/j selon les différents scénarios (Ouzeau et al., 2014). Cette même étude suggère un renforcement du taux de précipitations extrêmes sur une large part du territoire dépassant 5% dans certaines régions pour le scénario RCP8.5.

Par ailleurs, selon les résultats de Vautard et al. (2013) d'après des projections à moyen terme (2021-2050 – scénario A1B) et selon un modèle global (deux méthodes de descente d'échelle : LMDz et

MM5), une augmentation des précipitations est à prévoir, d'environ 5-10% pour la partie Nord de la France.

✚ A l'échelle de la Normandie

Selon les résultats de Artelia (2013), à partir de GCM et à l'échelle de la Normandie : A l'horizon 2050, une réduction des précipitations à hauteur de 5-10% est envisagée selon les anciens scénarios du GIEC (B1-A1B-A2 ; Figure 5). Ces évolutions se traduisent par des différences saisonnières marquées. En effet, à l'horizon 2050, on note une augmentation probable du cumul de précipitations d'environ 5 à 10% selon les scénarios. En été, les scénarios indiquent une réduction atteignant 20% par rapport à la moyenne actuelle.

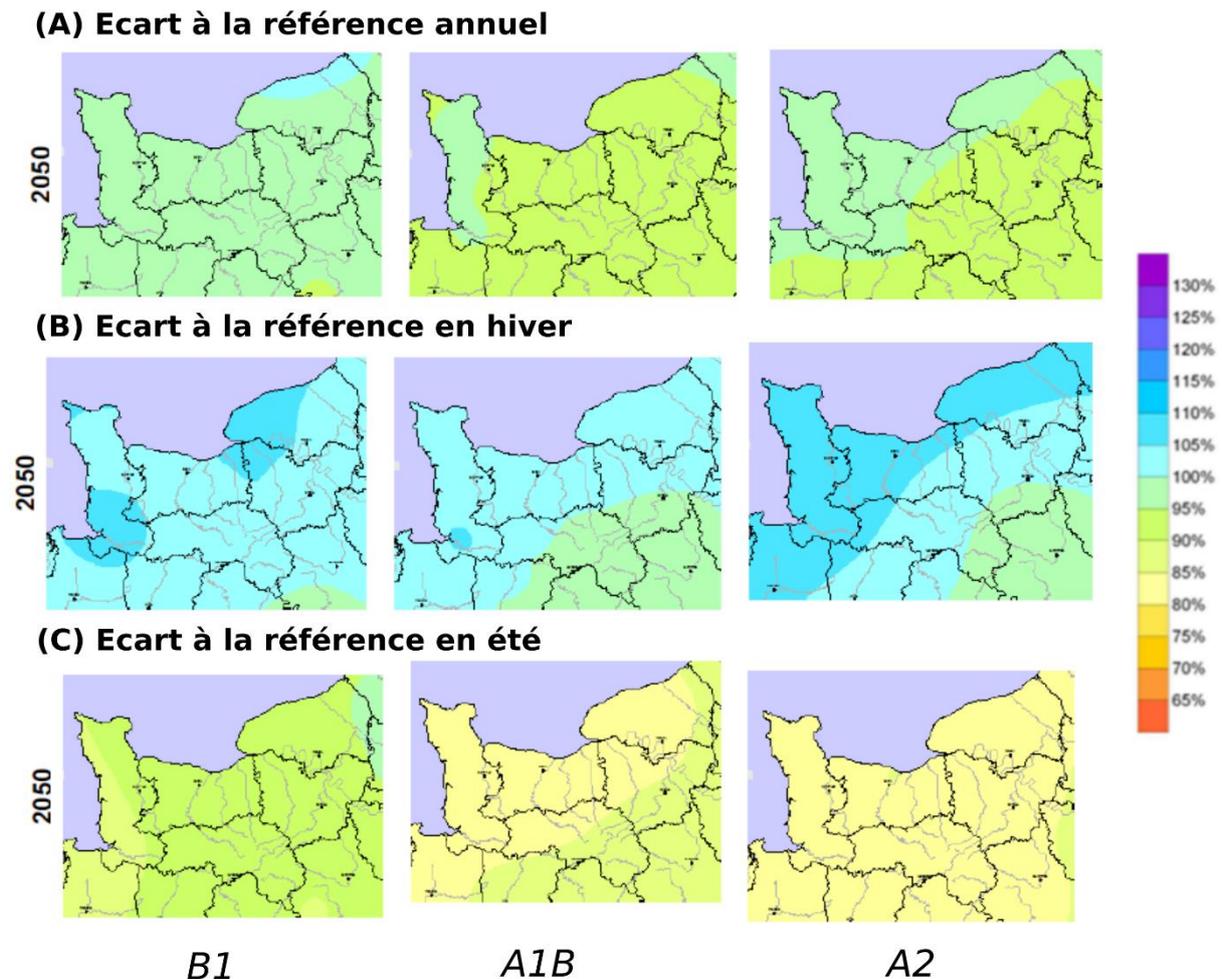
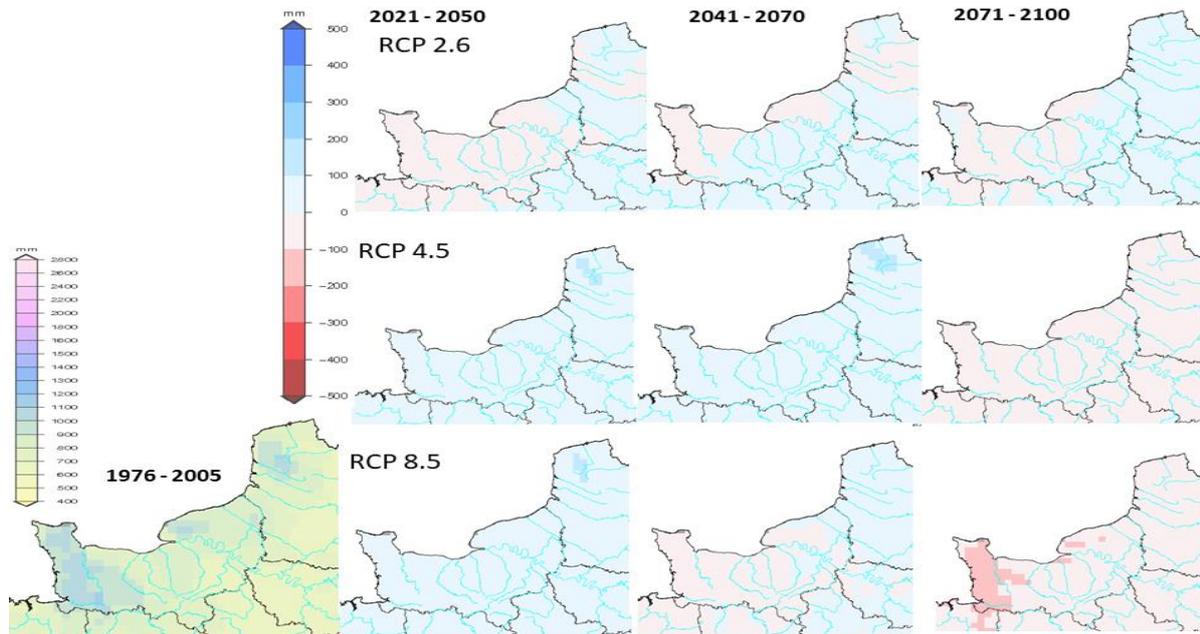


Figure 5 : Anomalies de précipitations (%) à l'horizon 2050 à l'échelle de la Normandie, selon les anciens scénarios du GIEC (Artelia, 2013).

Les dernières simulations du projet EURO-CORDEX sur la Normandie (données DRIAS, 2018 ; in Laignel & Nouaceur, 2018) pour les scénarios RCP 2.6/4.5/8.5 montrent des tendances assez variables selon la nature du scénario et la période temporelle choisie (Figure 6). Les simulations montrent les tendances suivantes :

- A l'horizon 2021-2050 : Un déficit de -100 mm pour le cumul de précipitations annuelles selon le scénario RCP2.6, et une augmentation de +100 mm pour les scénarios RCP4.5/8.5
- A l'horizon 2041-2070 : Une augmentation de +100 mm pour le scénario RCP4.5, un déficit de -100mm sur la partie Nord de la Normandie pour le scénario 2.6, et un déficit généralisé de -100mm pour le scénario 8.5

- A l'horizon 2071-2100 : Un déficit généralisé compris entre -100 et -200mm pour les scénarios 4.5 et 8.5, et un déficit sur la partie Ouest de la Normandie pour le scénario 2.6. Une augmentation des cumuls de précipitations de +100 mm sur la partie Est de la Normandie pour le scénario 2.6.



Multi-scénarios / 1 indice / 1 expérience-modèle

Figure 6 : Anomalie du cumul de précipitations annuelles (en mm) en Normandie à l'horizon 2100.

Concernant l'évolution des précipitations extrêmes, la tendance est plutôt stable sur la période 2021-2050, avec une évolution comprise entre -2 et +2%, selon les scénarios et quelques variations spatiales notables (Figure 7). A l'horizon 2041-2070, une augmentation comprise entre +2 et +4% selon les trois différents scénarios. Enfin à l'horizon 2071-2100, une augmentation comprise entre +2 et +10% selon la nature des différents scénarios.

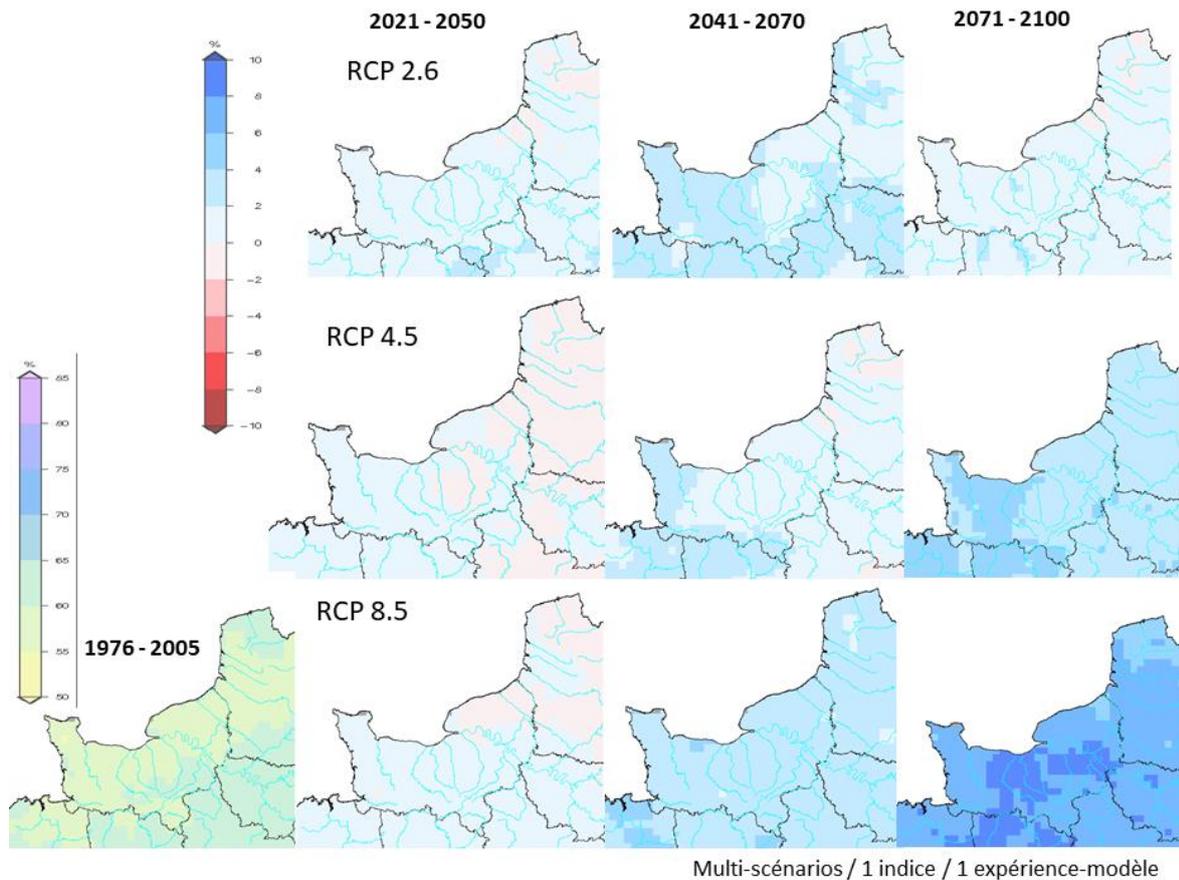


Figure 7 : Evolution du pourcentage de précipitations extrêmes en Normandie à l'horizon 2100.

Les simulations de débits

Les projections climatiques (à partir de GCM ou RCM) peuvent être utilisées comme données d'entrée pour les modèles hydrologiques afin de simuler les évolutions possibles des débits des hydrosystèmes à différentes échelles.

A l'échelle Européenne, des travaux récents comme ceux de Roudier et al. (2015) et de Leta & Bauwens (2018) simulent des projections de crues à l'horizon 2050-2100, respectivement en Europe et en Belgique. Les résultats de Roudier et al. (2015), utilisent comme données d'entrées de trois modèles hydrologiques, les résultats de projection Euro-Cordex (5 RCM + 5 GCM selon trois scénarios RCP) et simulent une augmentation comprise entre +20 et +40% des débits des crues centennales à l'horizon 2100. Les crues décennales quant à elles montrent une augmentation des débits comprise entre +10 et +20%. Les résultats de Leta & Bauwens (2018) utilisent comme données d'entrées les résultats de projection du projet PRUDENCE pour le modèle hydrologique SWAT. Selon leurs résultats et pour les scénarios climatiques les plus probables, on constate une augmentation des débits extrêmes d'environ 15-20% et donc une diminution des périodes de retour des événements les plus extrêmes (~20%). Ces projections à l'échelle européenne paraissent cependant très défavorables.

A l'échelle nationale, les travaux de Chauveau et al. (2013) simulent des évolutions de débit à l'horizon 2050 pour la France à partir de sept modèles climatiques et deux modèles hydrologiques (Isba-Modcou et GR4J). Selon leurs résultats de simulations, une diminution significative des débits moyens annuels est attendue à l'échelle du territoire de l'ordre de -10 à -40% (plus prononcé sur le bassin Seine-Normandie : -10 à -60%) et une baisse prononcée des débits d'étiage (-50% pour la Seine). Les évolutions semblent plus hétérogènes pour les crues et semblent indiquer une diminution du QJXA10

de -5% en moyenne pour la Seine. Mais les auteurs suggèrent une certaine prudence sur ces résultats qui montrent de très fortes incertitudes. Les travaux de Dumas et al. (2013) à l'échelle de la France simulent l'influence du changement climatique sur le risques de crues. Leurs résultats se basent sur le scénario A2 (augmentation des précipitations hivernales dans le Nord et diminution des précipitations estivales ; respectivement +0,5 mm/j et -1 mm/j). Les projections sont simulées avec des GCM (ARPEGE + OPAMED) et le modèle hydrologique SAFRAN-ISBA-MODCOU. Selon leurs résultats les crues de périodes de retour 100 ans actuelles tendent à évoluer vers des crues plus fréquentes (~80 ans sur notre zone d'étude).

A l'échelle régionale, les travaux de Ducharne et al. (2010) ont conclu vers un changement modéré des régimes de crue sur les bassins de la Somme et de la Seine. Leurs scénarios se sont basés sur les projections de plusieurs GCM, avec une descente d'échelle, et une validation des simulations à partir des données SAFRAN actuelles. Leurs projections climatiques utilisées en entrée des modèles hydro sont les suivantes : une diminution moyenne annuelle des précipitations comprises entre -6 et -12% aux horizons 2050 et 2100. 5 modèles hydrologiques ont été utilisés pour modéliser l'évolution des régimes de crue (plus de détails dans Ducharne et al., 2010). Les résultats de simulation indiquent une diminution de -28% en moyenne des débits à l'horizon 2100. Leurs simulations permettent également d'avoir des tendances sur l'évolution des débits minimums mensuels pour une période de retour de 5 ans (QMNA5), et les débits maximums mensuel pour une période de retour de 10 ans (QJXA10) à l'horizon 2050. Selon les projections pour les 5 modèles hydrologiques, les QJXA10 ne vont pas changer significativement (+/- 10% dans la plupart des cas alors que les intervalles de confiance à 95% autour des quantiles de référence varient entre -12 et +25%). La réduction des QMNA5 est plus prononcée, évaluée en moyenne à -30% sur l'ensemble multi-modèles.

La dynamique de crue sur un grand bassin versant comme celui de la Seine (75 000 km²) est très différente de ce qu'on observe sur de tout petites bassins versants comme ceux de l'Austreberthe et de la Lézarde (environ 200 km² chacun), qui sont très réactifs aux précipitations. Les résultats de Chauveau et Ducharne sur la Seine ne paraissent pas pertinents pour notre étude.

Les travaux de Dumas et al. (2013) portent sur 900 stations hydrométriques réparties sur toute la France (mais pas sur le pays de Caux). « Ils indiquent que les crues de périodes de retour 100 ans actuelles tendent à évoluer vers des crues plus fréquentes (~80 ans sur notre zone d'étude) », avec cependant des résultats très différents selon les stations et selon la méthode utilisée.

Par ailleurs, d'après les données dont nous disposons, une augmentation de 2% des pluies extrêmes sur le bassin versant instrumenté de Bourville (bassin versant sec de 1 100 ha en Seine-Maritime, période 1995 - 2014) induirait une diminution de la période de retour de la lame ruisselée centennale : T100 -> ≈ T80.

Bilan

Le recueil des résultats de projections climatiques ne permet pas d'avoir une réponse consensuelle en terme d'évolution des précipitations sur le territoire d'étude à l'horizon 2050. Cela s'explique d'une part par la différence des résultats entre les projections climatiques « anciennes » des GCM et des projections « récentes » des RCM. D'autre part, on observe parfois une non-convergence des résultats de modélisations qui induisent de fortes incertitudes.

Les résultats issus des GCM semblent traduire une diminution des précipitations annuelles (~10% dont une augmentation en hiver et une baisse en été), alors que les résultats issus des RCM semblent plutôt converger vers une augmentation des précipitations annuelles (~5-10%).

Les résultats des GCM et des RCM semblent converger vers un renforcement des précipitations extrêmes : plus marqué sur les épisodes très extrêmes et plus faible sur les épisodes modérés, et vers une diminution des périodes de retour ces épisodes. Mais les résultats des projections climatiques montrent de très fortes variabilités.

Pour les débits, les résultats semblent converger vers une baisse des débits généralisée (accentuée en étiage), mais des événements extrêmes plus prononcés. Une augmentation des débits des événements les plus extrêmes et, par conséquent, une diminution des périodes de retour des événements centennaux est attendue (~15-20% jusqu'à 40% pour les scénarios les plus extrêmes).

Pour la paramétrisation du scénario « changement climatique » dans le cadre du projet EVAPORE il est indispensable de prendre en compte la forte incertitude liée aux projections climatiques et leur caractère, parfois, non-consensuel.

Les propositions de paramétrisation pourraient être les suivantes :

→ Proposer trois configurations à l'horizon 2050 : le – extrême, le + probable, le + extrême pour prendre en compte la très forte incertitude liée aux projections climatiques sur les précipitations.

1. Le – extrême : Normandie peu affectée par le changement climatique, pas de résultats tangibles et projections climatiques non-consensuelles. Pas de changement sur les crues modélisées à l'horizon 2050. Pas besoin que DHI simule cette configuration.

2. Le + probable : Se baser sur les derniers résultats EURO-CORDEX en France et le scénario RCP4.5 : A l'horizon 2050, augmentation des précipitations hivernales (+0,5 mm/j), pas de changements pour les précipitations estivales. Très faibles changements des précipitations extrêmes (+2%). Pas nécessairement besoin que DHI simule cette configuration. On peut diminuer légèrement le temps de retour de la Q100 déjà simulée (ex : T100 -> T80).

Evolution de la période de retour de la pluie pour une augmentation de 2% des précipitations extrêmes selon la saison (à partir des données Météo France Rouen Boos 24h 1969 – 2007) :

T retour actuel années	H24 mm Hiver (oct-avril)	H24 mm Eté (mai-sept)	T retour future H24 hiver (ans)	T retour future H24 été (ans)
5	31.1	41	4	4
10	35	47.8	9	9
20	38.8	54.3	18	18
30	41	58.1	26	27
50	43.7	62.8	43	44
100	47.3	69.1	82	85

3. Le + extrême : Se baser sur les derniers résultats EURO-CORDEX en France et le scénario RCP8.5. A l'horizon 2050, augmentation des précipitations hivernales (0,5-1 mm/j) et estivales (0,5 mm/j). Augmentation du taux de précipitations extrêmes (~5%). Ici DHI augmente la quantité de pluie pour la crue simulée + l'intensité de précipitations (forme du hyétogramme). On peut diminuer le temps de retour de la Q100 déjà simulée plus fortement (ex T100 -> T60).

Evolution de la période de retour de la pluie pour une augmentation de 5% des précipitations extrêmes selon la saison (à partir des données Météo France Rouen Boos 24h 1969 – 2007) :

T retour actuelle années	H24 mm Hiver (oct-avril)	H24 mm Eté (mai-sept)	T retour future H24 hiver (ans)	T retour future H24 été (ans)
5	31.1	41	4	4
10	35	47.8	7	8
20	38.8	54.3	14	15
30	41	58.1	21	23
50	43.7	62.8	34	36
100	47.3	69.1	64	69

Conclusion :

Malgré l'absence de consensus sur les projections d'évolution des pluies extrêmes avec le changement climatique, plusieurs résultats indiquent une diminution de la période de retour des événements extrêmes en Normandie, en termes de précipitations mais aussi de débits de pointe de crue.

Nous proposons donc de retenir les paramètres suivants pour le modèle pour les 3 configurations évoquées ci-dessus :

- 1. pas d'évolution des événements extrêmes : pas de modification des périodes de retour**
- 2. RCP 4.5 : diminution des périodes de retour des événements modélisés (T10-> T9 ; T50 -> T45 ; T100 -> T80)**
- 3. RCP 8.5 : diminution plus forte des périodes de retour des événements modélisés (T10-> T8 ; T50 -> T35 ; T100 -> T65)**

Bibliographie

1. IPCC/GIEC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2013. Changements climatiques 2013. Les éléments scientifiques. Résumé à l'intention des décideurs. 34 p.
2. Laignel, B. & Nouaceur, Z. (2018). Evolution du climat à l'échelle de la Métropole Rouen Normandie. Fiche Climat Métropole Rouen. GIEC Local. 13pp.
3. Météo France 2013. Le changement climatique en France et ses impacts.
4. Ouzeau G., Deque M., Jouini M., Planton S., Vautard R., Vrac M., 2014. Scénarios régionalisés. Le climat de la France au XXI^e siècle, Volume 4, Rapport de la mission Jean Jouzel. Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement, 62 p.
5. Jacob D., Petersen J., Eggert B., Alias A., Christensen O.B., Bouwer L.M., Braun A., Colette A., Deque M., Goergievski G., Georgopoulou E., Gobiet A., Menut L., Nikulin G., Haensler A., Hempelmann N., Jones C., Keuler K., Kovats S., Kröner N., Kotlarski S., Kriegsmann A., Martin E., Van Meijgaard E., Moseley C., Pfeifer S., Preuschmann S., Radermacher C., Radtke K., Rechid D., Roundsevelli M., Samuelsson P., Somot S., Soussana J.F., Teichmann C., Valentini R., Vautard R., Weber B., Yiou P., 2014. « EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. » *Regional Environmental Change*, 14(2), 563-578.
6. Kharin V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X., Whener, M. (2013). Changes in temperature and precipitations extremes in the CMIP5 ensemble. *Climatic Change*, 119, 345-357 pp.
7. Terray, L., Boé, J. (2013). Quantifying 21st-century France climate change and related uncertainties. *C. R. Geoscience*, 345, 136-149pp.
8. L'adaptation aux effets du changement climatique en Haute et Basse-Normandie. Rapport d'étude. Arteria Eau & Environnement. Septembre 2013. Réf 8520091. 30 pp.
9. Explore 2070 : Eau et changement climatique. Hydrologie de surface. B1 – Climatologie de la métropole. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. Octobre 2012.
10. Moss, R. H., et al. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463. <https://doi:10.1038/nature08823>
11. Hosseinzadehtalaei, P., Tabari, H., Willems, P. (2018). Precipitation intensity-duration-frequency curves for central Belgium with an ensemble of EURO-CORDEX simulations, and associated uncertainties. *Atmospheric Research*, 200, 1-12 pp.
12. Vautard, R., Noël, T., Li, L., Vrac, M., Martin, E., Dandin, P., Cattiaux, J., Joussaume, S. (2013). Climate variability and trends in downscaled high-resolution simulations and projections over Metropolitan France. *Clim Dyn*, 41, 1419-1437 pp.
13. Kizely, J., Gaal, L., Beranova, R., Plavcova, E. (2011). Climate change scenarios of precipitations extremes in Central Europe from ENSEMBLES regional climate models. *Theor Appl Climatol*, 104, 529-542 pp.
14. Schwarzark, S., Hänsel, S., Matschullat, J. (2015). Projected changes in extreme precipitation characteristics for Central Eastern Germany (21st century, model-based analysis). *Int. J. Climatol.*, 35, 2724-2734 pp.
15. Ducharne, A., Habets, F., Pagé, C., Sauquet, E., Viennot, P., Déqué, M., Gascoïn, S., Hachour, A., Martin, E., Oudin, L., Terray, L., Thiéry, D. (2010). Climate change impacts on water resources and hydrological extremes in northern France. XVIII International Conference on Water Resources CMWR, Barcelona.
16. Chauveau, M., Chazot, S., Perrin, C., Bourgin, P.Y., Sauquet, E., et al. (2013). Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? *La Houille Blanche – Revue internationale de l'eau*, EDP Sciences, 5-15 pp.
17. Leta, O.T. & Bauwens, W. (2018). Assessment of the Impact of Climate Change on Daily Extreme Peak and Low Flows of Zenne Basin in Belgium. *Hydrology*, 5, 38.
18. Roudier, P., Andersson, J.C.M., Donnelly, C., Feyen, L., Greuell, W. et al. (2016). Projections of future floods and hydrological droughts in Europe under a +2°C global warming. *Climatic Change*, Springer Verlag, 135(2), 341-355 pp.

2.2 Note de présentation du scénario de réduction des surfaces en herbe à horizon 2050 (« herb »)

Contexte

Le programme EVAPORE a pour objectif d'évaluer l'efficacité des actions menées depuis 2000 pour réduire les impacts du ruissellement et de l'érosion des sols à l'échelle du territoire Seine aval. Il prévoit également d'étudier leur efficacité future dans un contexte changeant, notamment du point de vue de l'occupation du sol. L'horizon temporel retenu est 2050, car il est suffisamment éloigné pour impliquer des changements significatifs, et suffisamment proche pour être pris en compte dans les politiques d'aménagement.

Pour cela, l'équipe projet prévoit de modéliser les ruissellements sur les versants (*WaterSed*) et les enveloppes d'inondations (*modèle DHI*) sur les deux bassins versants pilotes (Lézarde, Austreberthe). Ces modélisations serviront de base à une analyse coûts bénéfiques. Dans un premier temps, la modélisation portera sur 2 scénarios de base : avec et sans aménagements, toutes choses étant égales par ailleurs.

Dans un deuxième temps, plusieurs scénarios prospectifs seront modélisés, afin d'évaluer l'efficacité des aménagements actuels en situation future. Chaque scénario prospectif portera sur l'évolution d'un seul paramètre. L'objectif ici est de réaliser un état des lieux de l'évolution des surfaces en herbe sur les territoires d'étude afin de fixer le cadrage du scénario prospectif de **réduction des surfaces en herbe au profit des cultures**. Ce scénario exclut la réduction des surfaces en herbes liées à l'urbanisation : nous faisons l'hypothèse que celle-ci est systématiquement compensée.

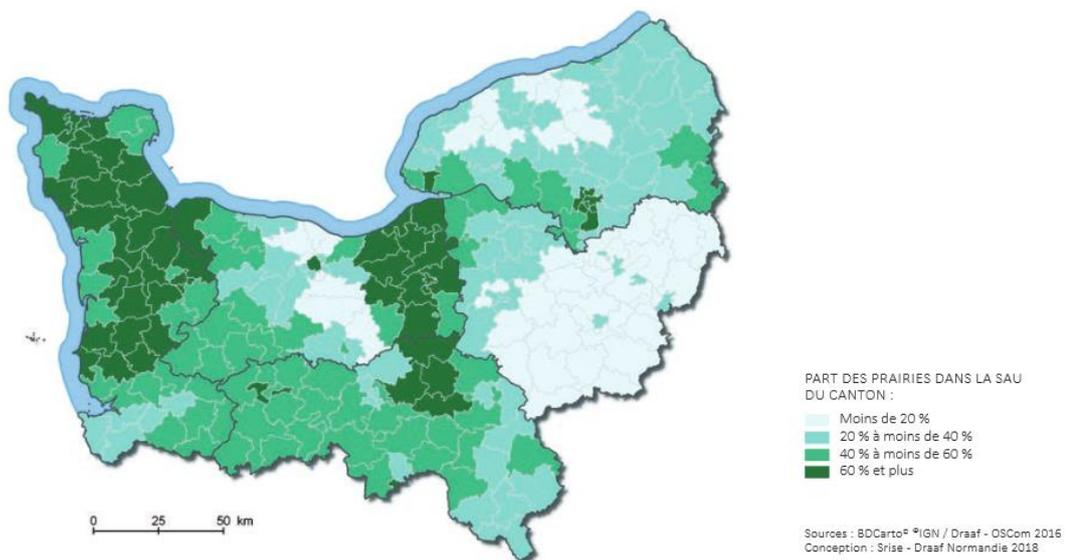


Figure 1 : Part des prairies dans la SAU du canton à l'échelle de la Normandie en 2016.

Part des prairies dans la SAU du canton à l'échelle de la Normandie en 2016

Bilan pour le BV de la Lézarde

Le croisement de la carte d'occupation du sol (OScom 2016) avec la topographie montre que 95 % des prairies du bassin versant présentent des pentes inférieures à 20 %. Le critère pente n'est donc pas suffisant pour élaborer un scénario d'évolution à horizon 2050 (hypothèse 1).

En nous basant les surfaces en herbe converties en cultures à l'échelle du pays de Caux sur la période 1970 – 2010 (données RGA – DRAAF), nous proposons de retenir le scénario d'une **réduction de près d'1/3 de la surface en herbe sur le bassin versant pilote de la Lézarde à horizon 2050** (hypothèse 2).

Nous proposons de conserver les prairies protégées par le règlement du PPRi (« zones roses ») et celles destinées à être urbanisées (dans les documents d'urbanisme des communes de l'ex Codah), en se basant sur la couche d'occupation du sol « Oskom 2016 » et du RPG 2016.

En dehors de ces zones, nous proposons de ne conserver les surfaces en herbe que là où les pentes sont les plus élevées, et donc où les contraintes de mise en culture sont les plus fortes. Cela correspondrait à un seuil de pente d'environ 12% (à préciser), d'après les résultats présentés dans la première partie.

Une analyse de sensibilité sera menée avant modélisation, pour évaluer l'effet d'une variation de la surface en herbe future sur les paramètres hydrologiques des modèles. Il apparaît que le CN est peu sensible à la variation de la surface en herbe, notamment car le CN des cultures est plus proche en été du CN des prairies (CN cultures = 68 en été contre 81 en hiver ; CN prairies = 50).

Le CN global passe de 66,5 dans le scénario de base (2016) à 67,2 dans ce scénario.

Hypothèse 1 : toutes les surfaces agricoles en herbe existantes ayant une pente inférieure à 15% en 2017 seront retournées

Hypothèse proposée lors de la réunion d'avancement du 29/4/2019. Par quoi sont-elles remplacées ? Le débat n'est pas tranché au 29/04/19.

Périmètre d'étude

Le bassin versant de la Lézarde tel que défini dans la modélisation DHI (Figure)

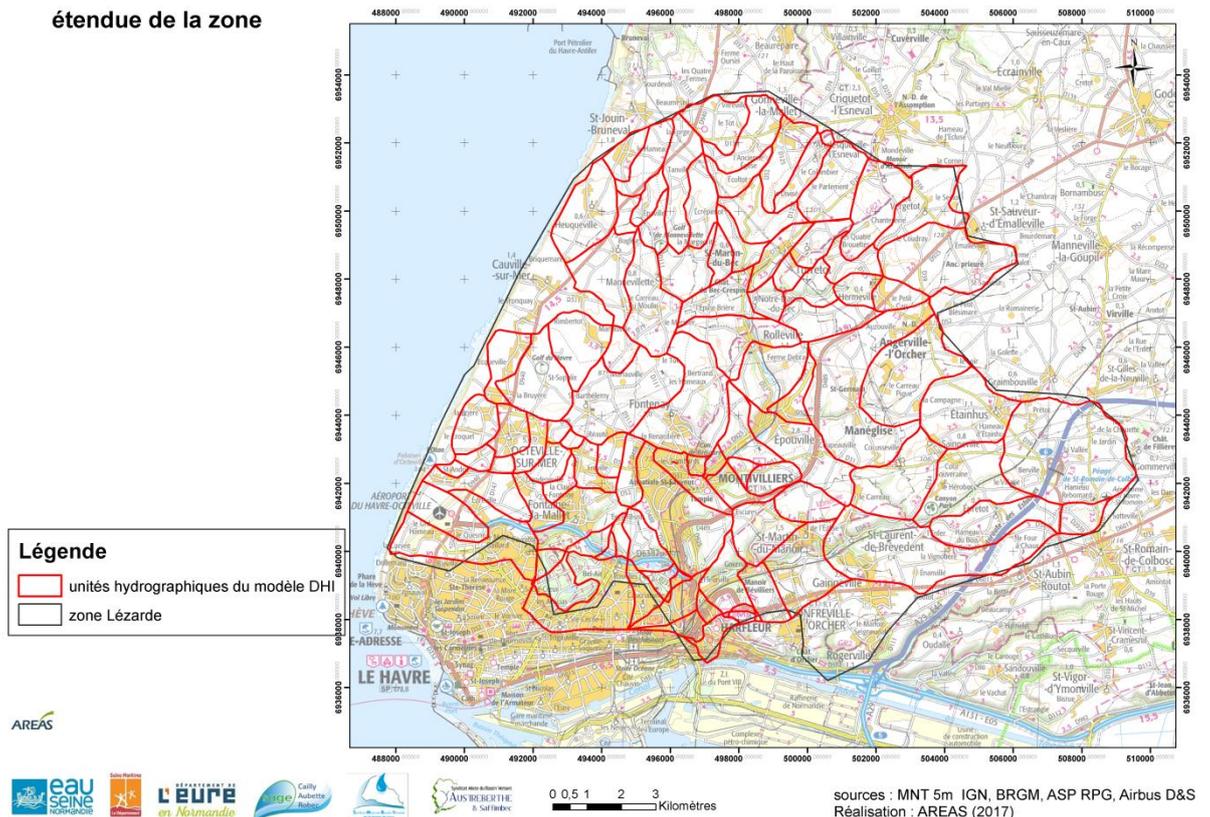


Figure 2 : périmètre étudié

Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Je reprends le MNT préparé dans le cadre du suivi des surfaces en herbe.

- Source : RGE ALTI 5 m de l'IGN, téléchargé en 2016. Raster de valeurs entières
 - Converti en TIN puis rasterisé au format réel au pas de 5 m
 - Puits comblés
- Résultat : un MNT avec des pentes réalistes, sans effet de terrasse (voir le rapport de Louis Yembi)

Les pentes sont calculées à partir du MNT comblé, en pourcent.

Simple reclassification à deux classes, et un seuil à 15 %. Le résultat montre peu de pixels isolés.

Choix de la couche d'occupation du sol

Il a été retenu d'utiliser l'OSCOM millésime 2016 dans le cadre de la modélisation hydrologique/hydraulique du bassin versant de la Lézarde par le bureau d'études DHI.

Le fichier de forme présente des géométries invalides. Pour passer ce problème, on passe en raster. Les traitements seront faits à partir de l'OSCOM vecteur rasterisé au pas de 5 m.

Extraction des prairies 2016

Composition de la couche :

- Il semble y avoir un polygone par code et par commune, polygone multipartie bien entendu
- Le code 23 correspond aux prairies
- Le code 20 « terres agricoles mixtes » est absent
- Le code 00 « espaces mixtes » existe. Exemple d'Octeville sur mer :
 - Surface communale : 2103 ha
 - 113,2 ha pour ce polygone « espaces mixtes », dont 33,9 ha en prairie selon la table attributaire,
 - Le polygone des prairies a une surface de 344,7 ha,
 - On a donc environ 10 % des prairies de la commune qui sont là.
- Le code 32 « végétation arbustive et/ou herbacée » correspond assez largement aux alignements d'arbres et aux haies basses. Observations en comparaison OSCOM et photo aérienne : quelques boisements de versants sont également codés ainsi.
- D'après les observations en comparaison avec les photos aériennes, les surfaces en herbe non agricole sont correctement renseignées, codées en 14.

Dans l'ensemble, les « espaces mixtes » couvrent des chemins de plaine, des corps de ferme, de l'habitat peu dense en hameaux, etc. , parfois une parcelle agricole (labourée ou prairie).

Pour les prairies qui sont ceintes par des haies, la surface de la haie (vue du ciel) est supprimée de la parcelle, et codée 32. Pourtant, si la prairie saute, la haie sautera aussi...

Propositions :

- Négliger les surfaces en herbe incluses dans le code 00, elles correspondent largement aux prairies des corps de ferme, aux chemins de plaine, etc.
- Laisser de côté la question de la surface des haies, nous n'avons pas le temps de le traiter.
- Ne pas tenir compte du code 32 pour cette analyse.

Bilan : on assimile les prairies agricoles aux seuls polygones codés 23.

Préparation de l'occupation du sol 2050

Les zones urbanisées, les bois, eaux continentales, les terres arables et les cultures permanentes de 2016 sont reportées à l'identique en 2050. Seules les surfaces en prairies de 2016 sont susceptibles d'évoluer.

Les prairies de 2050

Décision prise en groupe de travail le 04/04/2019. Pour planifier la localisation des prairies de 2050, les hypothèses suivantes sont utilisées :

- les prairies de 2050 étaient déjà en prairie en 2016 ;
- le règlement du PPRN de la Lézarde est respecté : les prairies en « zone rose » sont maintenues ;
- seules les prairies dont la pente est trop forte pour permettre le labour sont maintenues en herbe.

Choix du seuil de pente

Observations dans la Somme

Dans l'ouest de la Somme, l'élevage a disparu, ne subsiste que 8 % de prairies dans la SAU. Ces prairies sont localisées sur les pentes les plus fortes, là où le tracteur ne saurait passer avec une charrue.

Les structures et orientations agricoles étaient pourtant proches de celles du pays de Caux. Le climat et la pédologie sont également comparables. Cette partie de la Somme peut donc être considérée comme un modèle pour l'évolution future de l'agriculture du pays de Caux.

Observations en pays de Caux

Une prairie sur un coteau exposé vers l'ouest près de Barville (commune de Cany-Barville) a été labourée vers 2015, et est cultivée en culture annuelle depuis. Elle présente des secteurs avec des pentes supérieures à 20 %.

Sur divers secteurs du pays de Caux, des parcelles sont en labour avec des pentes jusqu'à 20 %.

Diagramme des pentes selon l'occupation du sol de 2016 sur la Lézarde

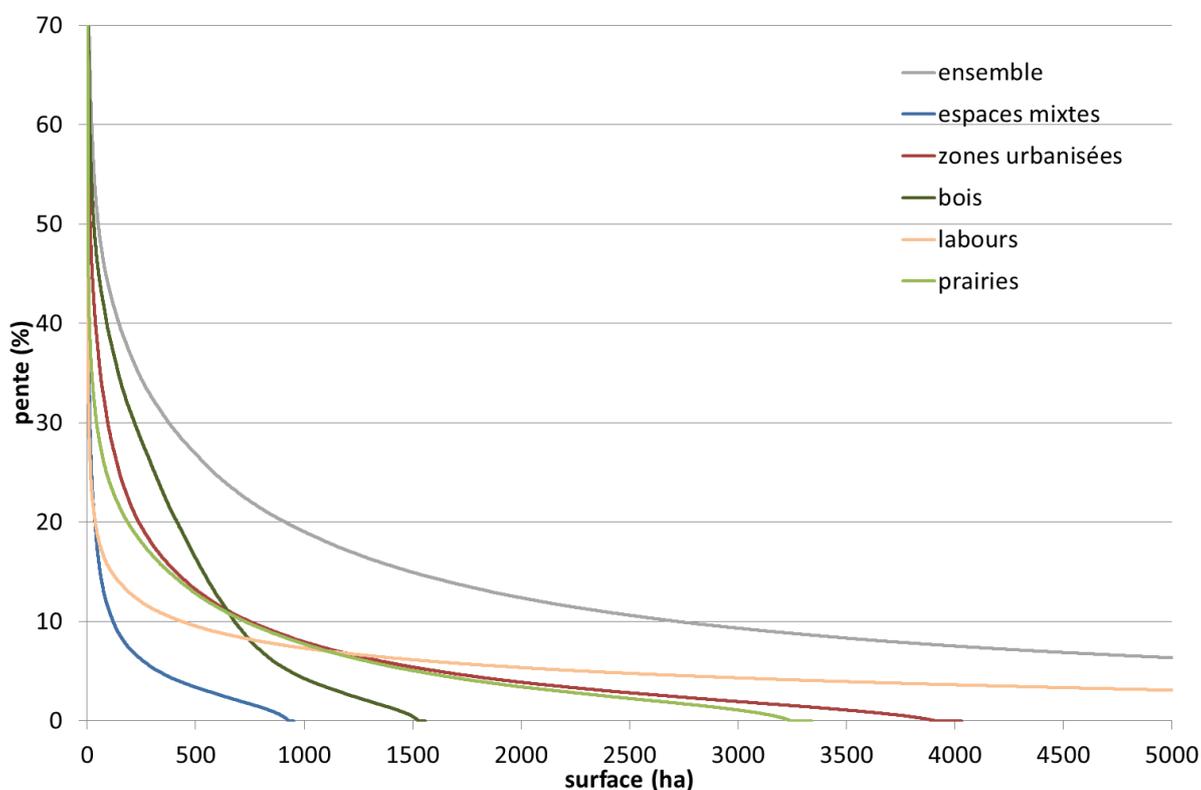


Figure 3 : diagrammes de pentes par occupation du sol sur le périmètre de l'étude DHI, pente décroissante selon la surface cumulée

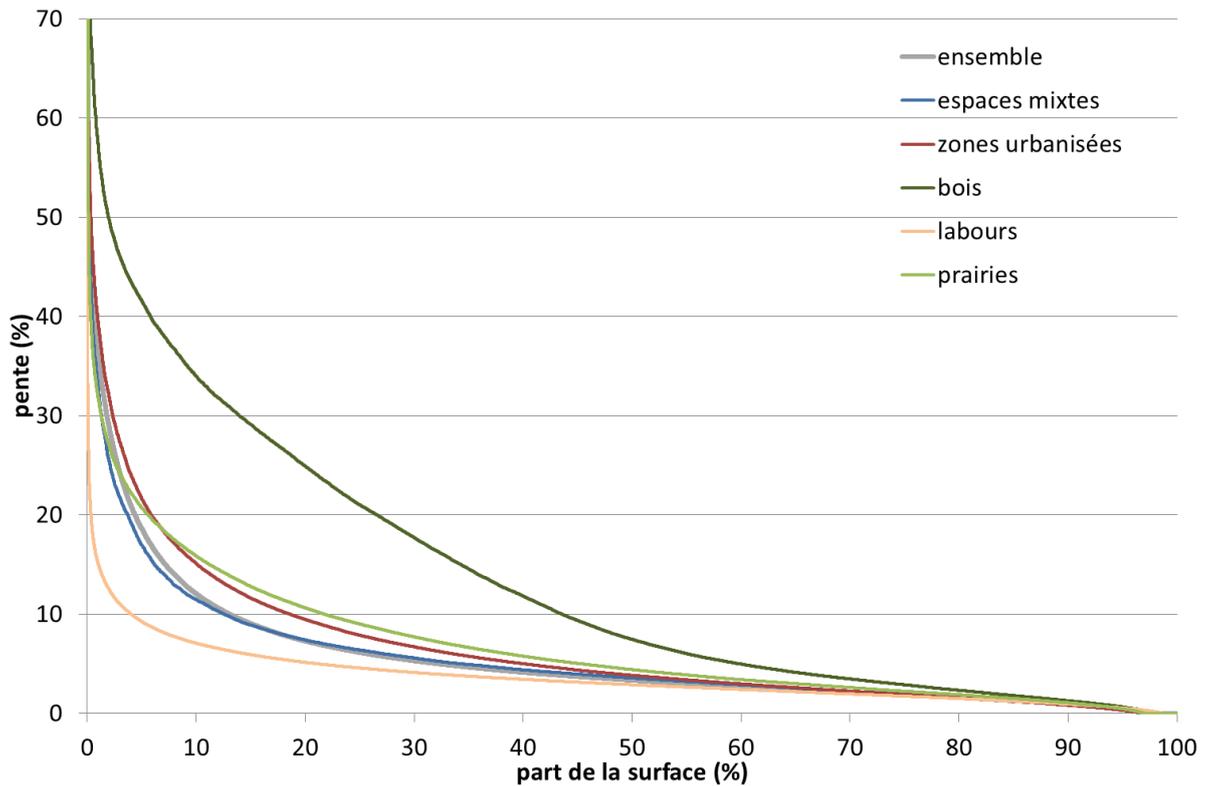


Figure 4 : diagrammes de pentes par occupation du sol sur le périmètre de l'étude DHI, pente décroissantes selon la surface cumulée ramenée à la surface totale de l'occupation du sol concernée

La figure 3 confirme les observations éparées dans le pays de Caux : sur le bassin versant de la Lézarde, 99,7 % des surfaces en cultures annuelles présentent une pente inférieure à 20 %. Cela signifie qu'il est presque impossible de cultiver une parcelle dont la pente est supérieure à 20%.

Par ailleurs, 94,4 % des prairies du bassin versant présentent des pentes inférieures à 20 %. Seuls 186 ha de prairies sont sur des pentes plus fortes. Cela signifie qu'il est techniquement possible de convertir presque toutes les prairies du BV de la Lézarde en cultures.

La pente n'est donc pas réellement un critère discriminant pour la mise en culture des prairies sur le bassin versant de la Lézarde.

Dans un scénario extrême, toutes les prairies du bassin versant pourraient être retournées. Ce scénario ne semble cependant pas très réaliste, car il est probable qu'au moins une part de l'élevage perdure sur ce territoire.

Hypothèse 2 : la surface en herbe suivra jusqu'en 2050 la tendance observée sur les décennies passées

Évolution passée des surfaces en herbe

A l'échelle de l'ex Haute-Normandie

Les statistiques agricoles montrent une diminution sur le long terme de la superficie toujours en herbe (STH) en Haute-Normandie :

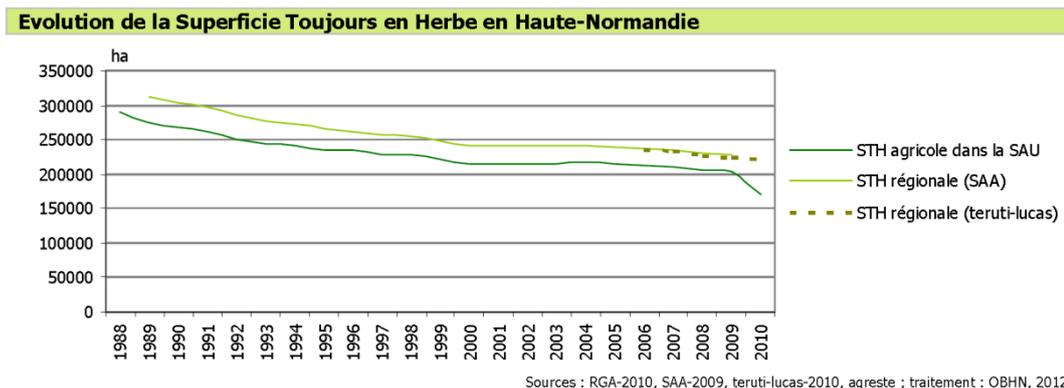


Figure 5 : Evolution de la surface en herbe en Haute-Normandie de 1988 à 2010 (source : OHBN, données RGA – DRAAF Normandie).

La diminution des surfaces en herbe est majoritairement liée à l'augmentation des surfaces cultivées, et dans une moindre mesure à l'urbanisation.

Evolution de l'occupation du sol entre 1992 et 2004 (Source Teruti)

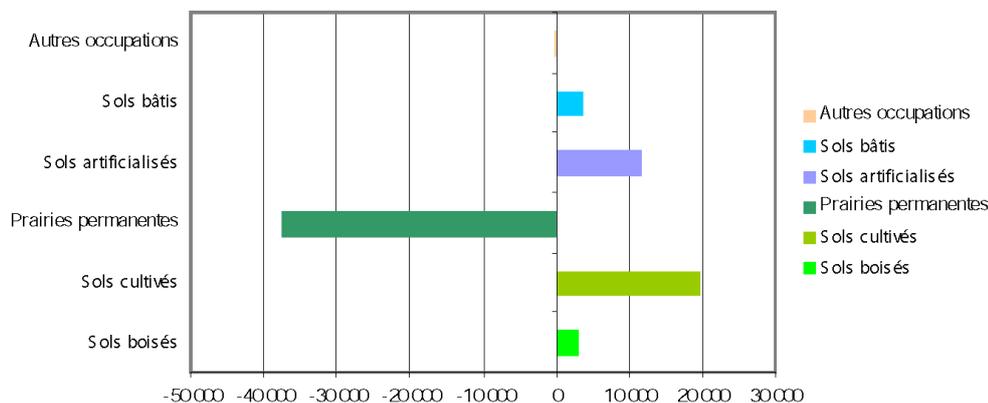


Figure 6 : Evolution de l'occupation du sol entre 1992 et 2004 (Source Teruti – Agreste 2010).

A l'échelle de la Seine-Maritime

La surface en herbe a diminué de moitié en 40 ans en Seine-Maritime. Cette diminution est continue de 1970 à 2010, même s'il semble qu'elle est moins rapide sur la période 2000 – 2010.

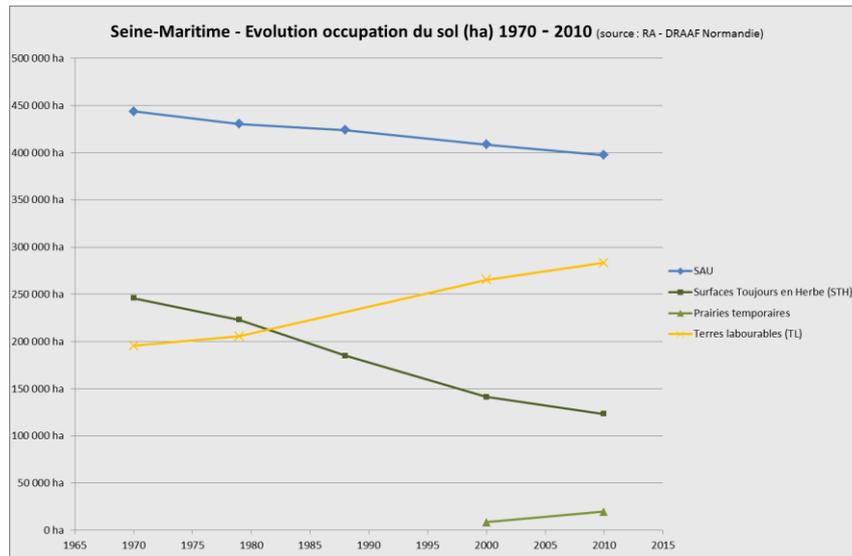


Figure 7 : Evolution de l'occupation du sol agricole en Seine-Maritime de 1970 à 2010 (source : RA – DRAAF Normandie).

En moyenne annuelle, la surface en prairie a diminué de 3 100 ha/an en Seine-Maritime, alors que la SAU a diminué de 1 200 ha/an. En faisant l'hypothèse que la réduction de la SAU est liée uniquement à l'urbanisation au détriment des prairies, le rythme moyen de conversion des prairies en cultures est au minimum de 1 900 ha/an de 1970 à 2010.

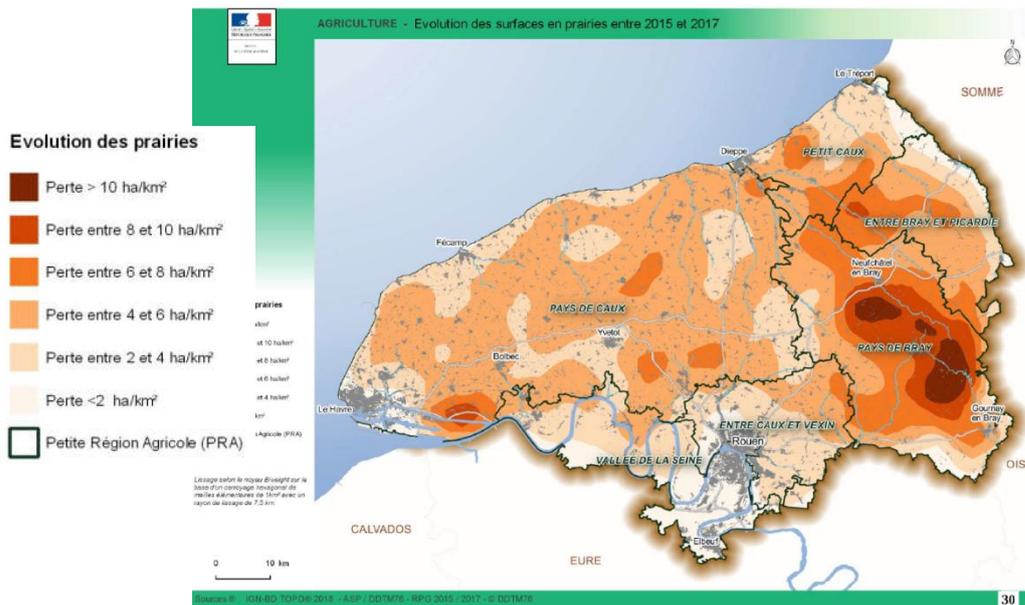


Figure 8 : Evolution des surfaces en prairies entre 2015 et 2017 (source : DDTM76).

La carte ci-dessus montre que la réduction des surfaces en prairies s'est nettement accélérée ces dernières années avec la disparition des quotas laitiers.

A titre de référence, sur la période 1970 – 2010, la diminution globale des surfaces en herbe sur la Seine-Maritime était en moyenne de 1 ha/km² tous les 2 ans. Or, elle est partout supérieure à 2 ha/km² sur la période 2015 – 2017, voire bien plus dans certains secteurs !

La diminution des surfaces en herbe en Seine-Maritime, constatée depuis au moins 50 ans, fait suite à une période d'augmentation des surfaces en herbe, comme le montrent les statistiques de la Chambre d'Agriculture de Seine-Maritime :

SUPERFICIE ET RÉPARTITION DU TERRITOIRE

	1929	1938	1945	1952
Terres labourables	280.900	261.259	231.099	229.189
Surfaces toujours couvertes d'herbe	177.509	194.410	198.558	222.688
Bois et forêts	81.556	92.444	91.970	93.514
Cultures maraîchères et potagères	5.448	6.910	10.517	5.540
Territoire agricole non cultivé	11.508	11.484	28.083	10.683
Divers et territoire non agricole cadastré	60.681	51.095	57.375	55.988
Superficie totale cadastrée	617.602	617.602	617.602	617.602

Figure 9 : Evolution de l'occupation du sol (en ha) en Seine-Maritime de 1929 à 1952. (source : Chambre d'Agriculture de la Seine-Maritime. II. - L'Agriculture dans la Seine-Maritime. In: Études Normandes, 1955)

Le commentaire indique que « ce tableau marque nettement la diminution des terres labourables au profit des surfaces toujours couvertes en herbe. Cette évolution est plus sensible à chaque crise agricole, mais elle n'en demeure pas moins constante depuis la fin du XIXe siècle. D'une part, toute crise agricole pousse les agriculteurs à réduire les frais de culture, de matériel et de main-d'œuvre et les oriente vers la production de l'herbe, plus économique ; d'autre part, les méthodes de culture moderne exigent plus de matériel et toujours plus de capitaux. Les agriculteurs réduisent leurs terres labourables pour en tirer un meilleur rendement à l'hectare et consacrent des superficies plus importantes à la production qui exige le plus faible investissement, celle de l'herbe. »

A l'origine, plusieurs sources évoquent la baisse du prix de certains produits agricoles à la fin du XIXe siècle sous l'effet de la concurrence mondiale permise par le développement des transports (voies ferrées, bateaux à vapeur) : le blé, dont le prix a baissé en France de plus de 20% entre 1880 et 1895 (Mazoyer et Roudart, Histoire des agricultures du monde, 2002), soumis à la concurrence internationale, notamment américaine, mais aussi le colza (concurrence du pétrole et d'autres graines oléagineuses telles que l'arachide), le lin (concurrence du coton et du chanvre). (Risler, 1885, La crise agricole en France et en Angleterre, Revue des 2 mondes).

Plus tôt, dans la première moitié du XIXe siècle, « l'accroissement des surfaces consacrées à l'herbe n'était guère possible, car les besoins en céréales étaient élevés. L'insuffisance de la récolte provoquait encore des disettes. » (L. Hédin, Les conditions d'exploitation de la prairie en Normandie depuis le XIXe siècle, 1951). C'est le remplacement des jachères par des cultures fourragères dans la plupart des régions d'Europe, entre le XVIe et le XIXe siècle, qui a permis l'augmentation de l'élevage herbivore, et donc un accroissement de la fumure animale, entraînant également une forte progression des rendements des céréales (Mazoyer, Roudart, 2002).

Ainsi, « au début du XIXe siècle, les labours occupaient encore dans la quasi-totalité des communes du pays de Caux 76 à 96 % des surfaces, d'après les cartes de M. A. Perpillou (inédites). Au début du XXe siècle, selon la même source, les herbages ne dépassaient 25 % des surfaces que dans une minorité de communes du Caux oriental et partout ailleurs la proportion des labours oscillait autour de 75 %. L'efficacité de la première révolution fourragère permettait au Caux d'être un grand

pays d'élevage en évitant le stade de la révolution herbagère.» (A. Frémont, L'élevage en Normandie, étude géographique, PUC, 1968).

A l'échelle du Pays de Caux

Les 2 bassins versants pilotes, celui de la Lézarde et celui de l'Austreberthe sont situés dans le pays de Caux, qui est une région agricole homogène, caractérisée historiquement par un système de polyculture/élevage, qui tend aujourd'hui vers de la polyculture.

La surface en herbe a également diminué de moitié en 40 ans dans le pays de Caux (périmètre de la Petite Région Agricole). Cette diminution est continue de 1970 à 2010. En 2010, la STH a été recalculée en tenant compte du changement de dénomination d'une partie des prairies permanentes en « prairies temporaires », en lien avec une modification de la réglementation européenne.

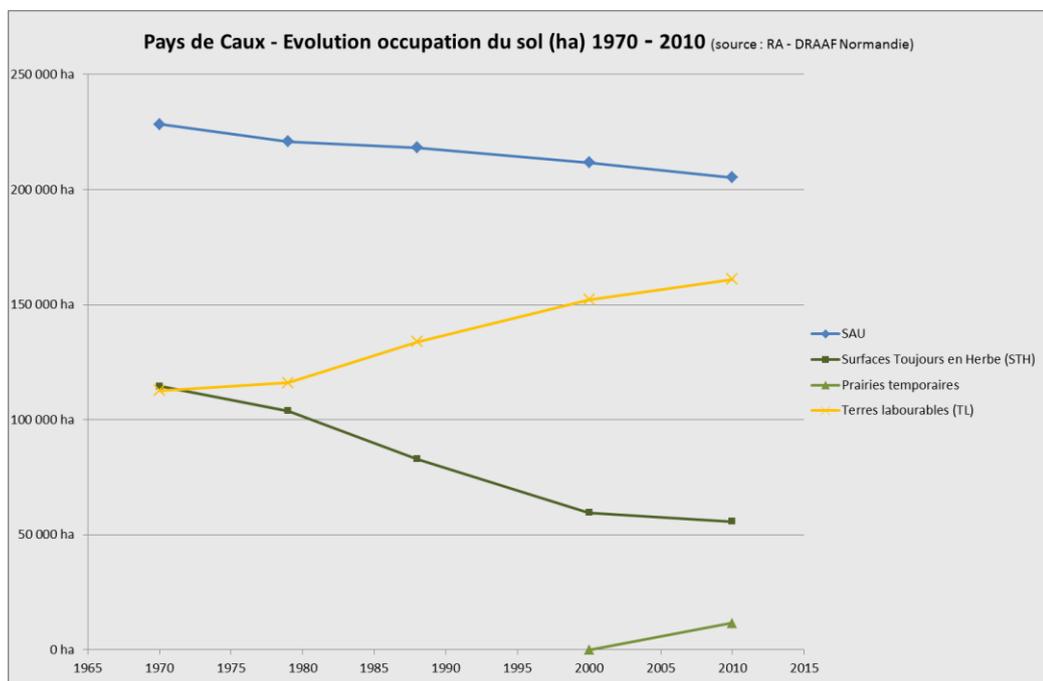


Figure 10 : Evolution de l'occupation du sol agricole dans le Pays de Caux de 1970 à 2010 (source : RA-DRAAF Normandie).

En moyenne annuelle, la surface en prairie a diminué de 1 500 ha/an dans le pays de Caux, alors que la SAU a diminué de 600 ha/an. En faisant l'hypothèse que la réduction de la SAU est liée uniquement à l'urbanisation au détriment des prairies, le rythme moyen de conversion des prairies en cultures est au minimum de 900 ha/an de 1970 à 2010.

Exprimée autrement, la diminution de la surface en herbe représente en moyenne 1,8% /an, rapportée à la STH de l'année précédente.

A l'échelle du bassin versant de la Lézarde

Évolution sur la Lézarde entre 2009 et 2013 : -4 % en quatre ans (figure issue du travail de suivi des surfaces en herbe par l'AREAS sur la période 1990-2014).

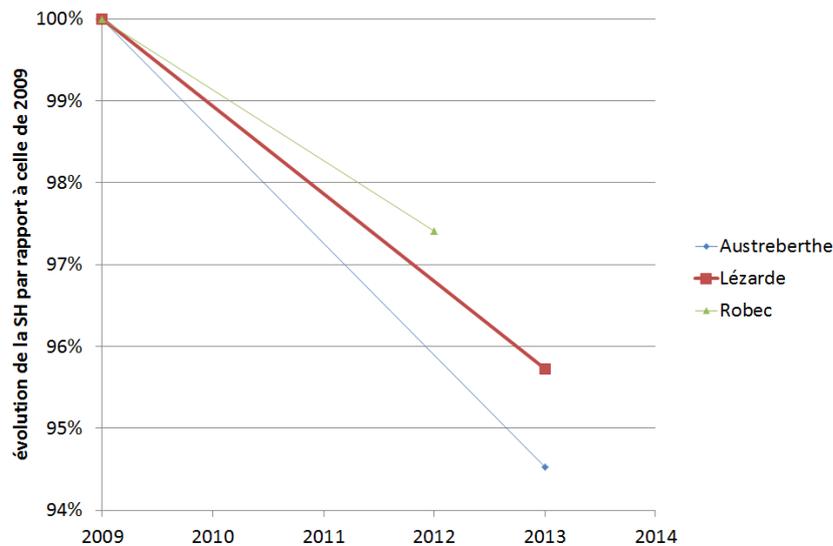


Figure 11 : évolution relative des surfaces en herbe (base : SH en 2009 = 100, source : TRPGTD)

L'observation des évolutions passées montrent deux devenir possibles pour une prairie qui disparaît : la terre arable ou l'urbanisation. Selon l'étude de suivi des surfaces en herbe de la Lézarde, les surfaces en bois sont stables, la SAU diminue au profit des espaces artificialisés (Tableau 1). Au sein de la SAU, la part des prairies diminue dans le temps (Figure 2 et tableau 2).

Tableau 1 : évolution des surfaces (ha) selon une nomenclature en 4 classes, zone Lézarde, source : couches CTD

année	espaces artificialisés	SAU	bois	eau	total
1992	4428	16260	1314	86	22088
2001	4814	15874	1314	86	22088
2009	5005	15685	1312	86	22087
2013	5110	15584	1309	85	22087

Tableau 2 : évolution en hectare des surfaces des principales classes d'occupation des sols entre 2009 et 2013, zone Lézarde, source : TRPGTD

Période	Espaces artificialisés	Labours	Surfaces en herbe	Bois
2009-2013	+105	+79	-177	-4

Pour les chiffres dont on dispose entre 2009 et 2013, les pertes en prairies ont été transformées en labours à environ 45 % et urbanisés à environ 55 %. Sur le bassin versant de la Lézarde. La période d'observation est cependant beaucoup plus courte qu'aux échelles plus larges.

Extrapolation de l'évolution des surfaces en herbe à horizon 2050 sur le Pays de Caux

L'échelle du pays de Caux paraît pertinente pour une projection d'évolution des surfaces en herbe à horizon 2050 :

- la période d'observation (1970 – 2010) des évolutions passées est assez longue,
- le périmètre (2 900 km²) est assez large pour gommer des spécificités locales,
- il s'agit d'une petite région agricole assez homogène du point de vue du contexte géographique et des systèmes d'exploitation.

Comme indiqué ci-dessus, le rythme moyen de conversion des prairies en cultures est **en moyenne de 1,8% de la surface en herbe restante** (STH de l'année précédente) sur la période 1970 – 2010 à l'échelle du pays de Caux.

En extrapolant ces chiffres à horizon 2050, le pays de Caux perdrait la moitié de sa surface en herbe (référence 2010) d'ici 2050, toutes causes confondues.

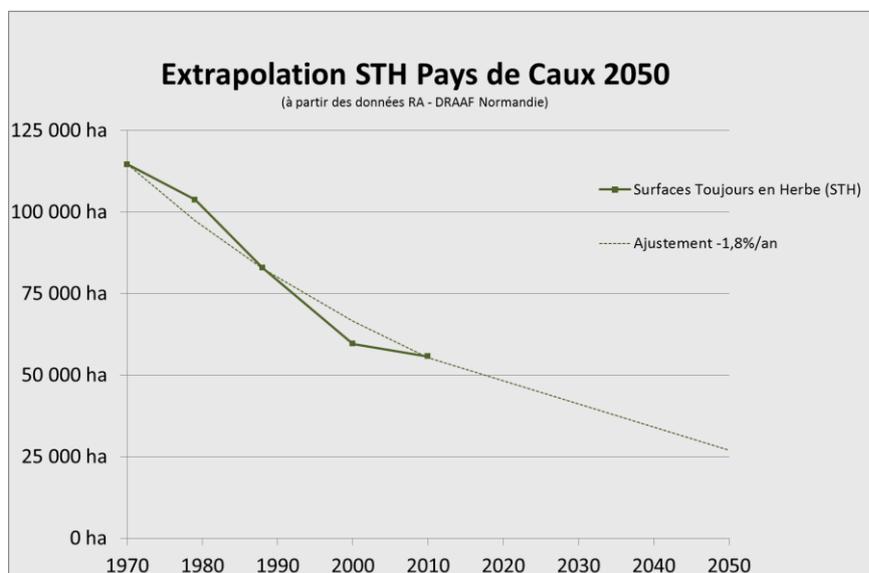


Figure 12 : Extrapolation de la surface en herbe dans le Pays de Caux à l'horizon 2050 (hypothèse de poursuite de la tendance actuelle).

Pendant, comme indiqué précédemment, ce scénario porte exclusivement sur la réduction des surfaces en herbe par mise en culture des prairies. Sur la période 1970 – 2010, en moyenne, la diminution de la surface en herbe dans le Pays de Caux est liée à 60% à la conversion des prairies en cultures, et à 40% à l'urbanisation.

Par extrapolation, **à horizon 2050, en ne tenant compte que de la diminution des surfaces en herbe au profit des cultures, il resterait environ 38 000 ha de prairies dans le pays de Caux, soit 19% de la SAU** (référence 2010), contre 27% environ aujourd'hui.

Evidemment, il ne s'agit que d'une projection, et une modification du contexte économique et/ou réglementaire peut fortement impacter l'évolution des systèmes de culture, comme on l'observe ces dernières années depuis la fin des quotas laitiers. Néanmoins, il s'agit bien d'une tendance lourde observée sur le long terme.

Evolution des surfaces en herbe (STH) et de la SAU à différentes échelles depuis 1970														
Sources : Agreste - Recensements agricoles (RA) ; AREAS ; OSCOM 2016														
	Haute-Normandie			Seine-Maritime				Pays de Caux (PRA)				BV Lézarde (source AREAS)		
Surface totale	12 317 km2			6 278 km2				2 904 km2				212 km2		
Année	SAU	STH	STH/SAU	SAU	TL	STH	STH/SAU	SAU	TL	STH	STH/SAU	SAU	STH	STH/SAU
1970				443 898 ha	195 542 ha	245 800 ha	55%	228 413 ha	112 616 ha	114 561 ha	50%			
1979				430 409 ha	205 371 ha	222 900 ha	52%	220 872 ha	116 025 ha	103 768 ha	47%			
1988	819 700 ha	289 317 ha	35%	424 115 ha		184 726 ha	44%	218 158 ha	133 924 ha	82 800 ha	38%			
2000				408 561 ha	265 328 ha	141 211 ha	35%	211 703 ha	152 172 ha	59 531 ha	28%			
2009	774 500 ha	203 600 ha	26%									15 685 ha	4 194 ha	27%
2010*	774 397 ha	184 172 ha		397 416 ha	283 352 ha	123 192 ha	31%	205 184 ha	161 041 ha	55 734 ha	27%			
2013												15 584 ha	3 965 ha	25%
2016 (Oscocom)						124 145 ha				52 170 ha				
Période	1988 - 2009			1970 - 2010				1970 - 2010				2009 - 2013		
Moy annuelle	-2 200 ha/an	-4 100 ha/an		-1 200 ha/an		-3 100 ha/an		-600 ha/an		-1 500 ha/an		-25 ha/an	-57 ha/an	
%SAU2010/an	-0.3%	-0.5%		-0.3%		-0.8%		-0.3%		-0.7%		-0.2%	-0.4%	
%Stot/an	-0.2%	-0.3%		-0.2%		-0.5%		-0.2%		-0.5%		-0.1%	-0.3%	
%STHn-1/an										-1.8%				
2050 -1,8%/an										26 951 ha			2 025 ha	
Extrapolation 2050 (Retournement de prairies seul)**								205 184 ha		38 464 ha	19%	15 584 ha	2 801 ha	18%
Année référence										2010			2013	
* une part des prairies permanentes a été définie comme prairies temporaires en 2010 du fait des évolutions réglementaires. Les chiffres STH ont été reconstitués en intégrant une part de "prairies temporaires".														
**extrapolation de la surface en herbe en 2050 en ne tenant compte que de la réduction liée à la conversion des prairies en cultures (donc hors urbanisation), à SAU constante														

2.3 Description des sous-bassins versants et des ouvrages du modèle hydrologique-hydraulique d'inondation par débordement de rivière

	lib_BV	code_BV	area_ha	id_bv	Bois CN=43	S Bois km2	Prairies CN = 50	S Prairies km2	Cultures CN = 68	Zones urbanisées	CN	Tc	pente_m_m	pt_injection
1	Coupeauville	CPV	171	1	3%	5%	7%	13%	74%	15%	69	1.90	1.300	BV L3
2	Coupeauville	CPV	215	2	5%	10%	28%	59%	32%	34%	69	0.82	3.000	BV L3
3	Bois Caulot	CUR	270	2	1%	3%	14%	38%	77%	8%	67	2.57	0.006	BV L7
4	Cavee Rouge	CUR	91	3	1%	1%	12%	11%	82%	5%	67	1.11	0.010	BV L7
5	Chemin du Golf	CUR	343	1	6%	21%	8%	28%	65%	21%	69	3.24	0.006	BV L7
6	Clinardiere	CUR	30	6	6%	2%	19%	6%	3%	72%	77	0.46	0.016	BV L6
7	Fontenay amont	CUR	576	4	4%	21%	18%	102%	70%	9%	66	1.91	0.013	BV L7
8	Fontenay aval	CUR	583	5	7%	38%	21%	121%	53%	19%	67	1.92	0.021	BV L6
9	Lezarde	LEZ	188	BV CALOIS	8%	16%	25%	47%	47%	18%	66	1.18	0.040	BV CALOIS
10	Lezarde	LEZ	144	BV DIREN	3%	4%	13%	19%	19%	65%	77	0.54	0.052	BV DIREN
11	Lezarde	LEZ	295	BV EPOUVIL	15%	44%	23%	67%	45%	16%	64	0.84	0.048	BV EPOUVIL
12	Lezarde	LEZ	71	BV Ex 0	9%	6%	11%	8%	0%	79%	79	0.59	0.046	BV Ex 0
13	Lezarde	LEZ	110	BV Ex	8%	9%	11%	12%	3%	74%	80	0.31	0.075	BV Ex
14	Lezarde	LEZ	154	BV GOURNAY	11%	16%	12%	18%	24%	53%	74	0.69	0.053	BV GOURNAY
15	Lezarde	LEZ	208	BV L1	10%	20%	20%	41%	54%	15%	66	1.54	0.026	BV L1
16	Lezarde	LEZ	376	BV L12	8%	31%	23%	87%	41%	28%	67	1.33	0.034	BV L12
17	Lezarde	LEZ	715	BV L14	28%	200%	11%	80%	5%	55%	70	2.09	0.019	BV L14
18	Lezarde	LEZ	319	BV L2	8%	25%	21%	68%	57%	13%	65	1.38	0.031	BV L2
19	Lezarde	LEZ	36	BV L4	9%	3%	12%	4%	19%	60%	75	0.30	0.070	BV L4
20	Lezarde	LEZ	113	BV L5	6%	7%	20%	22%	26%	46%	72	1.09	0.035	BV L5
21	Lezarde	LEZ	545	BV L8	12%	64%	13%	71%	25%	50%	72	2.18	0.020	BV L8
22	Lezarde	LEZ	139	BV L9	7%	10%	15%	21%	2%	75%	77	0.78	0.037	BV L9
23	Lezarde	LEZ	321	BV R Ex	19%	62%	12%	38%	26%	40%	69	1.04	0.037	BV R Ex
24	Lezarde	LEZ	242	BV SL Ex	23%	56%	19%	46%	14%	43%	67	0.89	0.047	BV SL Ex
25	Lezarde Nord A	LNA	350	10	2%	5%	22%	75%	63%	14%	66	1.90	0.015	BV L1 a
26	Lezarde Nord A	LNA	312	11	2%	5%	17%	53%	71%	11%	67	2.63	0.010	BV L1 a
27	Lezarde Nord A	LNA	366	13	3%	10%	16%	59%	71%	11%	66	3.26	0.011	BV L1 a
28	Lezarde Nord A	LNA	88	14	2%	2%	11%	9%	78%	9%	67	1.46	0.021	BV L1 a
29	Lezarde Nord A	LNA	270	15	7%	18%	24%	64%	61%	9%	63	3.38	0.016	BV L1 a
30	Lezarde Nord A	LNA	185	16	7%	13%	21%	38%	65%	8%	63	2.08	0.021	BV L1 a
31	Lezarde Nord A	LNA	212	17	3%	5%	37%	79%	48%	12%	63	1.97	0.017	BV L1 a
32	Lezarde Nord A	LNA	82	18	8%	7%	35%	29%	49%	8%	61	1.25	0.028	BV L1 a
33	Lezarde Nord A	LNA	103	20	4%	4%	16%	16%	65%	16%	67	1.60	0.016	BV L1 a
34	Lezarde Nord A	LNA	167	21	4%	7%	8%	13%	78%	10%	68	1.93	0.017	BV L1 a
35	Lezarde Nord A	LNA	83	22	5%	4%	20%	16%	64%	11%	65	1.80	0.015	BV L1 a
36	Lezarde Nord A	LNA	62	23	7%	4%	33%	20%	46%	14%	63	1.62	0.014	BV L1 a

	lib_BV	code_BV	area_ha	id_bv	Bois CN=43	S Bois km2	Prairies CN = 50	S Prairies km2	Cultures CN = 68	Zones urbanisées	CN	Tc	pente_m_m	pt_injection
37	Lezarde Nord B	LNB	213	1	4%	9%	15%	32%	71%	9%	66	1.79	0.014	BV L1 b
38	Lezarde Nord B	LNB	236	2	4%	10%	23%	54%	60%	13%	65	2.39	0.014	BV L1 b
39	Lezarde Nord B	LNB	116	3	8%	9%	14%	17%	71%	7%	64	1.34	0.023	BV L1 b
40	Lezarde Nord B	LNB	215	4	4%	9%	23%	48%	55%	18%	66	2.39	0.016	BV L1 b
41	Lezarde Nord B	LNB	14	5	3%	0%	24%	3%	59%	11%	65	0.44	0.019	BV L1 b
42	Lezarde Nord B	LNB	136	6	5%	7%	28%	38%	49%	18%	65	2.10	0.018	BV L1 b
43	Lezarde Nord B	LNB	302	7	3%	8%	13%	39%	77%	7%	66	2.59	0.013	BV L1 b
44	Lezarde Nord B	LNB	228	8	6%	15%	35%	80%	52%	6%	61	1.68	0.023	BV L1 b
45	Lezarde Nord B	LNB	113	9	9%	10%	32%	36%	47%	12%	62	1.88	0.019	BV L1 b
46	Lezarde Nord C	LNC	311	10	11%	33%	18%	55%	64%	8%	63	3.49	0.011	BV L1 c
47	Lezarde Nord C	LNC	122	11	7%	8%	29%	35%	53%	12%	63	1.47	0.023	BV L1 c
48	Lezarde Nord C	LNC	122	12	23%	28%	18%	22%	51%	8%	60	0.94	0.033	BV L1 c
49	Lezarde Nord C	LNC	86	13	15%	13%	27%	23%	44%	14%	62	0.66	0.046	BV L1 c
50	Lezarde Nord C	LNC	566	20	4%	22%	16%	92%	70%	10%	66	3.87	0.010	BV L1 c
51	Lezarde Nord C	LNC	109	30	5%	5%	20%	22%	59%	16%	66	1.56	0.012	BV L1 c
52	Lezarde Nord C	LNC	101	31	9%	9%	21%	21%	60%	10%	63	1.25	0.024	BV L1 c
53	Lezarde Nord C	LNC	335	40	4%	14%	18%	60%	72%	5%	64	3.33	0.010	BV L1 c
54	Lezarde Nord C	LNC	230	50	5%	11%	28%	64%	60%	7%	63	2.11	0.021	BV L1 c
55	Lezarde Nord C	LNC	137	60	2%	3%	28%	39%	43%	27%	67	1.49	0.020	BV L1 c
56	Lezarde Nord C	LNC	67	61	17%	11%	11%	7%	62%	10%	63	0.97	0.030	BV L1 c
57	Lezarde Nord C	LNC	133	70	5%	7%	11%	15%	58%	26%	69	1.78	0.020	BV L1 c
58	Lezarde Nord D	LND	549	1	4%	24%	25%	135%	58%	13%	65	2.39	0.014	BV MANEGLISE
59	Lezarde Nord D	LND	880	2	5%	48%	23%	202%	57%	15%	65	2.98	0.016	BV MANEGLISE
60	Lezarde Nord D	LND	111	3	4%	4%	16%	17%	45%	35%	71	1.03	0.031	BV MANEGLISE
61	Rouelles	ROU	171	1	1%	2%	14%	24%	60%	24%	70	1.49	0.014	BV L13 c
62	Rouelles	ROU	57	2	1%	1%	13%	7%	64%	22%	69	1.08	0.014	BV L13 c
63	Rouelles	ROU	133	3	2%	2%	17%	23%	34%	47%	73	1.38	0.013	BV L13 c
64	Rouelles	ROU	32	4	2%	1%	4%	1%	65%	25%	72	0.70	0.015	BV L13 c
65	Rouelles	ROU	98	5	2%	2%	8%	7%	55%	33%	73	1.06	0.017	BV L13 c
66	Rouelles	ROU	37	6	3%	1%	14%	5%	51%	30%	71	0.62	0.015	BV L13 c
67	Rouelles	ROU	25	7	2%	1%	4%	1%	81%	12%	69	0.45	0.021	BV L13 c
68	Rouelles	ROU	94	8	2%	2%	16%	15%	68%	13%	67	1.09	0.021	BV L13 c
69	Rouelles	ROU	62	9	1%	1%	31%	19%	66%	2%	62	0.73	0.035	BV L13 c
70	Rouelles	ROU	85	10	4%	4%	18%	15%	58%	19%	67	1.69	0.010	BV L13 c
71	Rouelles	ROU	112	11	5%	5%	27%	30%	47%	21%	66	1.03	0.029	BV L13 c
72	Rouelles	ROU	114	12	1%	1%	7%	8%	59%	33%	72	1.86	0.012	BV L13 d
73	Rouelles	ROU	75	13	25%	19%	24%	18%	8%	40%	63	2.21	0.036	BV L13 d
74	Rouelles	ROU	27	21	1%	0%	5%	1%	81%	11%	69	1.05	0.009	BV L13 a
75	Rouelles	ROU	224	22	2%	4%	14%	31%	61%	23%	69	3.57	0.008	BV L13 a

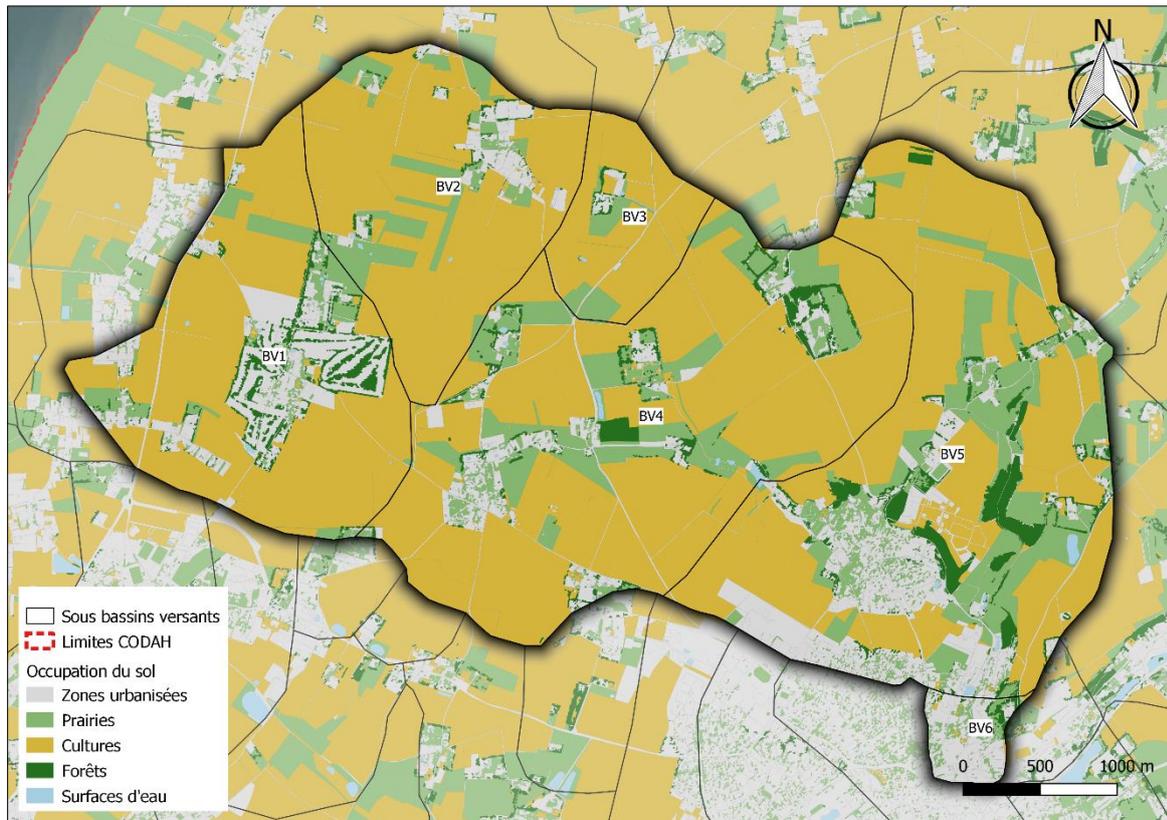
	lib_BV	code_BV	area_ha	id_bv	Bois CN=43	S Bois km2	Prairies CN = 50	S Prairies km2	Cultures CN = 68	Zones urbanisées	CN	Tc	pente_m_m	pt_injection
76	Rouelles	ROU	125	23	3%	4%	25%	32%	43%	27%	68	1.55	0.019	BV L13 a
77	Rouelles	ROU	133	24	25%	33%	30%	40%	10%	35%	63	2.21	0.020	BV L13 d
78	Rouelles	ROU	221	31	1%	2%	23%	52%	42%	33%	70	2.42	0.010	BV L13 b
79	Rouelles	ROU	491	32	3%	16%	20%	99%	21%	55%	74	3.36	0.010	BV L13 b
80	Rouelles	ROU	119	33	53%	63%	2%	3%	0%	45%	63	2.21	0.026	BV L13 b
81	Saint Laurent	STL	959	10	5%	44%	14%	136%	62%	19%	67	1.58	0.014	BV L11
82	Saint Laurent	STL	437	11	12%	51%	18%	80%	59%	11%	63	1.26	0.014	BV L11
83	Saint Laurent	STL	909	12	13%	115%	25%	227%	47%	15%	63	1.82	0.013	BV L11
84	Saint Laurent	STL	108	20	6%	6%	18%	19%	58%	17%	66	1.25	0.017	BV L11
85	Saint Laurent	STL	343	21	5%	17%	18%	63%	59%	17%	66	0.69	0.015	BV L11
86	Saint Laurent	STL	463	30	5%	21%	16%	75%	66%	13%	66	0.49	0.021	BV L11
87	Saint Laurent	STL	430	31	7%	32%	19%	81%	63%	11%	64	1.16	0.021	BV L11
88	Saint Laurent	STL	173	40	4%	7%	6%	10%	81%	9%	67	0.63	0.035	BV L10
89	Saint Laurent	STL	246	41	14%	34%	18%	44%	53%	15%	64	1.84	0.010	BV L10
90	Vallee Lezarde	VAL	111	1	4%	5%	8%	9%	73%	14%	68	0.91	0.030	BV Calois 2
91	Vallee Lezarde	VAL	40	2	8%	3%	33%	13%	46%	12%	62	0.65	0.056	BV Calois 2
			20 620											

Coupeauville



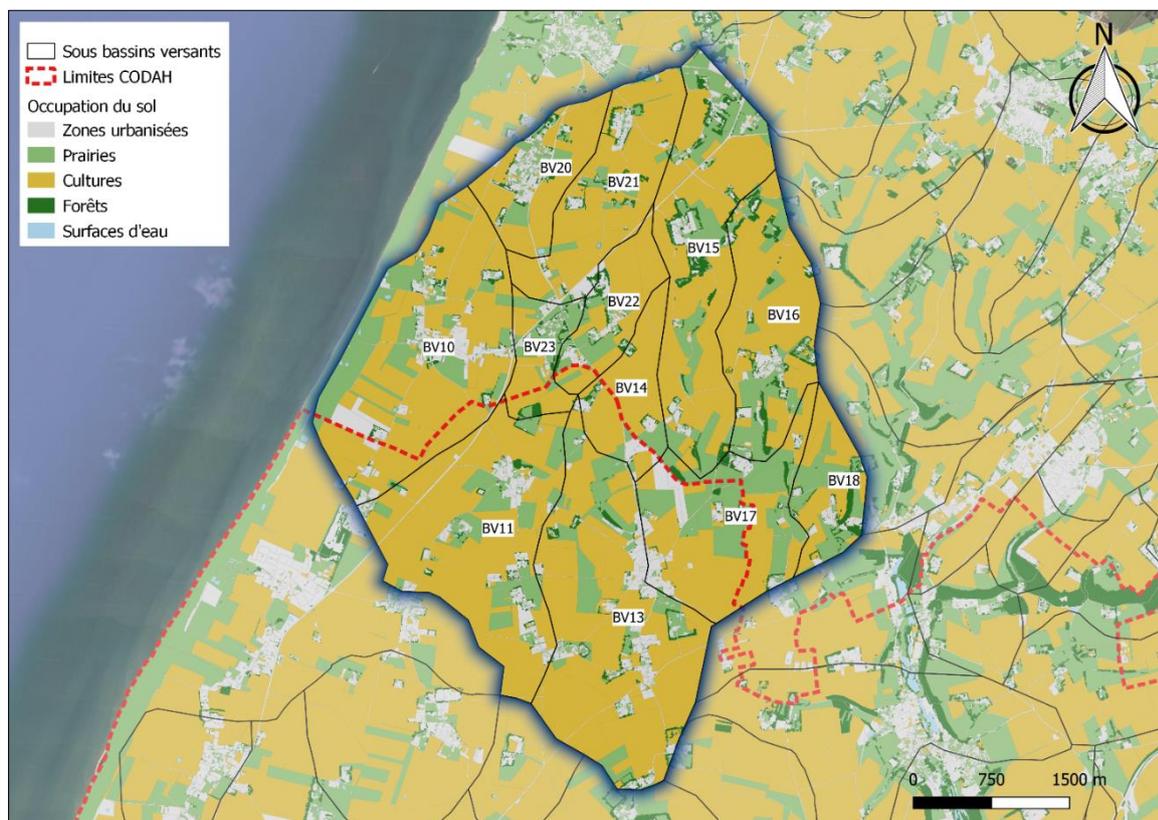
Type	Bois	Prairies	Cultures	Zones urbanisées	Plans d'eau	Moyenne pondérée
CN	43	50	68	87	100	
BV1	3.2%	7.4%	73.8%	15.2%	0.4%	69
BV2	4.6%	27.7%	32.3%	33.6%	1.7%	69

Curande



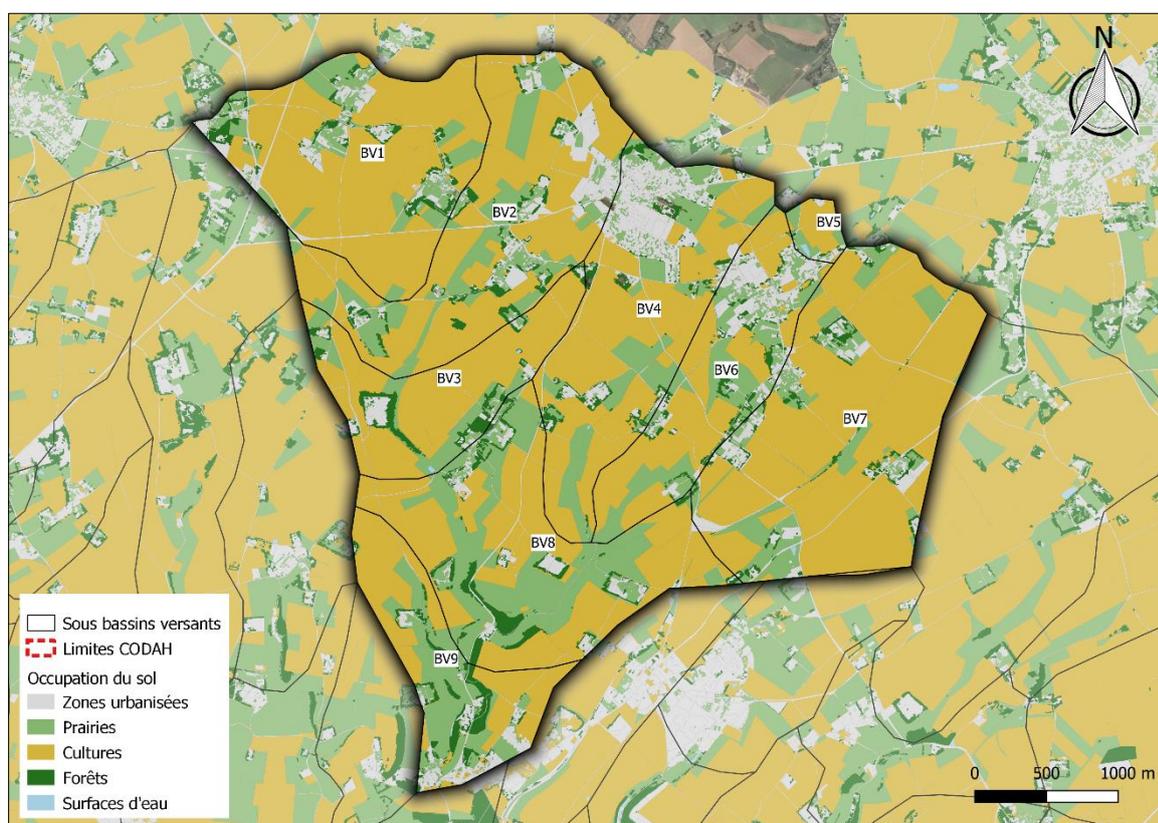
Type	Bois	Prairies	Cultures	Zones urbanisées	Plans d'eau	Moyenne pondérée
CN	43	50	68	87	100	
BV1	6.2%	8.3%	64.5%	20.8%	0.2%	69.0
BV2	1.1%	14.1%	76.7%	8.0%	0.1%	66.8
BV3	1.3%	11.8%	82.1%	4.7%	0.2%	66.5
BV4	3.7%	17.8%	69.7%	8.5%	0.3%	65.6
BV5	6.5%	20.7%	53.0%	19.2%	0.5%	66.5
BV6	6.2%	18.6%	2.8%	72.3%	0.0%	76.9

Lézarde Nord A



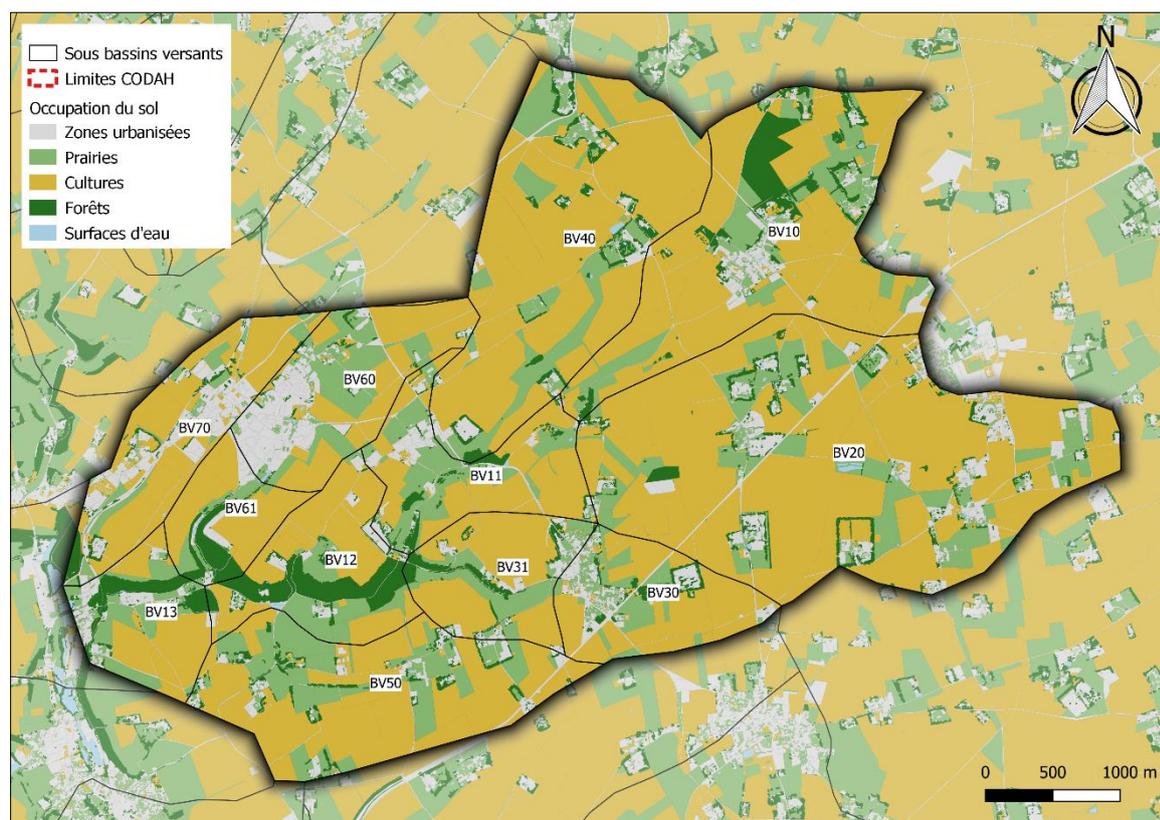
Type	Bois	Prairies	Cultures	Zones urbanisées	Plans d'eau	Moyenne pondérée
CN	43	50	68	87	100	
BV10	1.5%	21.5%	63.1%	13.6%	0.3%	66
BV11	1.5%	16.9%	70.9%	10.5%	0.1%	67
BV13	2.7%	16.2%	70.5%	10.6%	0.1%	66
BV14	2.0%	10.7%	77.8%	9.4%	0.0%	67
BV15	6.7%	23.7%	61.0%	8.6%	0.0%	64
BV16	7.3%	20.6%	64.6%	7.5%	0.1%	64
BV17	2.5%	37.1%	48.1%	12.3%	0.0%	63
BV18	8.0%	34.8%	49.4%	7.9%	0.0%	61
BV20	3.9%	15.5%	64.5%	15.8%	0.4%	67
BV21	4.0%	7.7%	77.5%	10.4%	0.3%	68
BV22	5.2%	19.7%	63.7%	11.3%	0.1%	65
BV23	6.5%	32.5%	46.4%	14.4%	0.1%	63

Lézarde Nord B



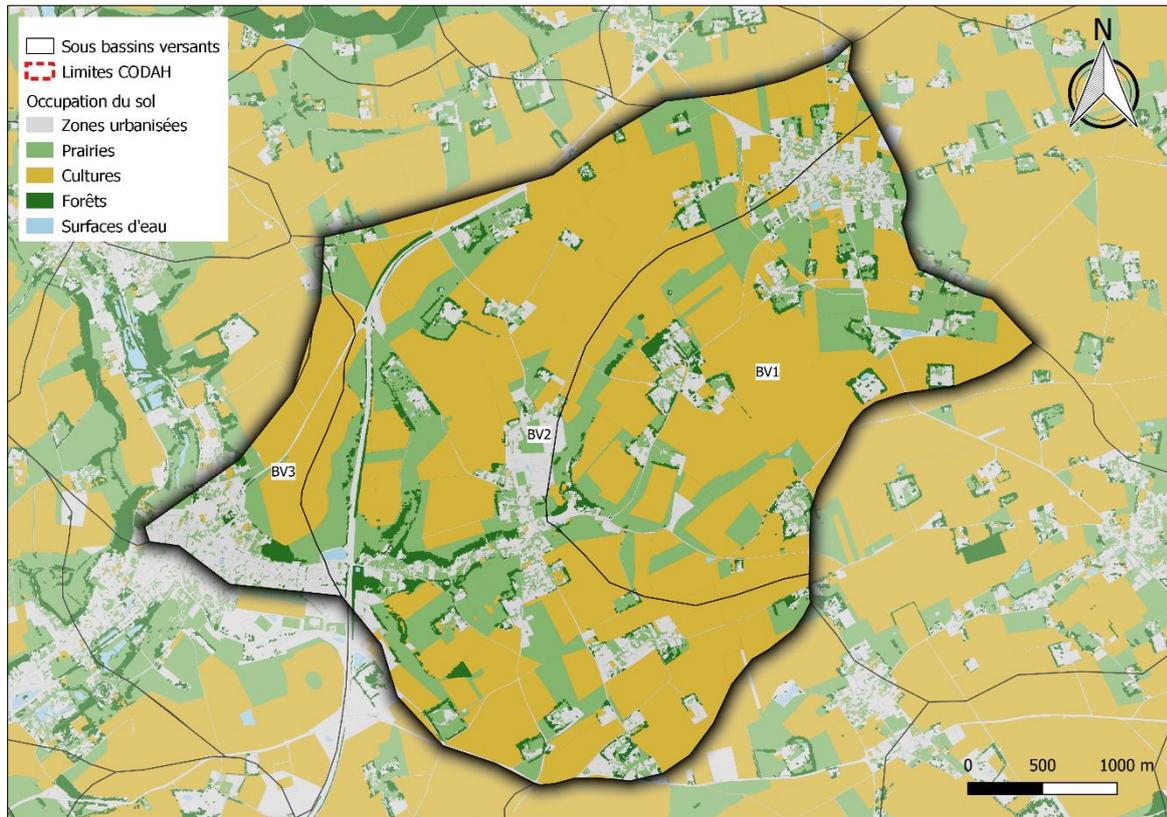
Type	Bois	Prairies	Cultures	Zones urbanisées	Plans d'eau	Moyenne pondérée
CN	43	50	68	87	100	
BV1	4.1%	14.9%	71.4%	9.3%	0.2%	66
BV2	4.4%	22.9%	59.8%	12.8%	0.2%	65
BV3	7.7%	14.3%	71.3%	6.6%	0.2%	65
BV4	4.0%	22.5%	55.4%	17.9%	0.1%	66
BV5	2.8%	24.4%	59.3%	11.4%	2.1%	66
BV6	5.2%	27.8%	48.5%	18.4%	0.0%	65
BV7	2.6%	12.8%	77.2%	7.4%	0.1%	66
BV8	6.4%	35.1%	52.4%	6.0%	0.1%	61
BV9	9.3%	32.1%	47.1%	11.5%	0.0%	62

Lézarde Nord C



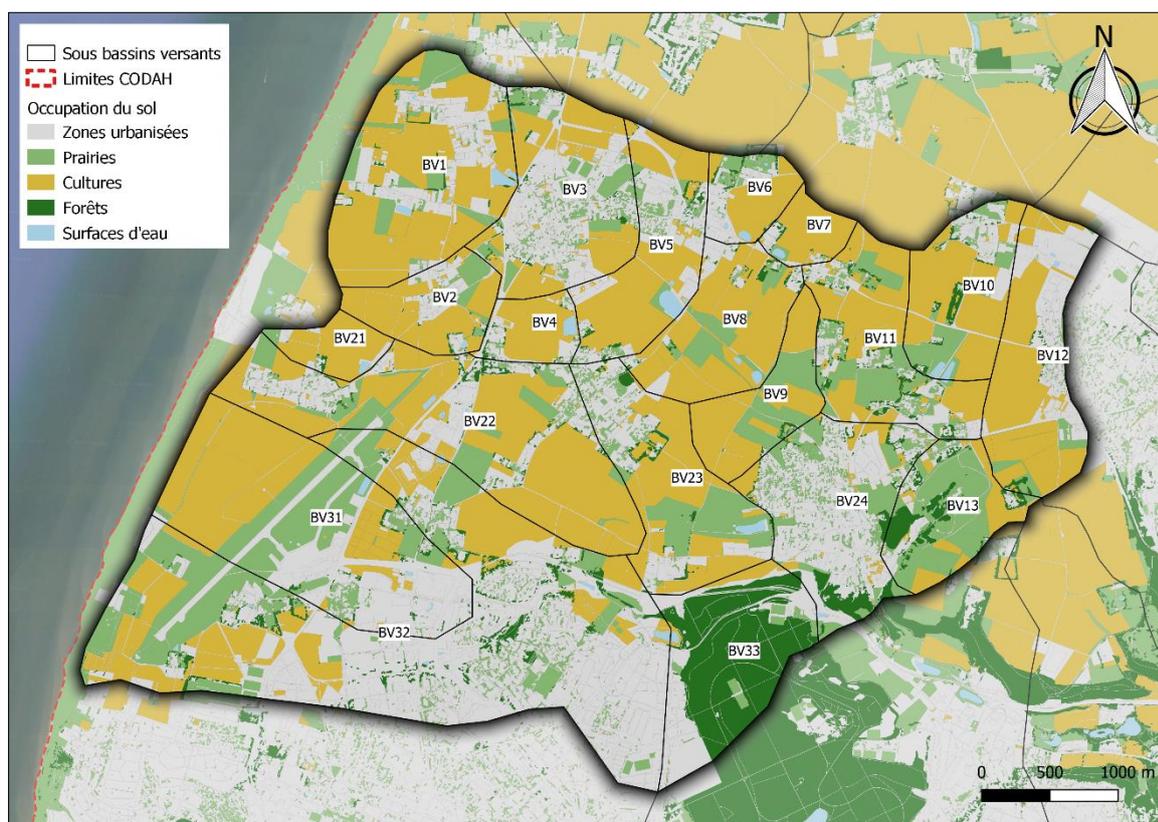
Type	Bois	Prairies	Cultures	Zones urbanisées	Plans d'eau	Moyenne pondérée
CN	43	50	68	87	100	
BV10	10.5%	17.6%	63.8%	8.0%	0.1%	64
BV11	6.5%	28.9%	52.7%	11.8%	0.1%	63
BV12	23.0%	18.1%	50.9%	7.5%	0.3%	60
BV13	15.0%	26.5%	43.9%	14.2%	0.5%	62
BV20	3.8%	16.2%	69.9%	9.7%	0.3%	66
BV30	5.0%	20.3%	58.9%	15.7%	0.1%	66
BV31	8.7%	21.1%	60.3%	9.8%	0.0%	64
BV40	4.3%	18.0%	72.2%	5.3%	0.2%	65
BV50	4.6%	27.7%	60.4%	7.3%	0.1%	63
BV60	1.9%	28.2%	42.7%	26.9%	0.3%	68
BV61	16.5%	10.7%	62.4%	10.0%	0.3%	64
BV70	5.0%	11.3%	57.7%	25.9%	0.1%	70

Lézarde Nord D



Type	Bois	Prairies	Cultures	Zones urbanisées	Plans d'eau	Moyenne pondérée
CN	43	50	68	87	100	
BV1	4.4%	24.6%	58.1%	12.6%	0.4%	65
BV2	5.4%	23.0%	56.8%	14.5%	0.2%	65
BV3	3.6%	15.8%	45.2%	35.3%	0.2%	71

Rouelles



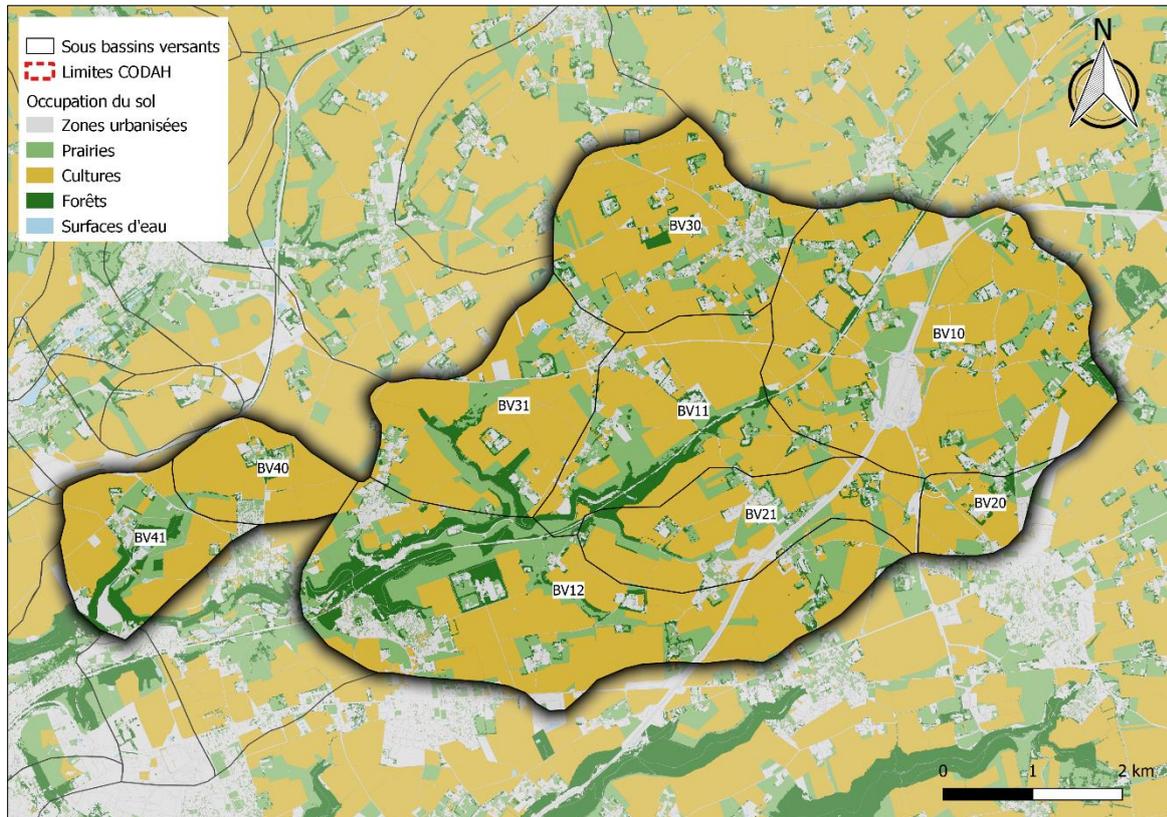
Type	Bois	Prairies	Cultures	Zones urbanisées	Plans d'eau	Moyenne pondérée
CN	43	50	68	87	100	
BV1	1.0%	14.0%	59.8%	23.6%	1.6%	70
BV2	1.1%	12.7%	63.5%	22.4%	0.3%	70
BV3	1.6%	17.0%	33.8%	47.3%	0.3%	74
BV4	2.4%	3.6%	65.4%	24.9%	3.7%	73
BV5	1.9%	7.6%	55.1%	32.8%	2.5%	73
BV6	3.1%	14.0%	50.7%	30.2%	2.1%	71
BV7	2.1%	3.7%	80.5%	11.8%	2.0%	70
BV8	2.0%	15.5%	68.4%	13.0%	1.1%	68
BV9	1.1%	31.1%	66.0%	1.8%	0.0%	62
BV10	4.1%	17.8%	57.7%	18.8%	1.6%	68
BV11	4.6%	26.7%	47.2%	21.0%	0.4%	66
BV12	1.1%	6.7%	58.6%	33.3%	0.3%	73
BV13	25.1%	23.7%	8.0%	39.8%	3.4%	66
BV14	20.7%	11.0%	49.4%	17.1%	1.7%	65
BV15	44.7%	13.4%	13.0%	24.4%	4.5%	60
BV21	1.4%	4.5%	80.9%	11.2%	2.0%	70
BV22	1.9%	14.0%	61.0%	22.6%	0.4%	69
BV23	2.9%	25.4%	43.2%	27.4%	1.1%	68
BV24	24.5%	29.8%	10.2%	34.9%	0.6%	63
BV31	0.9%	23.3%	42.1%	33.3%	0.4%	70
BV32	3.2%	20.1%	21.3%	55.1%	0.4%	74
BV41	73.2%	2.3%	0.0%	23.0%	1.4%	54

Vallée



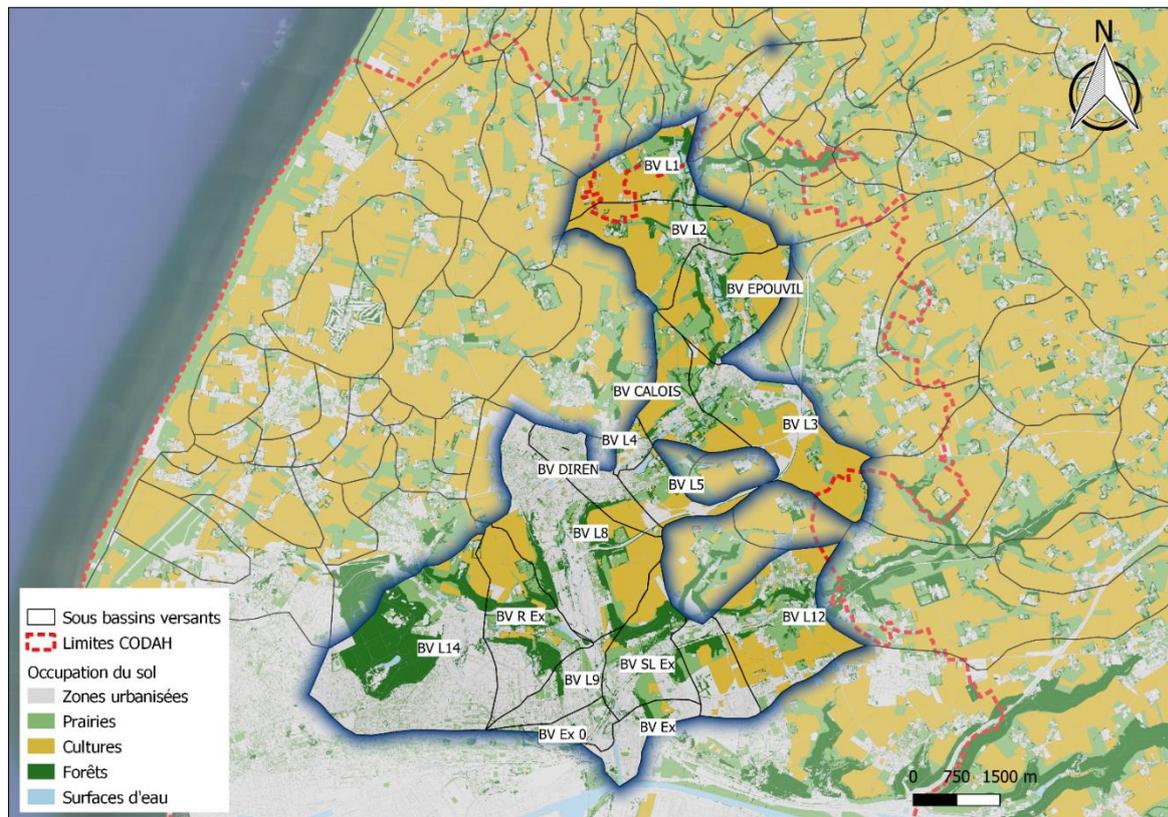
Type	Bois	Prairies	Cultures	Zones urbanisées	Plans d'eau	Moyenne pondérée
CN	43	50	68	87	100	
BV1	4.3%	7.7%	73.2%	14.4%	0.3%	68
BV2	8.4%	33.3%	46.4%	11.5%	0.4%	62

Saint-Laurent



Type	Bois	Prairies	Cultures	Zones urbanisées	Plans d'eau	Moyenne pondérée
<i>CN</i>	<i>43</i>	<i>50</i>	<i>68</i>	<i>87</i>	<i>100</i>	
BV10	4.6%	14.2%	62.2%	18.7%	0.3%	68
BV11	11.7%	18.4%	58.9%	10.8%	0.1%	64
BV12	12.6%	25.0%	46.8%	15.4%	0.2%	63
BV13	13.7%	20.7%	30.9%	34.1%	0.6%	68
BV20	5.6%	18.1%	58.4%	17.4%	0.5%	67
BV21	5.0%	18.3%	58.9%	17.4%	0.4%	67
BV30	4.6%	16.2%	65.8%	13.0%	0.4%	67
BV31	7.4%	18.8%	63.0%	10.7%	0.2%	65
BV40	4.2%	5.9%	80.5%	9.1%	0.4%	68
BV41	13.8%	17.7%	52.5%	15.4%	0.6%	64
BV50	0.4%	8.5%	6.8%	83.4%	0.9%	83

Lézarde



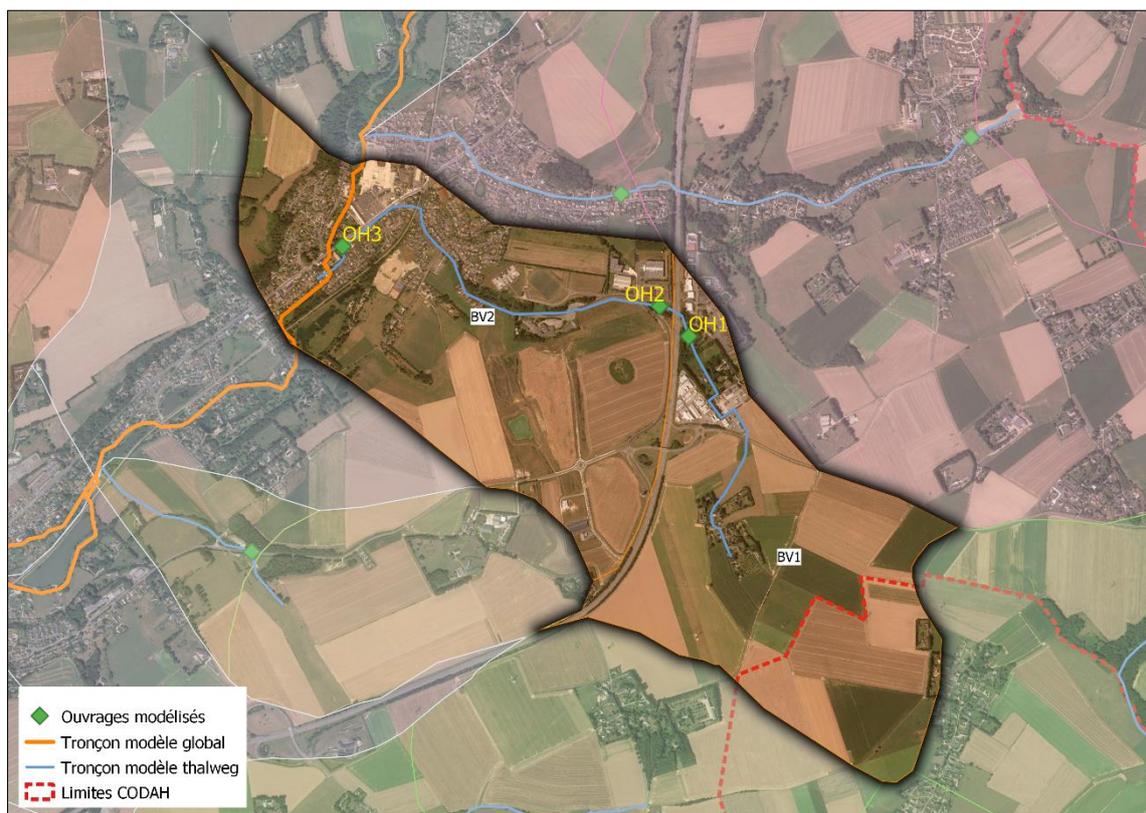
Type	Bois	Prairies	Cultures	Zones urbanisées	Plans d'eau	Moyenne pondérée
CN	43	50	68	87	100	
BV Calois	8.3%	24.9%	46.5%	18.3%	1.9%	66
BV Diren	3.1%	13.3%	18.6%	64.8%	0.2%	77
BV Epouville	14.8%	22.7%	44.6%	15.5%	2.4%	64
BV Ex 0	8.6%	11.3%	0.0%	78.6%	1.5%	79
BV Ex	8.0%	10.7%	2.9%	73.5%	4.9%	80
BV Gournay	10.5%	11.9%	23.9%	53.3%	0.5%	74
BV L1	9.6%	19.8%	53.5%	14.9%	2.4%	66
BV L12	8.2%	23.1%	40.5%	27.6%	0.6%	67
BV L14	28.0%	11.2%	4.6%	55.4%	0.8%	70
BV L2	7.7%	21.2%	57.2%	12.8%	1.2%	65
BV L4	8.5%	12.1%	18.8%	59.9%	0.6%	75
BV L5	5.8%	19.6%	25.5%	45.9%	3.2%	73
BV L8	11.8%	13.1%	24.5%	49.8%	0.7%	72
BV L9	7.3%	15.1%	1.9%	74.7%	1.0%	78
BV R Ex	19.4%	11.9%	26.3%	40.2%	2.3%	69
BV SL Ex	23.3%	18.8%	14.1%	42.9%	0.9%	67

2.4 Description des ouvrages modélisés (MIKE)

Code BV	Numéro global	Numéro local	Nom	Date	Volume (m3)	Q fuite (l/s)	Dimensions	Commentaire
CPV	OH001	OH1	Coupeauville Grand Bassin	2001	48 000	nc	hyp : buse 400	
CPV	OH002	OH2	Coupeauville Petite Bassin	2001	9 600	nc	buse 400	
CPV	OH003	OH3	Ecoute pluie	nc	5 336	nc	buse 300	
CUR	OH004	OH1	Chemin du Golf	2006	18 908	150	buse 500	
CUR	OH005	OH2	Bois Caulot	2005	26 421	150	buse 400	
CUR	OH006	OH3	Cavée Rouge	2005	6 892		buse 300	Système vortex, débit inconnu
CUR	OH007	OH4	Fontenay amont	1982	27 608	600	buse 800	
CUR	OH008	OH5	Fontanay aval	1983	4 756	544	dallot 400x400	Déjà intégré au modèle global
CUR	OH009	OH6	Clinarderie	1985	5 228	500	dallot 400x400	Déjà intégré au modèle global
LNA	OH010	OH1	Bassin des Grandes Fosses	nc	5 100		2 buses 200 mm	
LNA	OH011	OH2	Bassin amont route Etretat	1997	8 200		buse 500 mm	Mesuré par DHI
LNA	OH012	OH3	Caillouterie	2001	8 200		2 buses 400 mm	Mesuré par DHI
LNA	OH013	OH4	Barrage des Eparses	2006	54 250	600	4 buses 300 mm	Vannes supposées ouvertes.
LNA	OH014	OH5	Barrage du Cynodrome	2006	50 000	300	4 buses 250 mm	Vannes supposées ouvertes.
LNA	OH015	OH6	Barrage de la Marguerite	2006	43 700	300	4 buses 200 mm	Vannes supposées ouvertes.
LNB	OH016	OH1	Barrage de la Chapelle	NC	8 000	NC	2 buses 150 mm	Étagés
LNB	OH017	OH3a	Barrage d'Eculot	NC	4 000	NC	2 buses 150 mm	Étagés
LNB	OH018	OH3b	Barrage de la Vallée	2006	27 800	490	4 buses 250 mm	
LNB	OH019	OH4	Barrage du Divisé - Gonville	2006	17 000	100	4 buses 150 mm	
LNB	OH020	OH5	Bassin de la Caroline	1996	15 000	0	Aucun	Pas d'ouvrage de fuite
LNB	OH021	OH6	Barrage du Divisé - Anglesqueville	2006	13 000	50	4 buses 100 mm	
LNB	OH022	OH7	Esneval	2006	10 000		4x250	
LNB	OH023	OH8	La Côte Vallée	1997	17 000		50	
LNC	OH024	OH30	Bassin du centre d'Hermeville	1997	5 000	NC	200+200+100+100 mm	4 orifices étagés
LNC	OH025	OH20	Barrage Fond de Féccamp 2	nc	8 000	NC	1x200 + 1x150 mm	2 orifices étagés
LNC	OH026	OH21	Bassin Fond de Fécamp 1	1985	25 000	NC	150 mm	

Code BV	Numéro global	Numéro local	Nom	Date	Volume (m3)	Q fuite (l/s)	Dimensions	Commentaire
LNC	OH027	OH60	Bassin du Gymnase	nc	6 000	NC	NC	
LND	OH028	Marognian	Bassin de Marognian	1983	18 076	556	400 mm	
LND	OH029	Bourg	Bassin du Bourg	1985	5 606	935	600 mm	
ROU	OH030	OH01	Bassin Ouest RD940	2012	20 567	60	400 mm	MNE plus ancien (ancienne mare réaménagée)
ROU	OH031	OH02	Barrage Chemin du Moulin Bis	2012	9 706	83	300 mm	2 ouvrages en serie (5600+4100)
ROU	OH032	OH03	Barrages des Vallées	2011	20 420	380	400 mm	
ROU	OH033	OH04	Bassin des Quatre Fermes	2011	5 039	58	300 mm	
ROU	OH034	OH05	Fond des Vallées	1988	34 271	520	2x1000 mm	
ROU	OH035	OH06	Bassin de la Ferme Lemaitre	2008	5 642	25	300 mm	
ROU	OH036	OH07	Bassin d'Emfrayette	2012	5 005	25	300 mm	
ROU	OH037	OH08	Fontaine aux Cailloux	2009	63 213	240	400 mm	
ROU	OH038	OH09	Barrage route d'Emfrayette amont	2012	7 706	88	250 mm	MNE plus ancien
ROU	OH039	OH10a	Réauté de Fréville bis	2012	7 513	63	400 mm	
ROU	OH040	OH10b	Réauté de Fréville	1995	9 215	108	400 mm	
ROU	OH041	OH11	Barrage route d'Emfrayette aval	2012	8 824	88	400 mm	MNE plus ancien
ROU	OH042	OH12	Barrage Cote de Fontaine	2012	29 312	336	300 mm	
ROU	OH043	OH22	Bassin des Monts Trottins	2012	35 052	405	400 mm	Pas de fiche ouvrage
ROU	OH044	OH23a	Barrage des Jardinets Amont	2012	7 696	266	500 mm	MNE plus ancien
ROU	OH045	OH23b	Barrage des Jardinets Aval	2012	16 077	266	400 mm	MNE plus ancien
ROU	OH046	OH24	Le Moulin	1991	21 076	NC	NC	Déjà intégré au modèle global
ROU	OH047	OH31	Bigne à Fosse	NC	6 900	460	400 mm	pas de fiche ouvrage, pas sur le MNE
ROU	OH048	OH32	Louis Lumière	NC	81 625	772	NC	vanne murale 500
STL	OH049	OH12	Bassin de la RD34	1991	8 976	150	500 mm	Déjà intégré au modèle global
STL	OH050	OH20	Bassin VC403	NC	11 340	NC	NC	Pas d'information
STL	OH051	OH30	Bassin du Clos Viger	1990	5 000	NC	2x300 + 1x450 mm	Non étagés
STL	OH052	OH40	Barrage RD111	2011	24 324	150	500 mm	
VAL	OH053	OH1	Décharge du Capuchet	2001	5 620	343	300 mm	
					951 800			

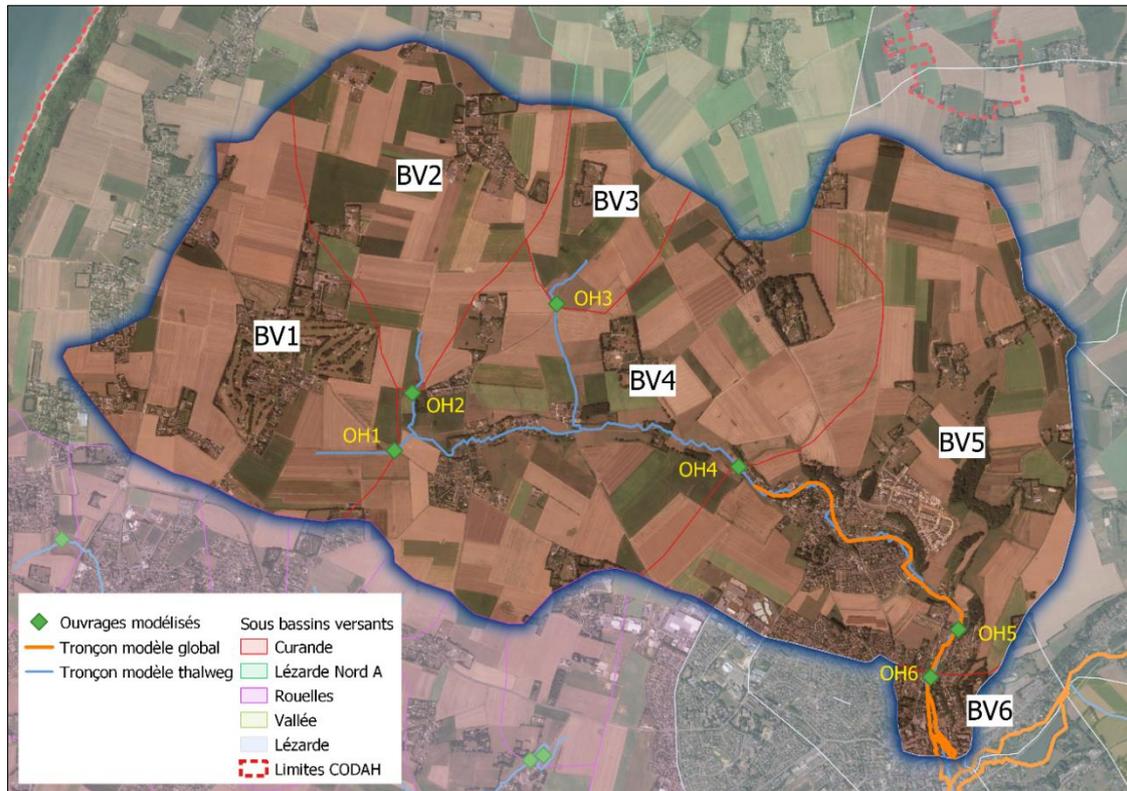
Bassin versant Coupeauville (CPV)



N° local	N° global	Nom	Date de mise en service	Capacité (m ³)	Débit de fuite (L/s)	Dimension de l'ouvrage de fuite	Commentaire
OH1	OH001	Coupeauville Grand Bassin	2001	48 000	0.9	Hyp : buse 400 mm	Dimensions non connues
OH2	OH002	Coupeauville Petite Bassin	2001	9 700	NC	Buse 400 mm	
OH3	OH003	Ecoute pluie	NC	5 336	NC	Buse 300 mm	
Total				63 036			

Le débit en sortie de l'ouvrage OH3 est injecté dans le modèle global de la Lézarde.

Bassin versant Curande (CUR)

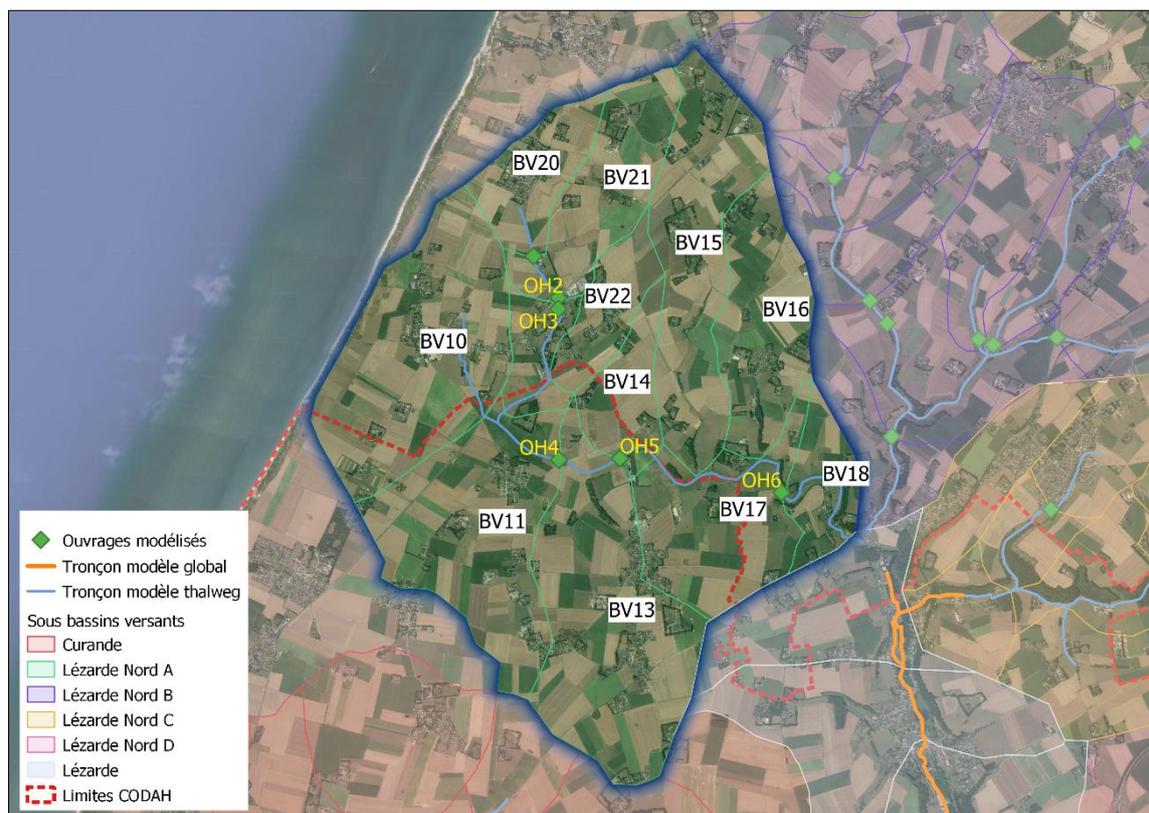


Quatre ouvrages de capacité supérieure à 5 000 m³ sont présents sur le bassin versant. Deux autres ouvrages ont une capacité inférieure à 5 000 m³ mais leur proximité a fait qu'il a été jugé pertinent de les intégrer au modèle.

N° local	N° global	Nom	Date de mise en service	Capacité (m ³)	Débit de fuite (L/s)	Dimension de l'ouvrage de fuite	Commentaire
OH1	OH004	Barrage du Chemin du Golf	2006	18 908	150	Buse 500mm	
OH2	OH005	Chemin du Bois Caulot	2005	26 421	150	Buse 400mm	
OH3	OH006	La Cavée Rouge	2005	6 892	NC	Buse 300mm	Système vortex, débit inconnu
OH4	OH007	Fontenay amont	1982	27 608	600	Buse 800mm	
Total				64 829			
OH5	OH008	Fontenay aval	1983	4 756	544	Dallot 400x400mm	Déjà intégré au modèle global
OH6	OH009	Clinarderie	1985	5 228	500	Dallot 400x400mm	Déjà intégré au modèle global

Le débit sortant de OH4 est injecté à l'entrée du tronçon de la Curande dans le modèle global. Le débit du BV5 issu de la modélisation hydrologique est injecté de manière distribuée le long du tronçon traversant le bassin versant.

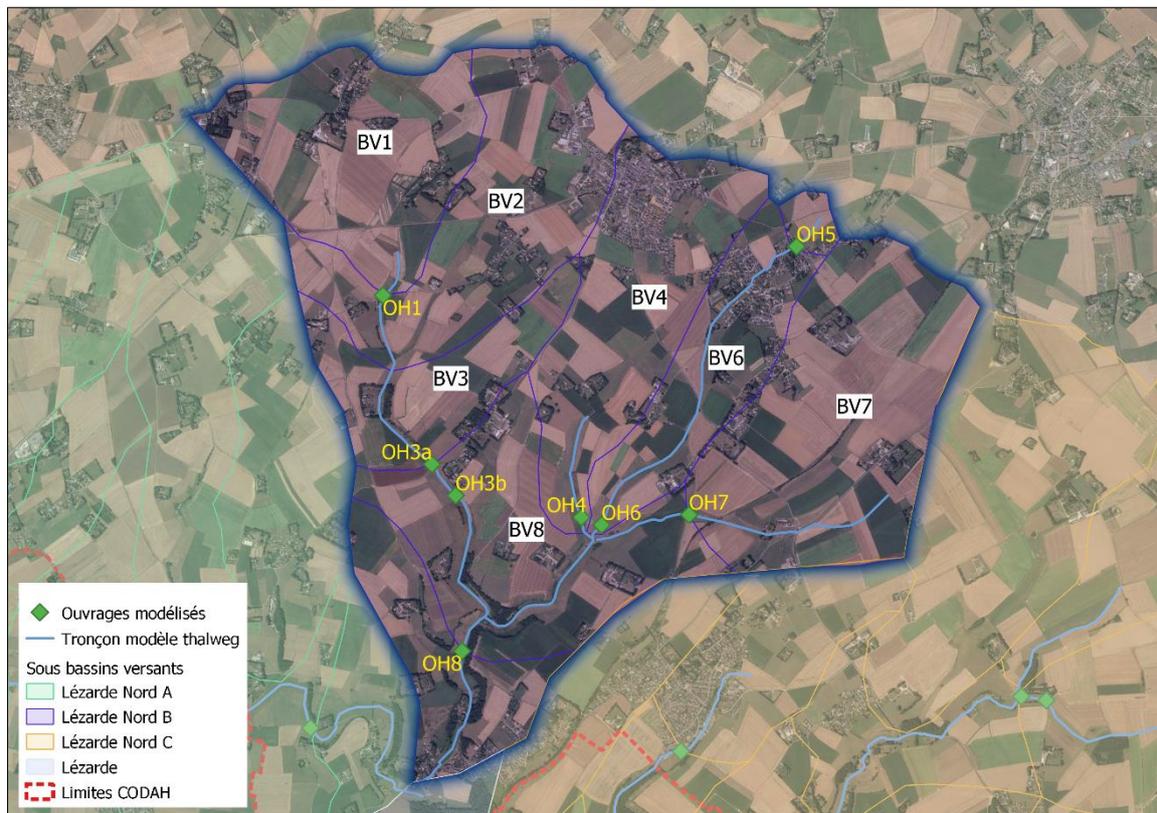
Bassin versant Lézarde Nord A (LNA)



N° local	N° global	Nom	Date de mise en service	Capacité (m ³)	Débit de fuite (L/s)	Dimension de l'ouvrage de fuite	Commentaire
OH1	OH010	Bassin des Grandes Fosses	NC	5 100	NC	2x200 mm	
OH2	OH011	Bassin amont route Etretat	1997	8 200	NC	500 mm	Mesuré par DHI
OH3	OH012	Caillouterie	2001	8 200	NC	2x400 mm	Mesuré par DHI
OH4	OH013	Barrage des Eparses	2006	54 250	600	4x300 mm	Vannes supposées ouvertes.
OH5	OH014	Barrage du Cynodrme	2006	50 000	300	4x250 mm	Vannes supposées ouvertes.
OH6	OH015	Barrage de la Marguerite	2006	43 700	300	4x200 mm	Vannes supposées ouvertes.
	Total			93 700			

Le débit à l'aval du modèle hydraulique est injecté dans le modèle global.

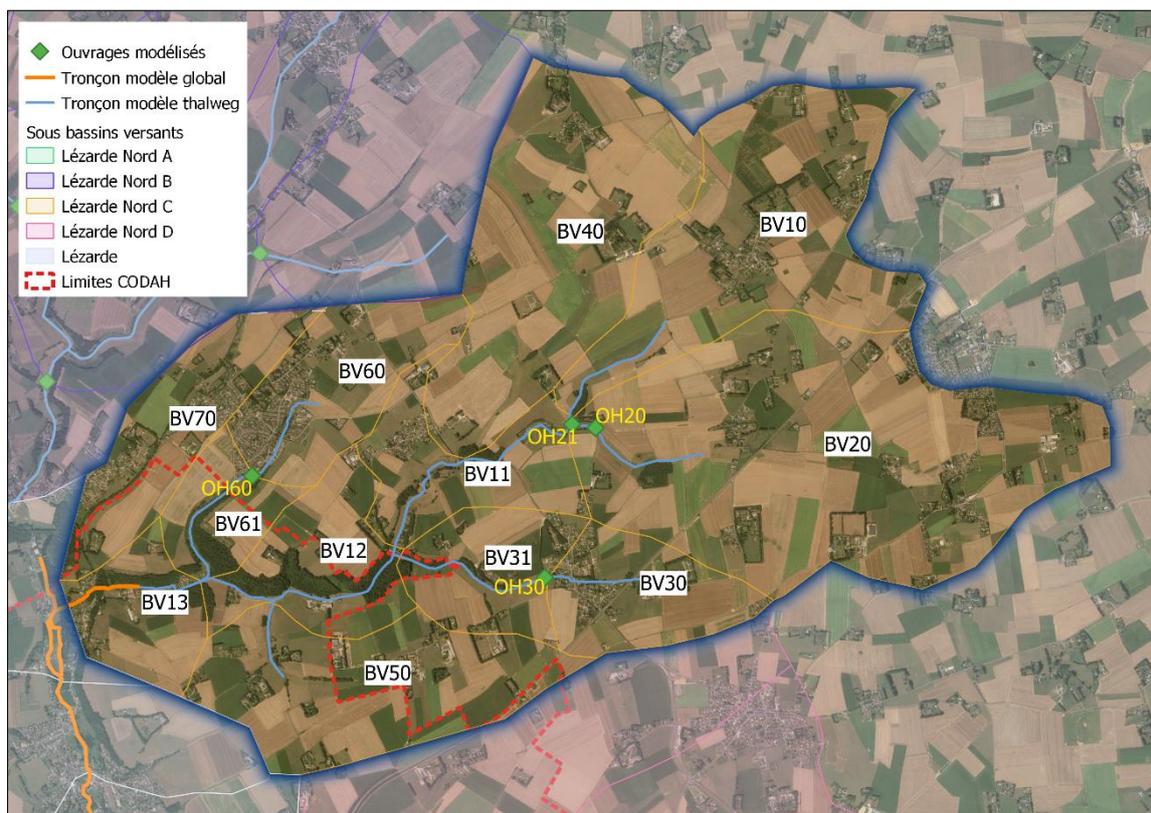
Bassin versant Lézarde Nord B (LNB)



N° local	N° global	Nom	Date de mise en service	Capacité (m ³)	Débit de fuite (L/s)	Dimension de l'ouvrage de fuite	Commentaire
OH1	OH016	Barrage de la Chapelle	NC	8 000	NC	2x150 mm	Étagés
OH3a	OH017	Barrage d'Ecultot	NC	4 000	NC	2x150 mm	Étagés
OH3b	OH018	Barrage de la Vallée	2006	27 800	490	4x250 mm	
OH4	OH019	Barrage du Divisé - Gonnevill	2006	17 000	100	4x150 mm	
OH5	OH020	Bassin de la Caroline	1996	15 000	0	Aucun	Pas d'ouvrage de fuite
OH6	OH021	Barrage du Divisé - Anglesqueville	2006	13 000	50	4x100 mm	
OH7	OH022	Esneval	2006	10 000	NC	4x250 mm	
OH8	OH023	La Côte Vallée	1997	17 000	NC	50mm	
Total				111 800			

Le débit à l'aval du modèle hydraulique est injecté dans le modèle global.

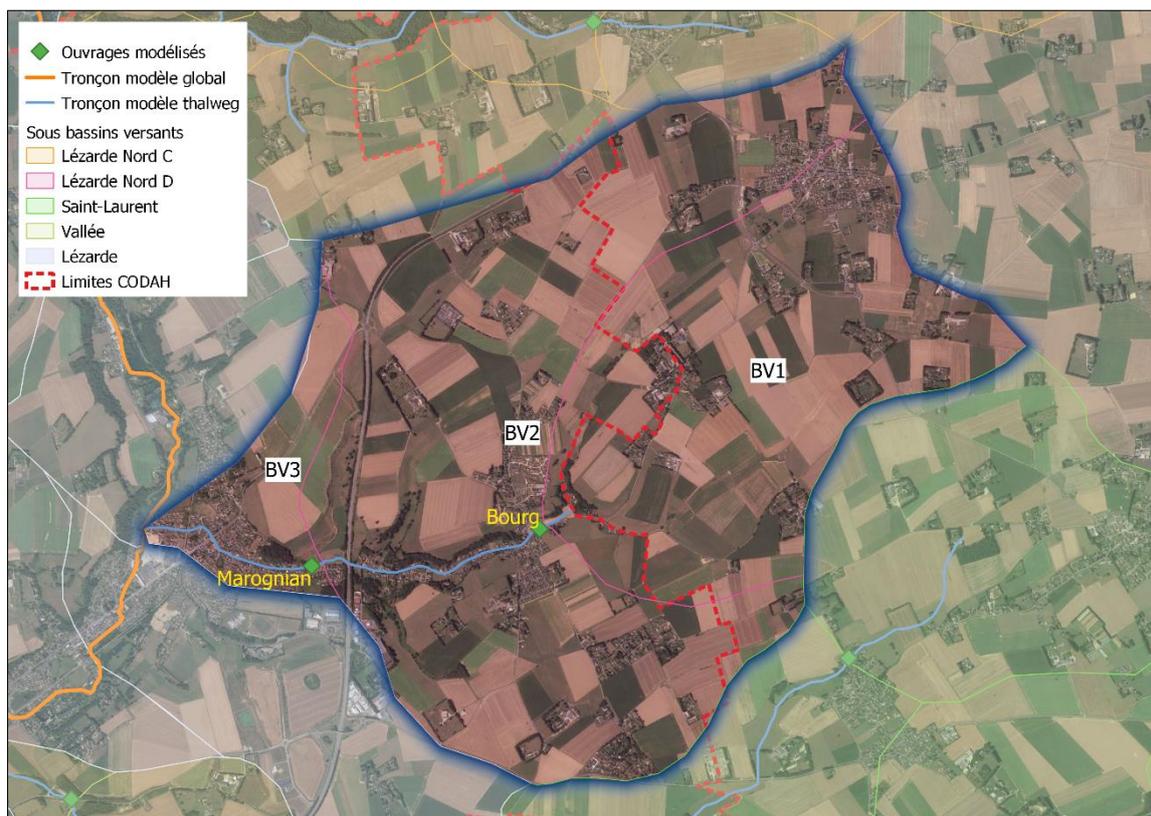
Bassin versant Lézarde Nord C (LNC)



N° local	N° global	Nom	Date de mise en service	Capacité (m ³)	Débit de fuite (L/s)	Dimension de l'ouvrage de fuite	Commentaire
OH30	OH024	Bassin du centre d'Hermeville	1997	5 000	NC	200+200 +100+100 mm	4 orifices étagés
OH20	OH025	Barrage Fond de Féccamp 2	NC	8 000	NC	1x200 + 1x150 mm	2 orifices étagés
OH21	OH026	Bassin Fond de Féccamp 1	1985	25 000	NC	150 mm	
OH60	OH027	Bassin du Gymnase	NC	6 000	NC	Hyp : buse 150mm	
Total				44 000			

Le débit à l'aval du modèle hydraulique est injecté dans le modèle global.

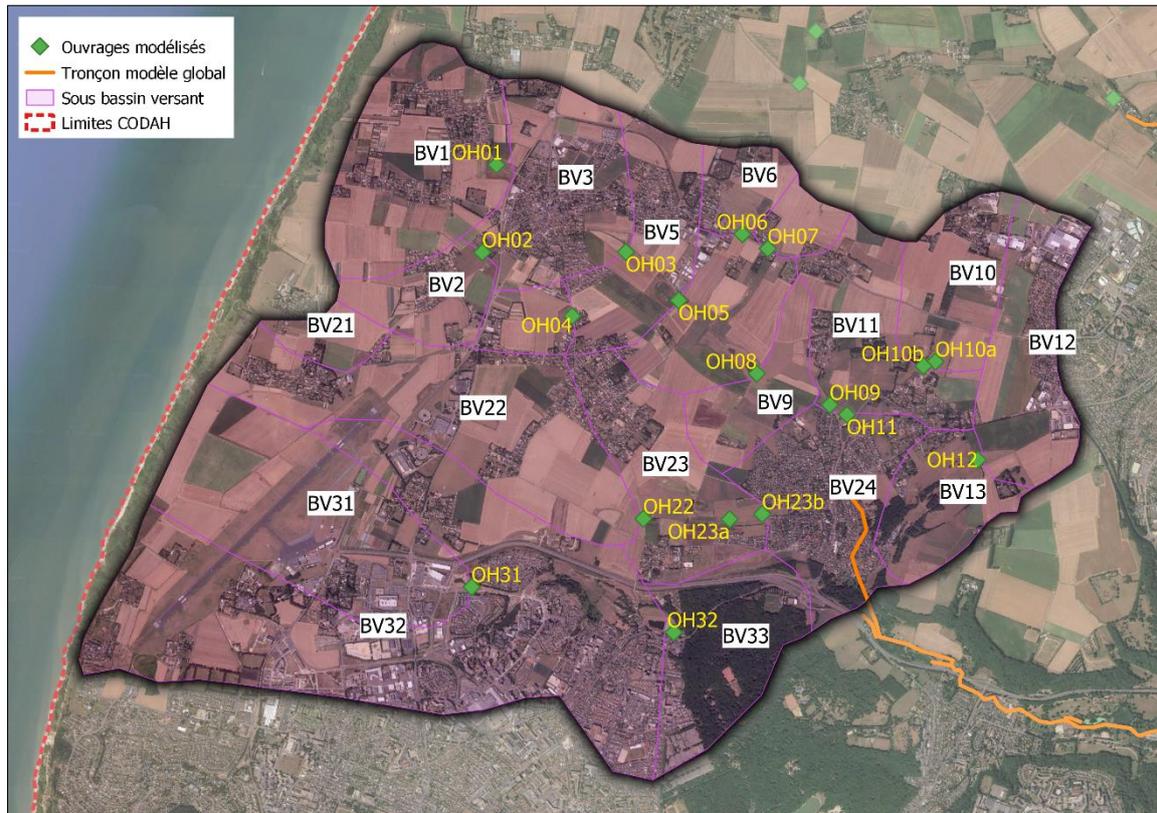
Bassin versant Lézarde Nord D (LND)



N° local	N° global	Nom	Date de mise en service	Capacité (m ³)	Débit de fuite (L/s)	Dimension de l'ouvrage de fuite	Commentaire
Marognian	OH028	Bassin de Marognian	1983	18 076	556	400 mm	
Bourg	OH029	Bassin du Bourg	1985	5 606	935	600 mm	
Total				23 682			

Le débit à l'aval du modèle hydraulique est injecté dans le modèle global.

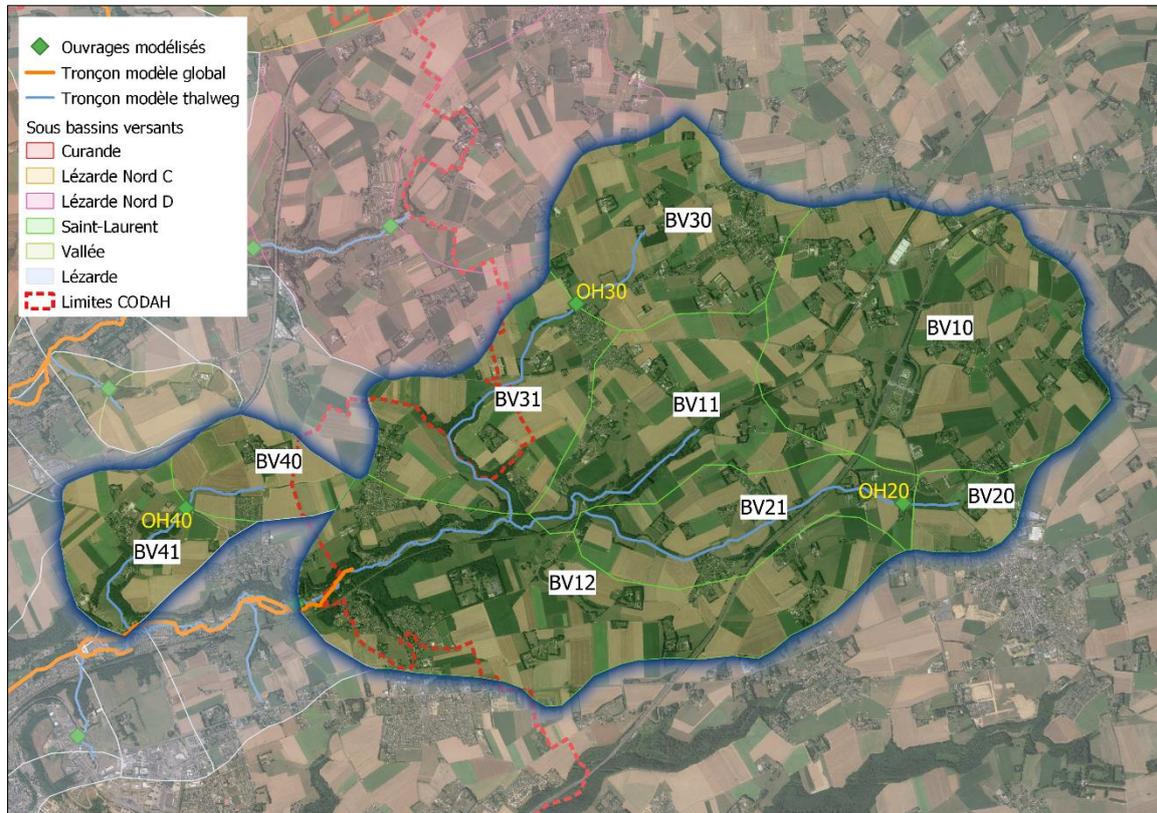
Bassin versant Rouelles (ROU)



N° local	N° global	Nom	Date de mise en service	Capacité (m ³)	Débit de fuite (L/s)	Dimension de l'ouvrage de fuite	Commentaire
OH01	OH030	Bassin Ouest RD940	2012	20 567	60	400 mm	MNE plus ancien (ancienne mare réaménagée)
OH02	OH031	Barrage Chemin du Moulin Bis	2012	9 706	83	300 mm	2 ouvrages en serie (5600+4100)
OH03	OH032	Barrages des Vallées	2011	20 420	380	400 mm	
OH04	OH033	Bassin des Quatre Fermes	2011	5 039	58	300 mm	
OH05	OH034	Fond des Vallées	1988	34 271	520	2x1000 mm	
OH06	OH035	Bassin de la Ferme Lemaitre	2008	5 642	25	300 mm	
OH07	OH036	Bassin d'Emfrayette	2012	5 005	25	300 mm	
OH08	OH037	Fontaine aux Cailloux	2009	63 213	240	400 mm	
OH09	OH038	Barrage route d'Emfrayette amont	2012	7 706	88	250 mm	MNE plus ancien

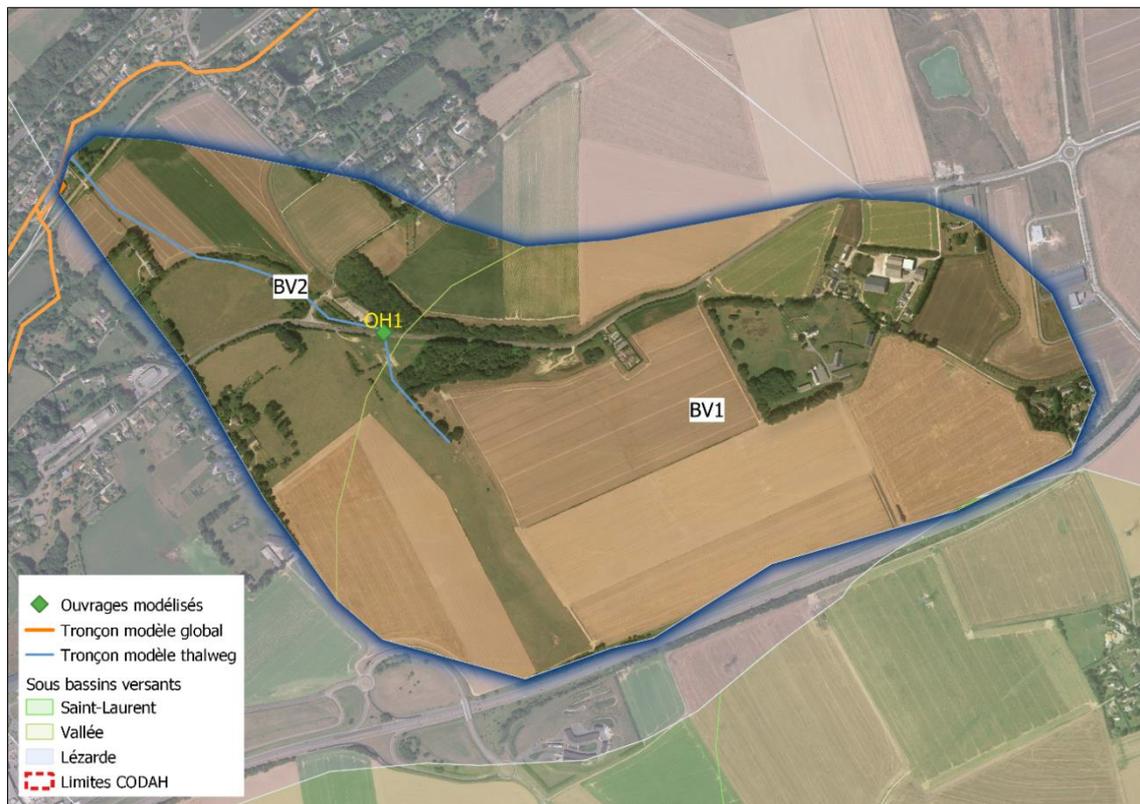
N° local	N° global	Nom	Date de mise en service	Capacité (m ³)	Débit de fuite (L/s)	Dimension de l'ouvrage de fuite	Commentaire
OH10a	OH039	Réauté de Fréville bis	2012	7 513	63	400 mm	
OH10b	OH040	Réauté de Fréville	1995	9 215	108	400 mm	
OH11	OH041	Barrage route d'Emfrayette aval	2012	8 824	88	400 mm	MNE plus ancien
OH12	OH042	Barrage Cote de Fontaine	2012	29 312	336	300 mm	
OH22	OH043	Bassin des Monts Trotins	2012	35 052	405	400 mm	Pas de fiche ouvrage
OH23a	OH044	Barrage des Jardinets Amont	2012	7 696	266	500 mm	MNE plus ancien
OH23b	OH045	Barrage des Jardinets Aval	2012	16 077	266	400 mm	MNE plus ancien
OH31	OH047	Bigne à Fosse	NC	6 900	460	400 mm	pas de fiche ouvrage, pas sur le MNE
OH32	OH048	Louis Lumière	NC	81 625	772	Hyp : buse 500 mm	vanne murale 500
Total				373 783			

Bassin versant Saint-Laurent (STL)



N° local	N° global	Nom	Date de mise en service	Capacité (m ³)	Débit de fuite (L/s)	Dimension de l'ouvrage de fuite	Commentaire
OH12	OH049	Bassin de la RD34	1991	8 976	150	500	Déjà intégré au modèle global
OH20	OH050	Bassin VC403	NC	11 340	NC	Hyp : buse 400mm	Pas d'information
OH30	OH051	Bassin du Clos Viger	1990	5 000	NC	2x300 + 1x450 mm	Non étagés
OH40	OH052	Barrage RD111	2011	24 324	150	500	
Total				44 640			

Bassin versant la Vallée (VAL)



N° local	N° global	Nom	Date de mise en service	Capacité (m ³)	Débit de fuite (L/s)	Dimension de l'ouvrage de fuite	Commentaire
OH1	OH053	Décharge du Capuchet	2001	5 620	343	300 mm	

Le débit à l'aval du modèle hydraulique est injecté dans le modèle global.

2.5 Résultats détaillés du modèle hydrologique-hydraulique d'inondation par ruissellement et débordement de rivière

La modélisation a but pour de servir cinq scénarios avec chacun trois pluies de projet différentes (T10, T50 et T100). Les scénarios ont des paramètres d'aménagements (ouvrage de capacité supérieure à 5 000 m³), de climat et d'occupation du sol différents et sont présentés dans le tableau suivant :

Scénario	Aménagements	Climat	Occupation du sol
ref0	Sans aménagement	Actuel	Actuelle
ref1	Actuel	Actuel	Actuelle
cc	Actuel	Changement climatique	Actuelle
herb	Actuel	Actuel	Réduction de prairies
agr	Actuel	Actuel	Changement de pratiques agricoles

A noter que le scénario cc n'a pas été modélisé car il s'agit d'une modification des périodes de retour.

Scénario ref0

Le scénario ref0 est la modélisation de l'état actuel de la Lézarde et de son bassin versant. Elle comprend :

- La modélisation d'aucun ouvrage sur les talwegs et la modélisation complète de la Lézarde issue de l'étude de 2006.
- La transformation pluie-débit à partir des pluies de projet construites à partir de l'événement de 2003 ;

L'occupation du sol actuelle basée sur les données OSCOM de 2016.

Les résultats de ce scénario sont présentés pour chaque période de retour.

Les volumes ruisselés de chaque sous bassin versant sont présentés dans le tableau suivant.

Volumes ruisselés en m³ par sous bassin versant pour le scénario ref0.

Bassin versant	F10	F50	F100
CPV	20 691	31 707	57 156
BV1	9 170	14 051	25 329
BV2	11 522	17 656	31 827
CUR	74 015	119 222	227 842
BV 1 Chemin du Golf	15 290	23 949	44 655
BV 2 Bois Caulot	9 834	16 166	31 317
BV 3 Cavee Rouge	3 457	5 700	10 931
BV 4 Fontenay Amont	18 357	30 975	61 620
BV 5 Clinardiere	24 010	38 137	72 439
BV 6 Aval	3 067	4 296	6 879
LNA	91 342	149 256	289 979
BV10	14 346	23 535	45 996

BV11	13 858	22 163	42 690
BV13	14 990	24 591	46 529
BV14	4 216	6 783	12 444
BV15	9 675	16 111	32 502
BV16	6 621	11 026	22 243
BV17	6 089	10 370	22 043
BV18	1 808	3 303	7 424
BV20	5 114	8 251	15 019
BV21	9 580	14 656	26 149
BV22	3 268	5 293	10 506
BV23	1 777	3 173	6 433
LNB	67 745	109 673	211 177
BV1	10 129	16 151	30 714
BV2	10 355	16 922	31 654
BV3	4 902	7 988	15 551
BV4	10 601	16 954	31 970
BV5	783	1 222	2 250
BV6	6 426	10 161	19 431
BV7	15 945	24 722	46 240
BV8	5 552	10 165	22 230
BV9	3 052	5 388	11 136
LNC	86 611	142 174	278 794
BV10	11 631	19 420	38 778
BV11	3 973	6 815	13 527
BV12	2 383	4 540	10 061
BV13	2 130	3 938	8 540
BV20	25 977	41 288	79 207
BV30	4 814	7 938	14 762
BV31	3 627	6 040	12 184
BV40	14 695	24 015	46 328
BV50	6 884	11 754	24 683
BV60	8 105	12 442	22 686
BV61	2 392	3 984	8 037
LND	60 020	98 084	191 120
BV1	20 680	33 387	66 947
BV2	31 820	53 505	103 753
BV3	7 520	11 192	20 420
ROU	115 716	207 580	392 217
BV R Ex	3 229	14 678	30 437
BV01	7 639	13 145	24 775
BV02	2 525	4 344	7 926
BV03	9 043	14 340	24 293
BV04	1 782	3 309	5 497
BV05	6 057	9 778	16 848
BV06	1 782	3 111	5 562
BV07	930	1 880	3 430

BV08	2 861	5 944	11 346
BV09	805	1 918	4 442
BV10	2 975	5 404	10 315
BV11	2 949	5 728	11 527
BV12	7 037	11 360	20 164
BV13	2 280	3 837	8 011
BV21	1 082	2 098	3 828
BV22	8 849	15 623	29 131
BV23	4 350	7 901	15 081
BV24	2 548	4 749	10 558
BV31	9 484	16 981	30 982
BV32	36 809	53 071	89 907
BV33	522	4 250	9 448
BV41	178	4 130	18 709
STL	297 197	434 695	770 598
BV10	152 061	194 987	280 085
BV11	15 055	25 000	50 974
BV12	22 630	42 285	87 749
BV13	27 381	45 688	126 361
BV20	6 118	9 624	16 163
BV21	18 263	28 548	48 523
BV30	22 190	34 319	63 477
BV31	14 906	25 001	43 984
BV40	7 414	11 944	20 890
BV41	5 556	9 964	21 355
BV50	5 624	7 336	11 038
VAL	5 661	11 173	17 471
BV1	4 948	9 363	14 358
BV2	713	1 809	3 113
LEZ	233 246	354 495	637 466
BV Calois	6 843	11 123	22 422
BV DIREN	14 430	20 131	32 401
BV EPOUVIL	9 342	16 148	32 160
BV Ex	12 026	16 724	26 462
BV Ex 0	8 578	11 499	17 956
BV GOURNAY	11 169	16 033	27 342
BV L1	8 877	14 012	27 385
BV L12	13 091	21 452	41 997
BV L14	35 746	54 912	100 187
BV L2	11 516	19 365	37 550
BV L3	20 692	31 707	57 156
BV L4	3 138	4 502	7 417
BV L5	7 919	11 627	19 898
BV L8	33 647	49 950	87 620
BV L9	14 399	19 699	31 599
BV R Ex	13 751	22 410	41 786

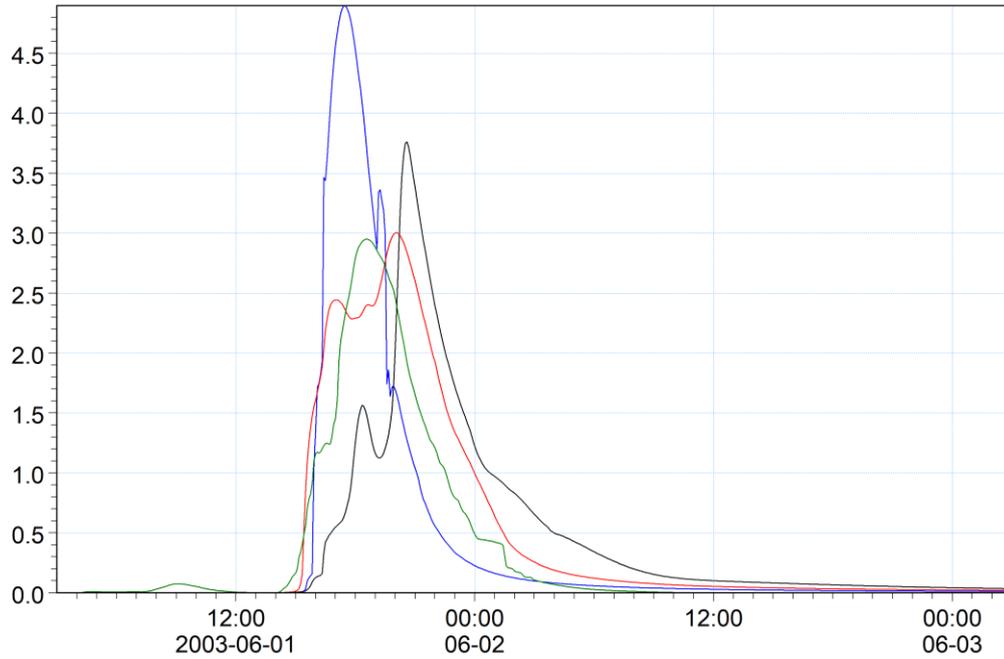
BV SL Ex	8 083	13 200	26 128
Total	1 052 242	1 658 058	3 073 820

Les débits injectés dans le modèle global et issus des modèles de thalwegs sont présentés sur les figures suivantes en fonction des périodes de retour.

F10

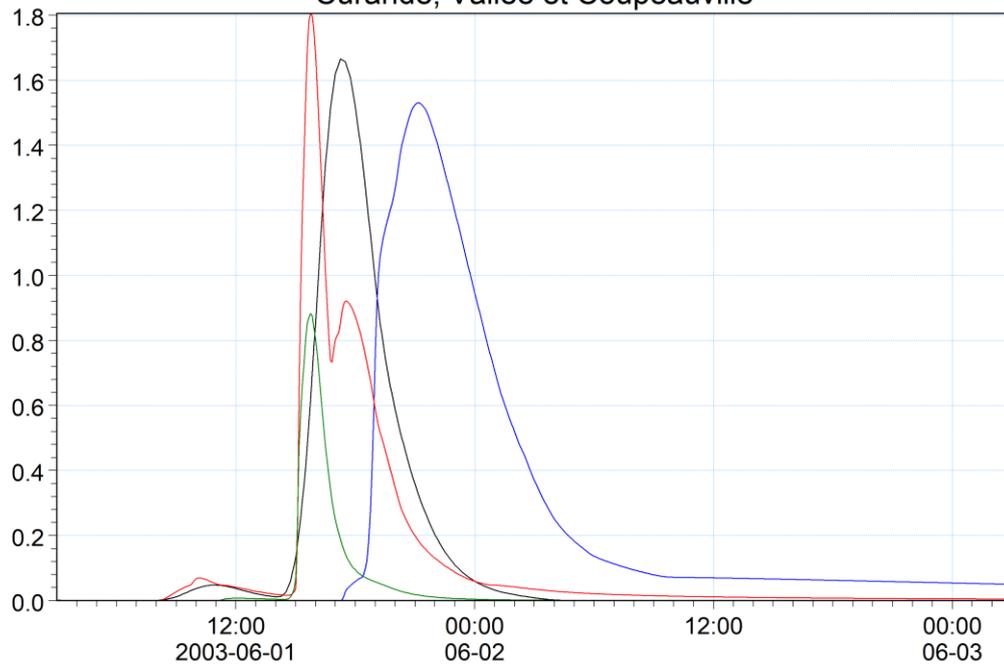
BV L1a [m³/s] —
 BV L1b [m³/s] —
 BV L1c [m³/s] —
 BV Manéglise [m³/s] —

Lézarde Nord



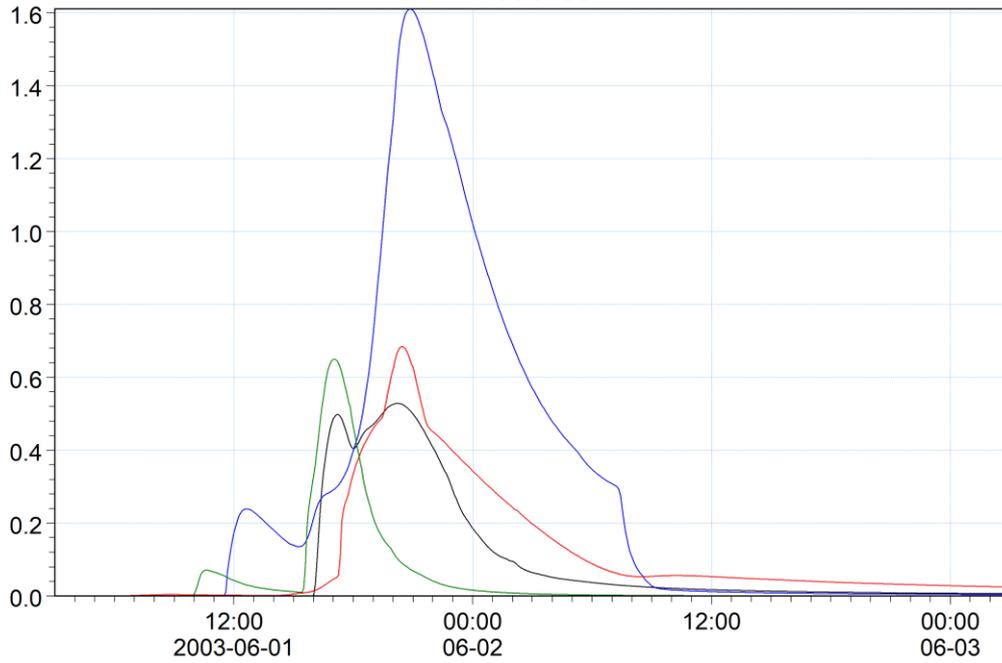
BV L6 [m³/s] —
 BV L7 [m³/s] —
 BV L3 [m³/s] —
 BV Calois 2 [m³/s] —

Curande, Vallée et Coupeville



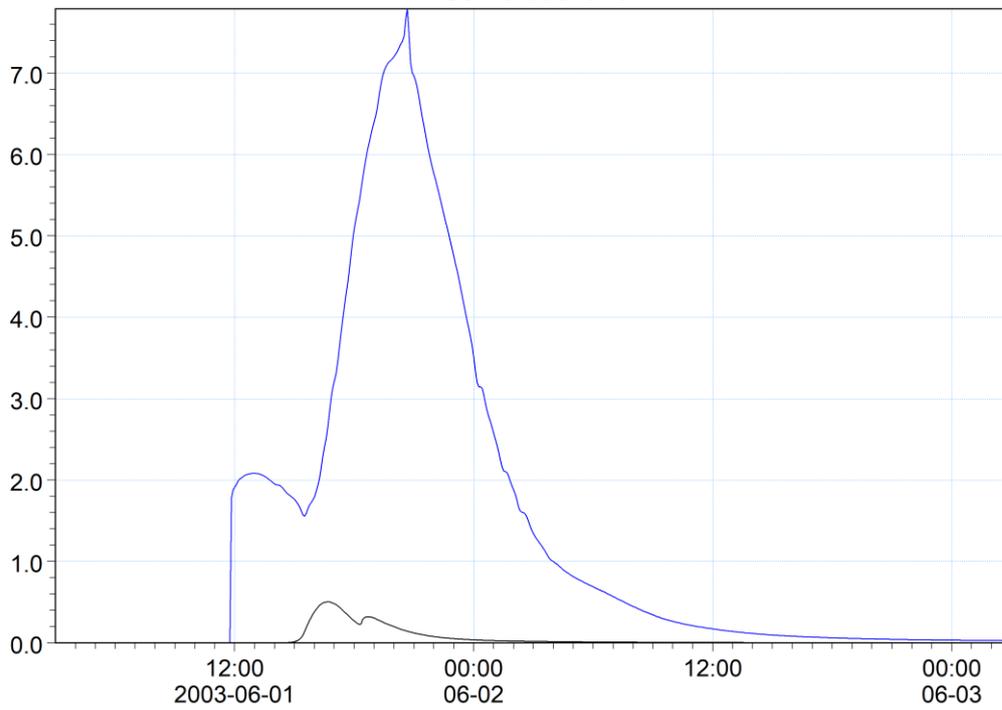
Bv L13a [m³/s] —
 Bv L13b [m³/s] —
 Bv L13c [m³/s] —
 Bv L13d [m³/s] —

Rouelles



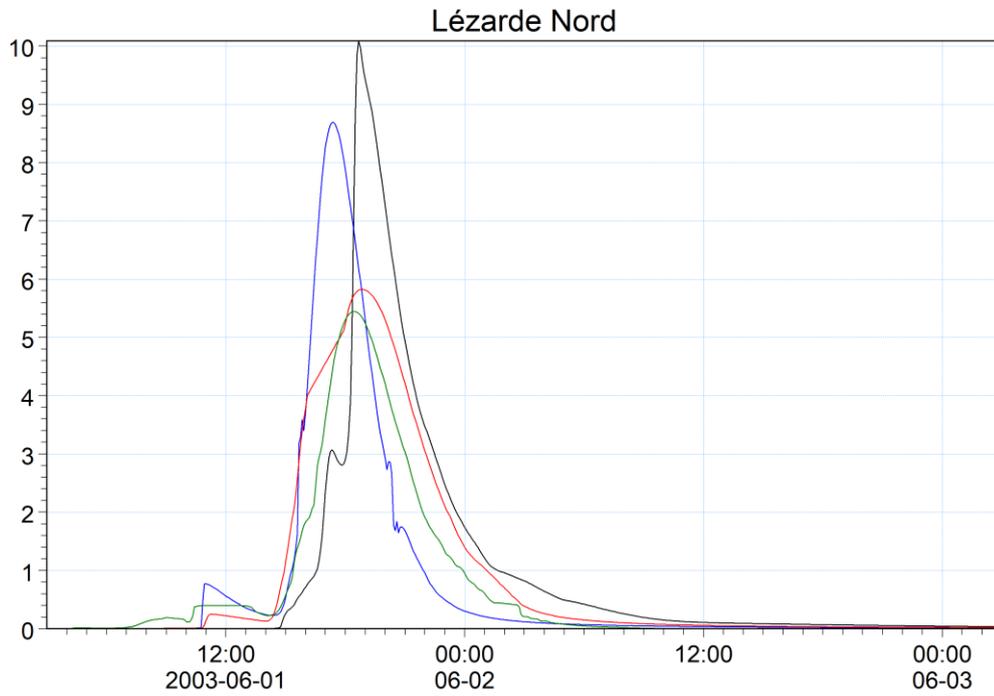
Bv L10 [m³/s] —
 Bv L11 [m³/s] —

Saint-Laurent

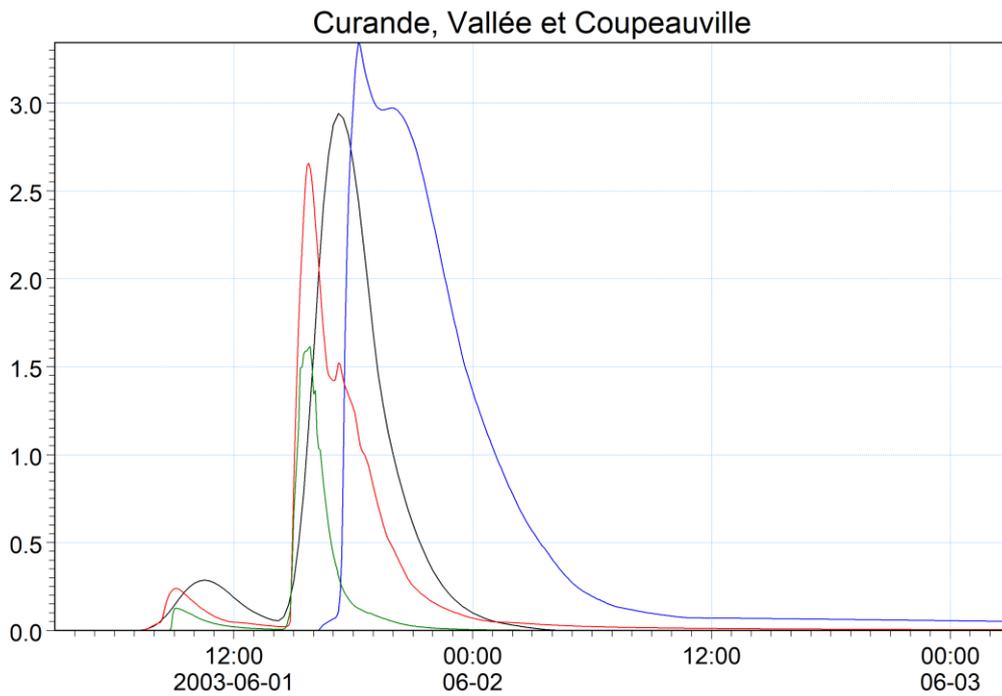


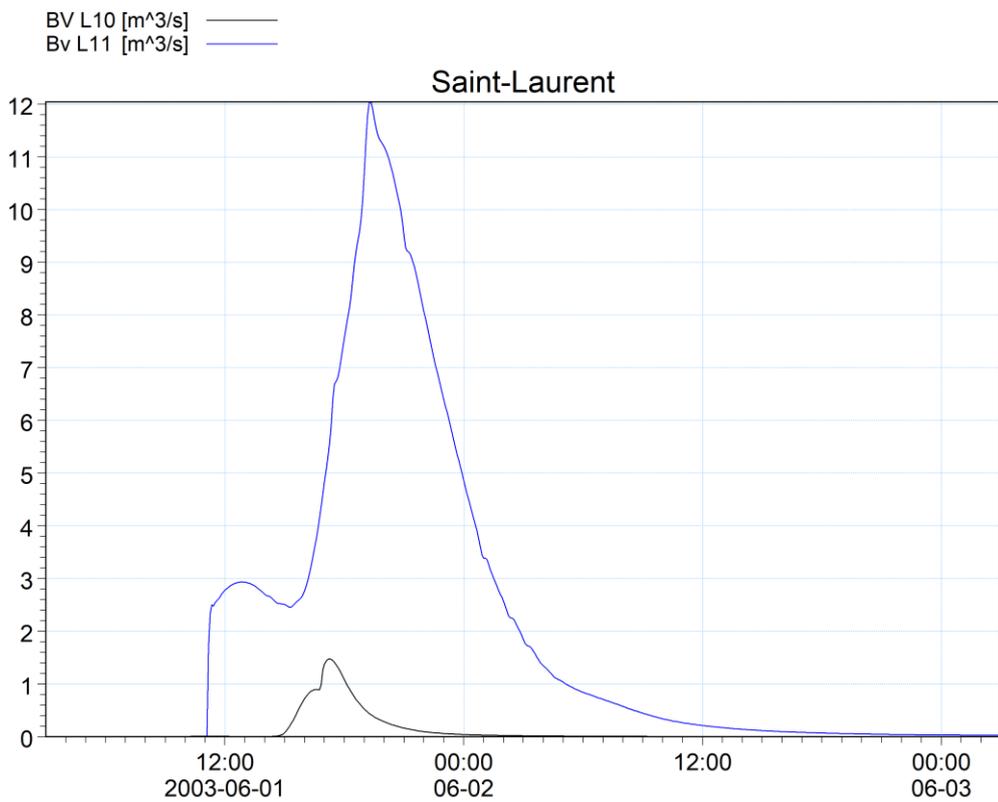
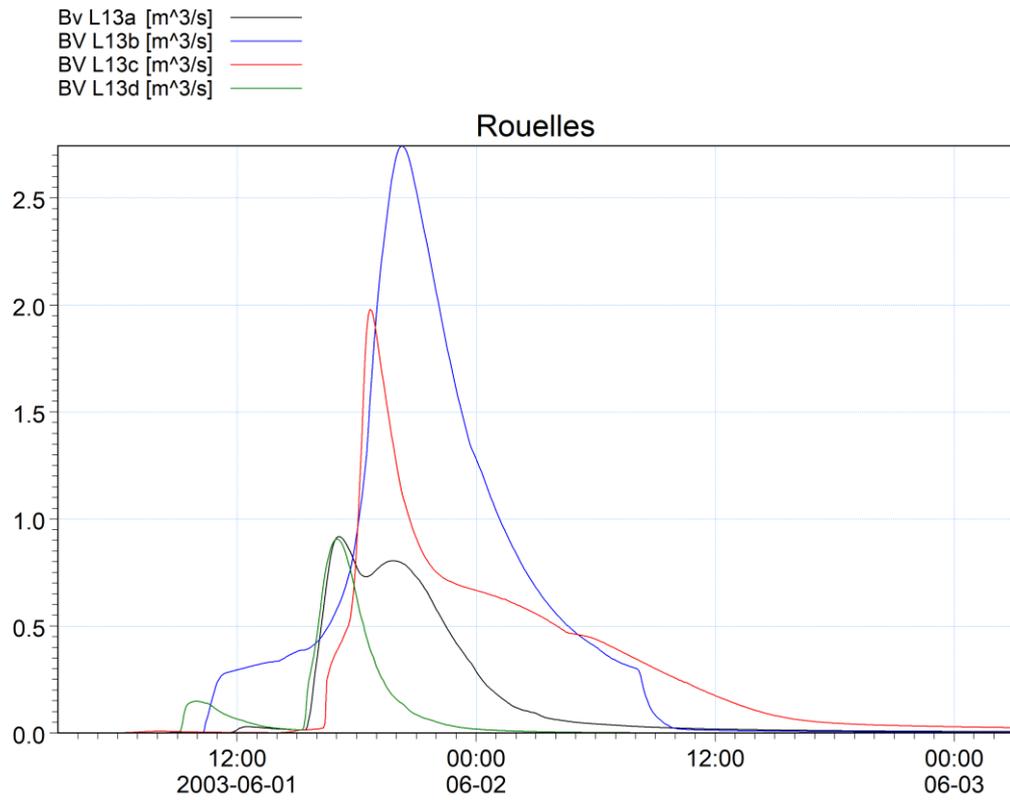
F50

BV L1a [m³/s] —
 BV L1b [m³/s] —
 BV L1c [m³/s] —
 BV Manéglise [m³/s] —



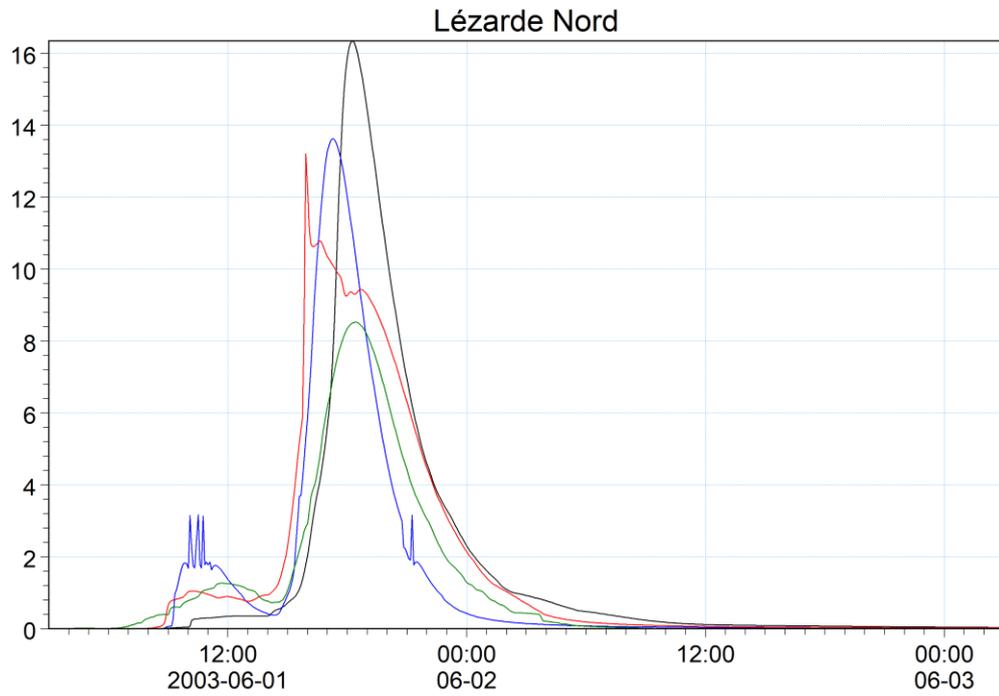
BV L6 [m³/s] —
 BV L7 [m³/s] —
 BV L3 [m³/s] —
 BV Calois 2 [m³/s] —



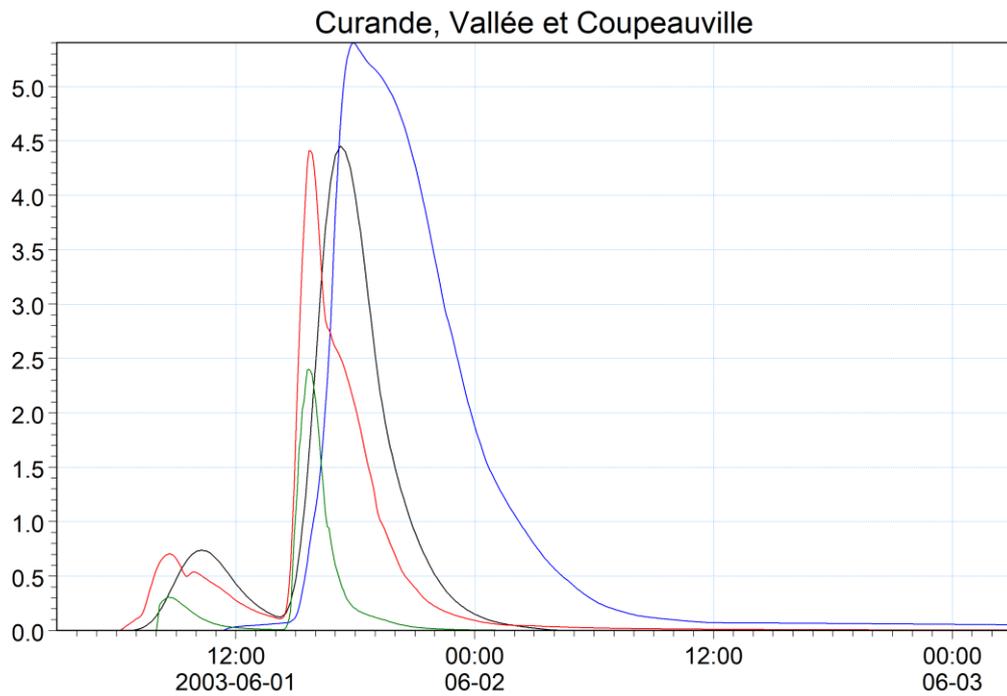


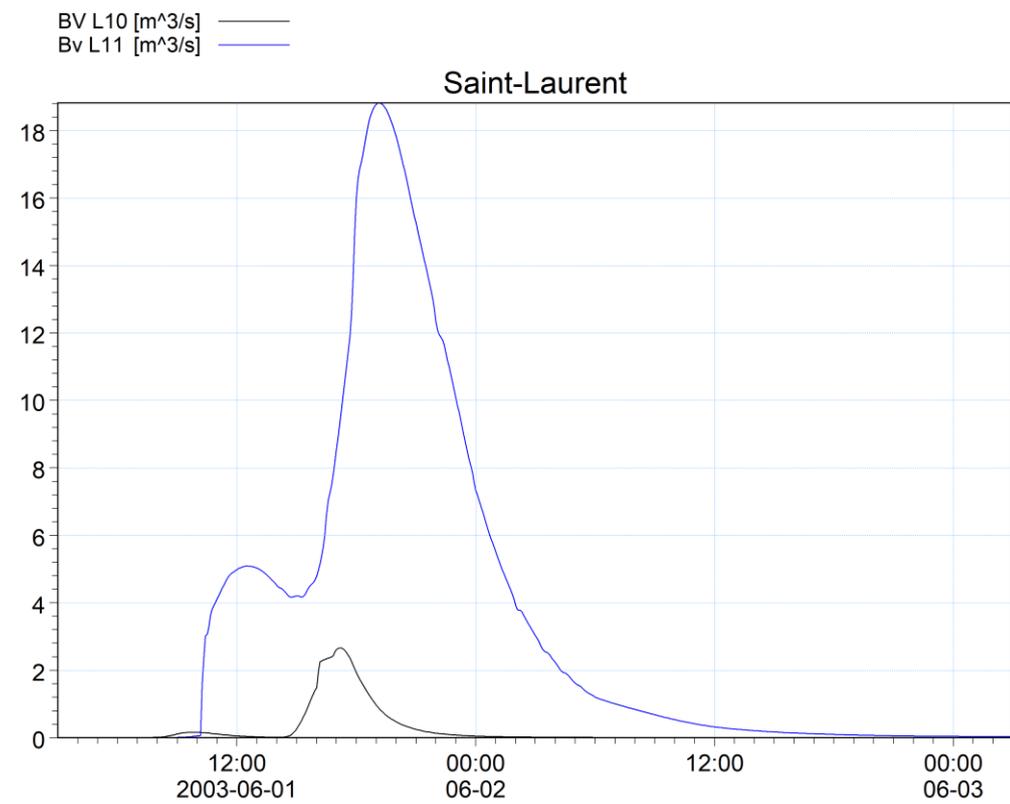
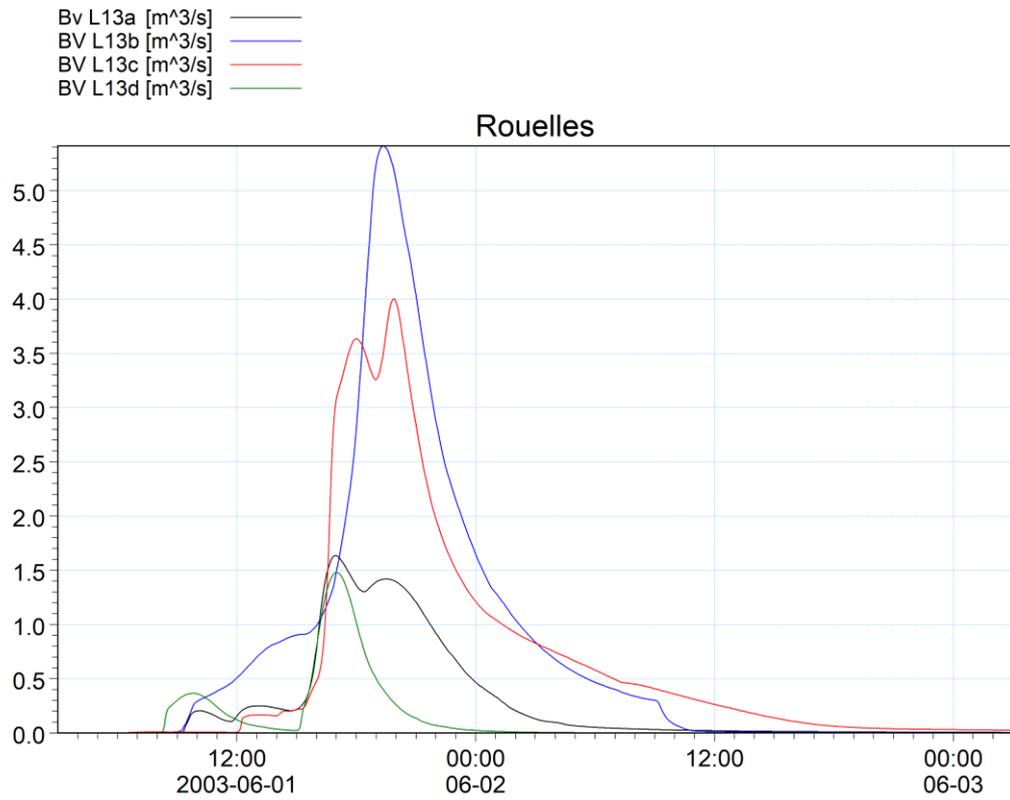
F100

BV L1a [m³/s] —
 BV L1b [m³/s] —
 BV L1c [m³/s] —
 BV Manéglise [m³/s] —



BV L6 [m³/s] —
 BV L7 [m³/s] —
 BV L3 [m³/s] —
 BV Calois 2 [m³/s] —





Scénario ref1

Le scénario ref1 est la modélisation de l'état actuel de la Lézarde et de son bassin versant. Elle comprend :

- La modélisation de tous les ouvrages de capacité supérieure à 5 000 m³ sur les thalwegs et la modélisation complète de la Lézarde issue de l'étude de 2006.
- La transformation pluie-débit à partir des pluies de projet construites à partir de l'événement de 2003 ;

L'occupation du sol actuelle basée sur les données OSCOM de 2016.

Les volumes ruisselés de chaque sous bassin versant sont présentés dans le tableau suivant.

Volumes ruisselés en m³ par sous bassin versant pour le scénario ref1.

Bassin versant	F10	F50	F100
CPV	20 691	31 707	57 156
BV1	9 170	14 051	25 329
BV2	11 522	17 656	31 827
CUR	74 015	119 222	227 842
BV 1 Chemin du Golf	15 290	23 949	44 655
BV 2 Bois Caulot	9 834	16 166	31 317
BV 3 Cavee Rouge	3 457	5 700	10 931
BV 4 Fontenay Amont	18 357	30 975	61 620
BV 5 Clinardiere	24 010	38 137	72 439
BV 6 Aval	3 067	4 296	6 879
LNA	91 342	149 256	289 979
BV10	14 346	23 535	45 996
BV11	13 858	22 163	42 690
BV13	14 990	24 591	46 529
BV14	4 216	6 783	12 444
BV15	9 675	16 111	32 502
BV16	6 621	11 026	22 243
BV17	6 089	10 370	22 043
BV18	1 808	3 303	7 424
BV20	5 114	8 251	15 019
BV21	9 580	14 656	26 149
BV22	3 268	5 293	10 506
BV23	1 777	3 173	6 433
LNB	67 745	109 673	211 177
BV1	10 129	16 151	30 714
BV2	10 355	16 922	31 654
BV3	4 902	7 988	15 551
BV4	10 601	16 954	31 970
BV5	783	1 222	2 250
BV6	6 426	10 161	19 431
BV7	15 945	24 722	46 240
BV8	5 552	10 165	22 230

BV9	3 052	5 388	11 136
LNC	86 611	142 174	278 794
BV10	11 631	19 420	38 778
BV11	3 973	6 815	13 527
BV12	2 383	4 540	10 061
BV13	2 130	3 938	8 540
BV20	25 977	41 288	79 207
BV30	4 814	7 938	14 762
BV31	3 627	6 040	12 184
BV40	14 695	24 015	46 328
BV50	6 884	11 754	24 683
BV60	8 105	12 442	22 686
BV61	2 392	3 984	8 037
LND	60 020	98 084	191 120
BV1	20 680	33 387	66 947
BV2	31 820	53 505	103 753
BV3	7 520	11 192	20 420
ROU	115 716	207 580	392 217
BV R Ex	3 229	14 678	30 437
BV01	7 639	13 145	24 775
BV02	2 525	4 344	7 926
BV03	9 043	14 340	24 293
BV04	1 782	3 309	5 497
BV05	6 057	9 778	16 848
BV06	1 782	3 111	5 562
BV07	930	1 880	3 430
BV08	2 861	5 944	11 346
BV09	805	1 918	4 442
BV10	2 975	5 404	10 315
BV11	2 949	5 728	11 527
BV12	7 037	11 360	20 164
BV13	2 280	3 837	8 011
BV21	1 082	2 098	3 828
BV22	8 849	15 623	29 131
BV23	4 350	7 901	15 081
BV24	2 548	4 749	10 558
BV31	9 484	16 981	30 982
BV32	36 809	53 071	89 907
BV33	522	4 250	9 448
BV41	178	4 130	18 709
STL	297 197	434 695	770 598
BV10	152 061	194 987	280 085
BV11	15 055	25 000	50 974
BV12	22 630	42 285	87 749
BV13	27 381	45 688	126 361
BV20	6 118	9 624	16 163

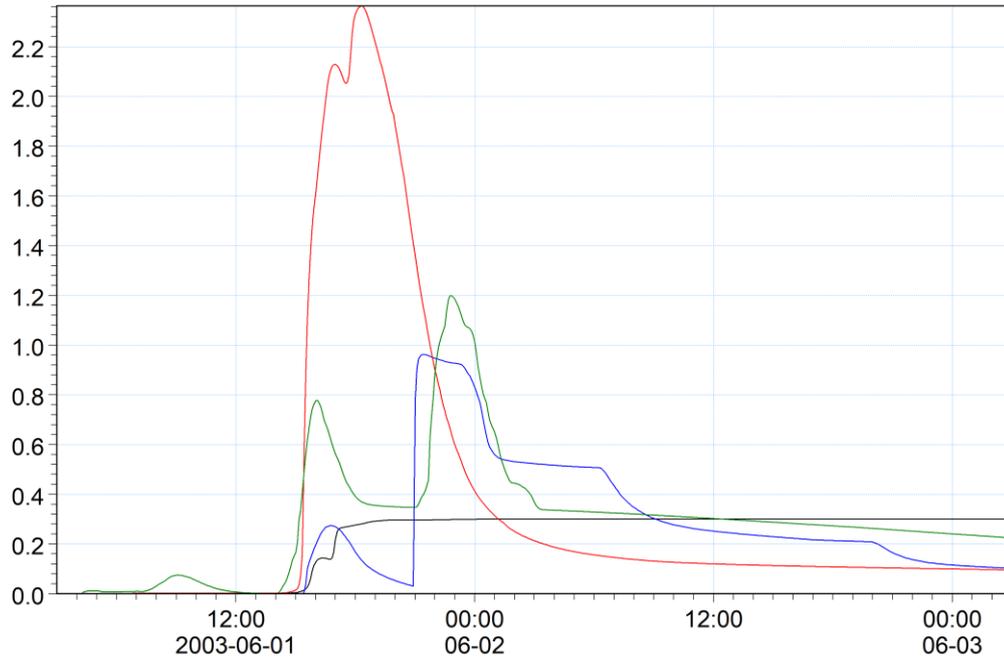
BV21	18 263	28 548	48 523
BV30	22 190	34 319	63 477
BV31	14 906	25 001	43 984
BV40	7 414	11 944	20 890
BV41	5 556	9 964	21 355
BV50	5 624	7 336	11 038
VAL	5 661	11 173	17 471
BV1	4 948	9 363	14 358
BV2	713	1 809	3 113
LEZ	233 246	354 495	637 466
BV Calois	6 843	11 123	22 422
BV DIREN	14 430	20 131	32 401
BV EPOUVIL	9 342	16 148	32 160
BV Ex	12 026	16 724	26 462
BV Ex 0	8 578	11 499	17 956
BV GOURNAY	11 169	16 033	27 342
BV L1	8 877	14 012	27 385
BV L12	13 091	21 452	41 997
BV L14	35 746	54 912	100 187
BV L2	11 516	19 365	37 550
BV L3	20 692	31 707	57 156
BV L4	3 138	4 502	7 417
BV L5	7 919	11 627	19 898
BV L8	33 647	49 950	87 620
BV L9	14 399	19 699	31 599
BV R Ex	13 751	22 410	41 786
BV SL Ex	8 083	13 200	26 128
Total	1 052 242	1 658 058	3 073 820

Les débits injectés dans le modèle global et issus des modèles de thalwegs sont présentés sur les figures suivantes en fonction des périodes de retour.

F10

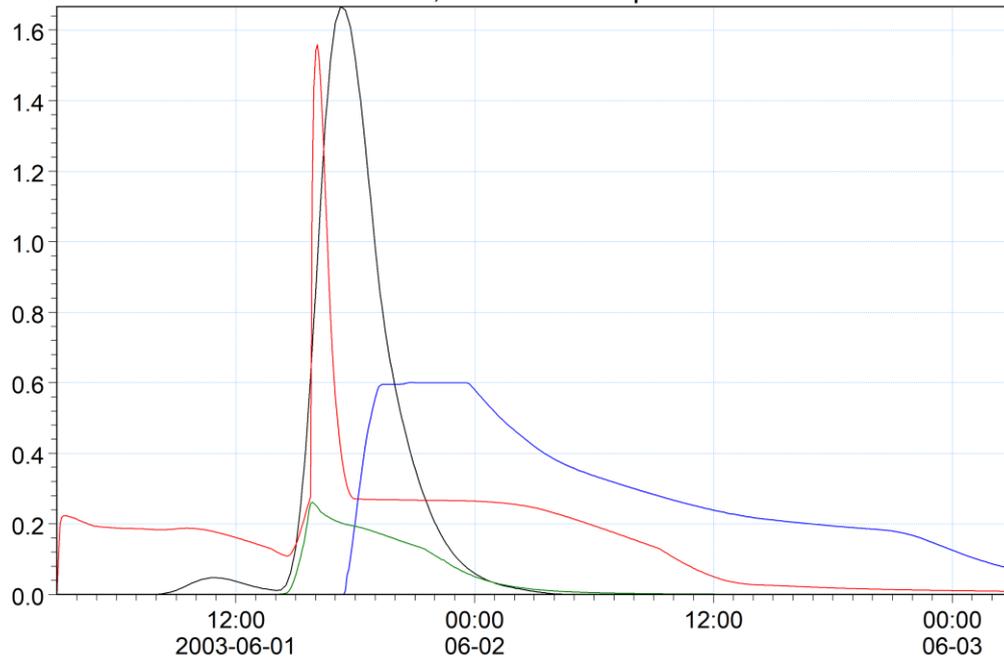
BV L1a [m³/s] —
 BV L1b [m³/s] —
 BV L1c [m³/s] —
 BV Manéglise [m³/s] —

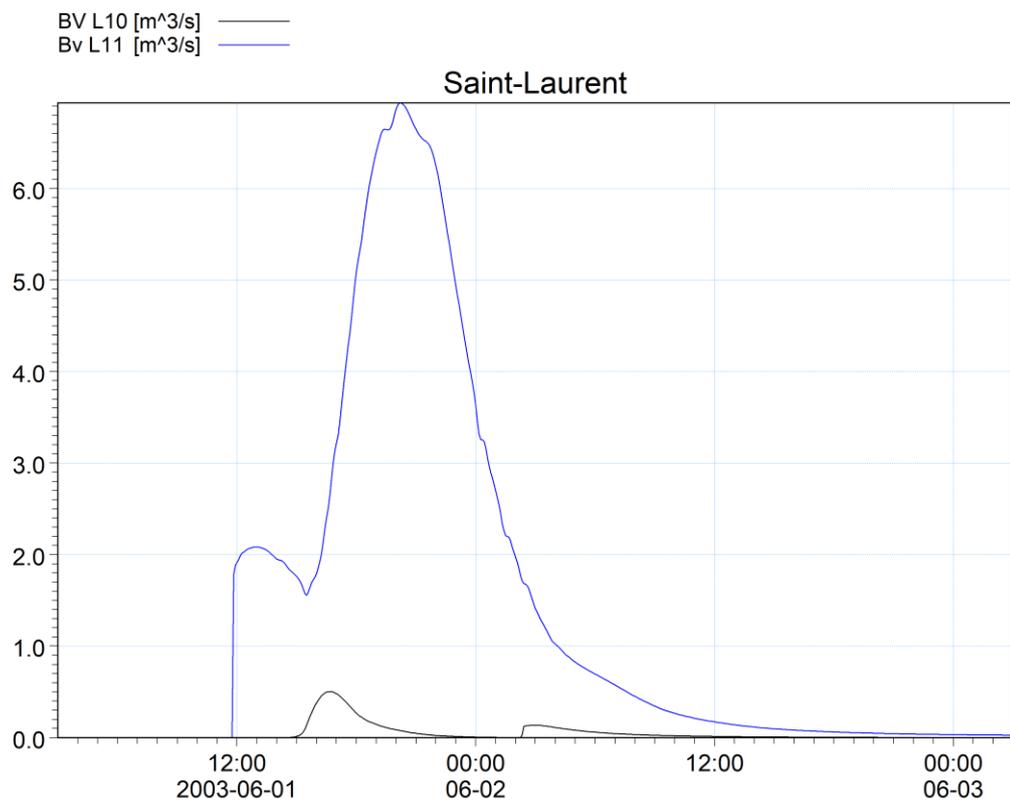
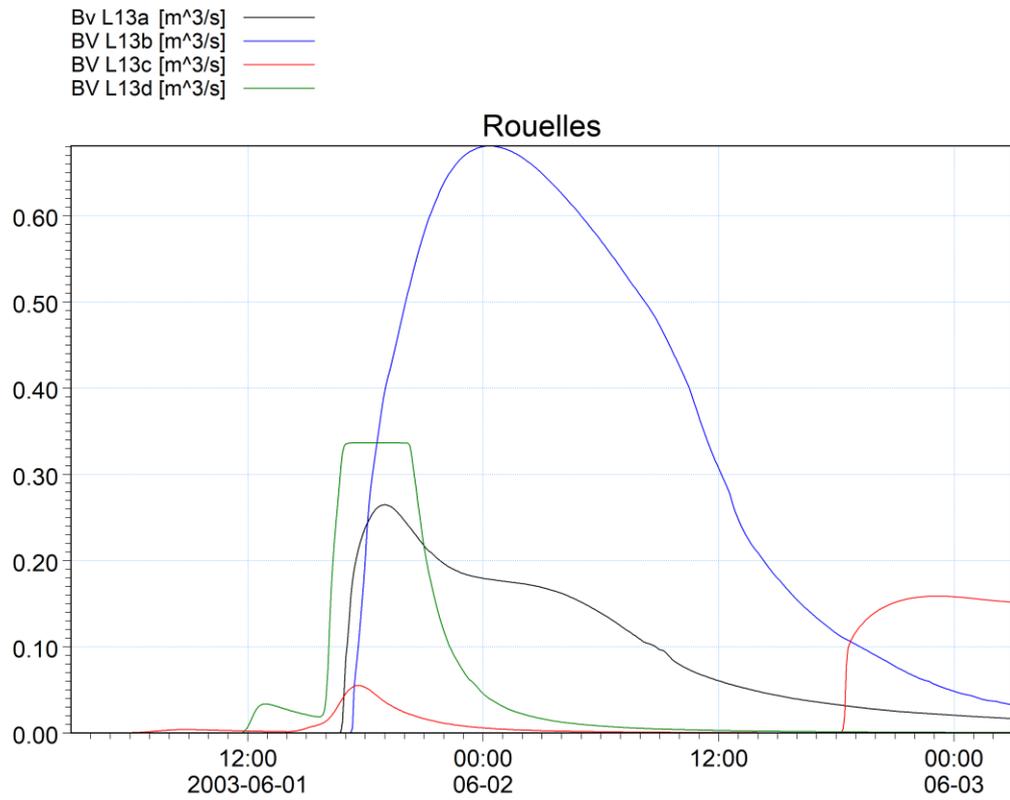
Lézarde Nord



BV L6 [m³/s] —
 BV L7 [m³/s] —
 BV L3 [m³/s] —
 BV Calois 2 [m³/s] —

Curande, Vallée et Coupeville

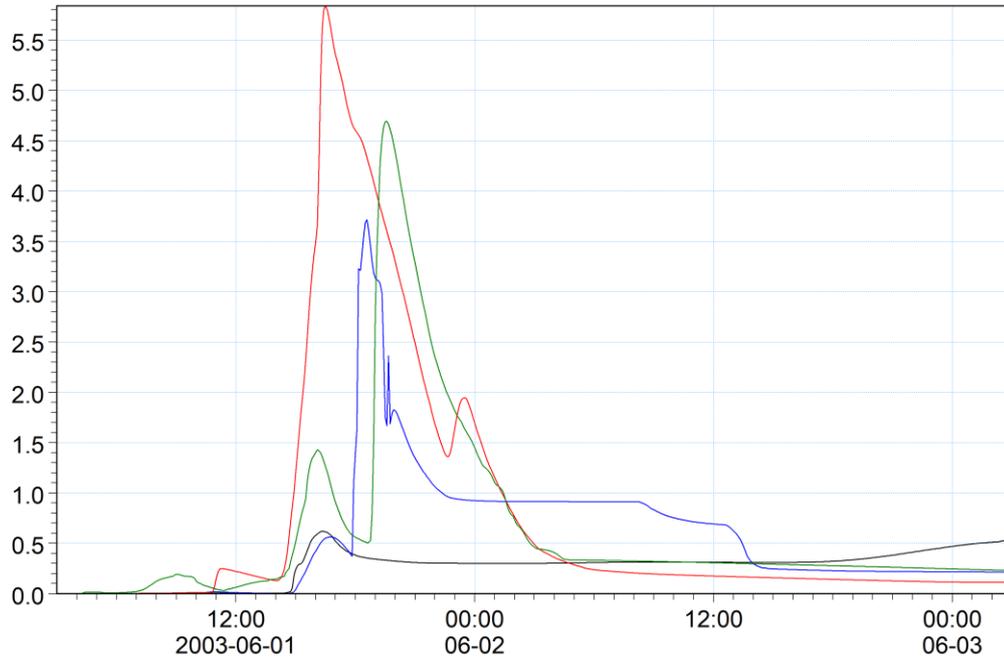




F50

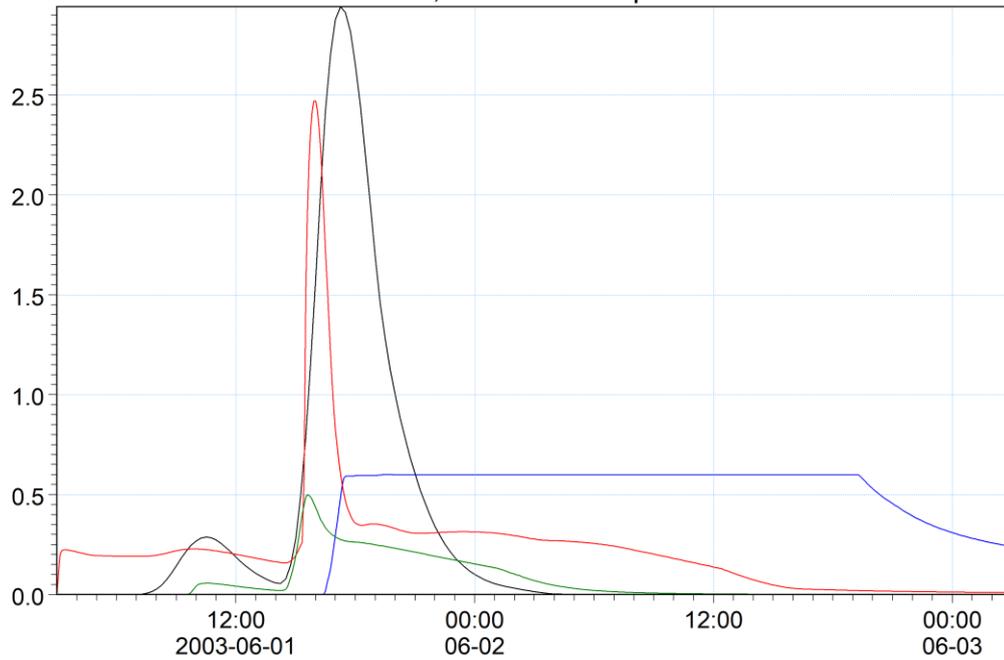
BV L1a [m³/s] —
 BV L1b [m³/s] —
 BV L1c [m³/s] —
 BV Manéglise [m³/s] —

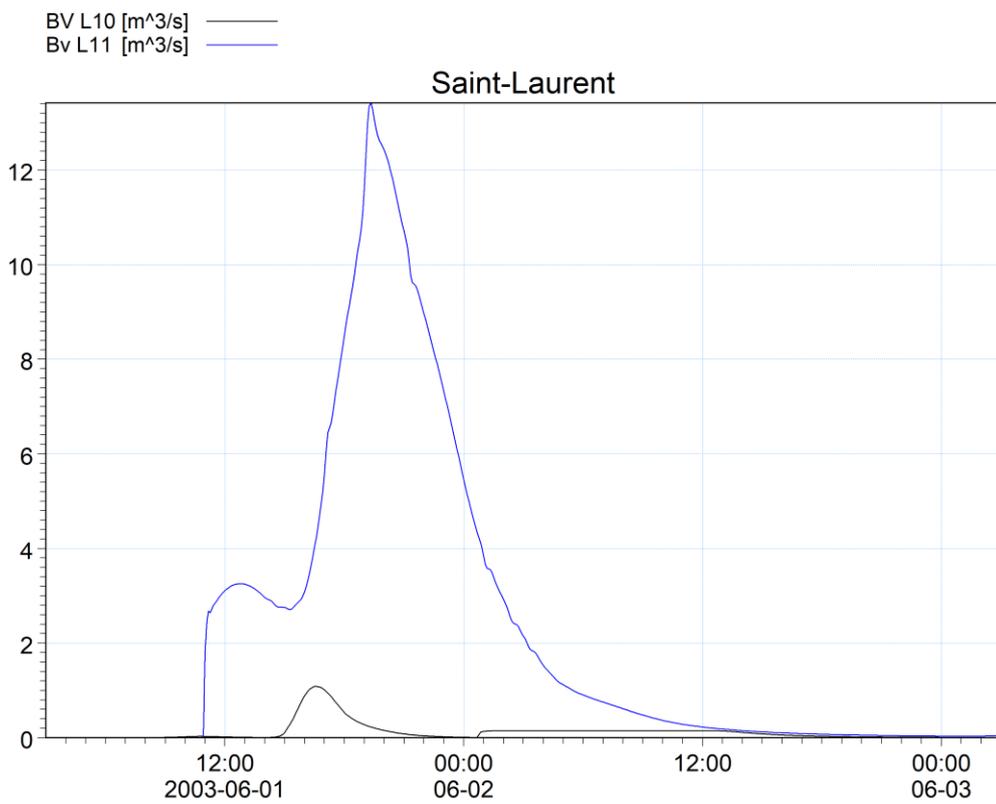
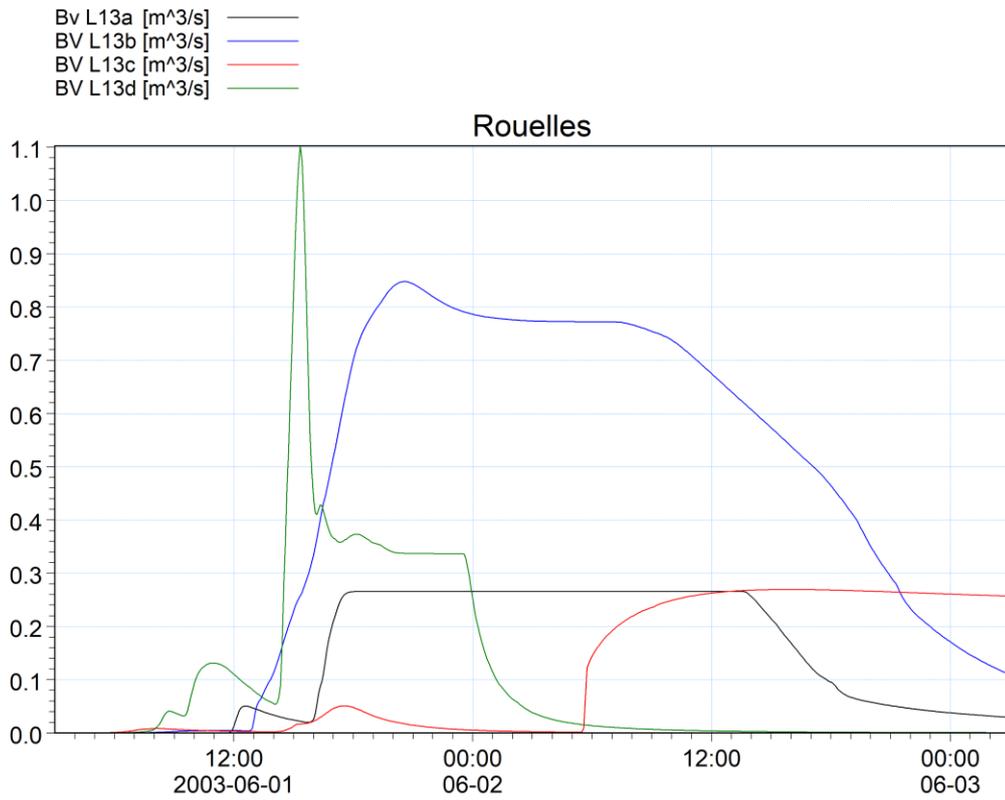
Lézarde Nord



BV L6 [m³/s] —
 BV L7 [m³/s] —
 BV L3 [m³/s] —
 BV Calois 2 [m³/s] —

Curande, Vallée et Coupeville

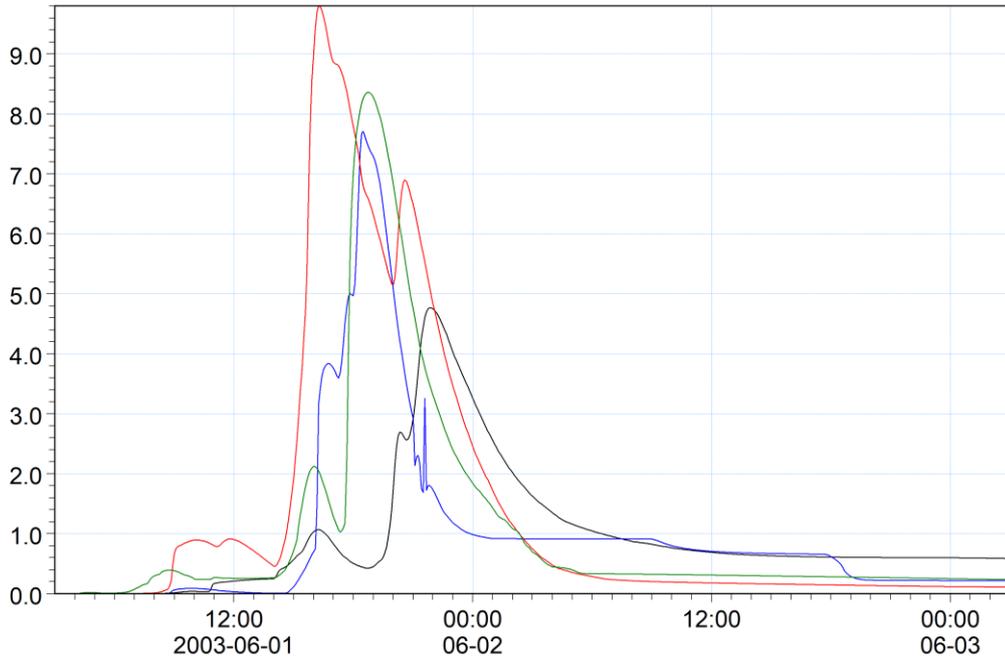




F100

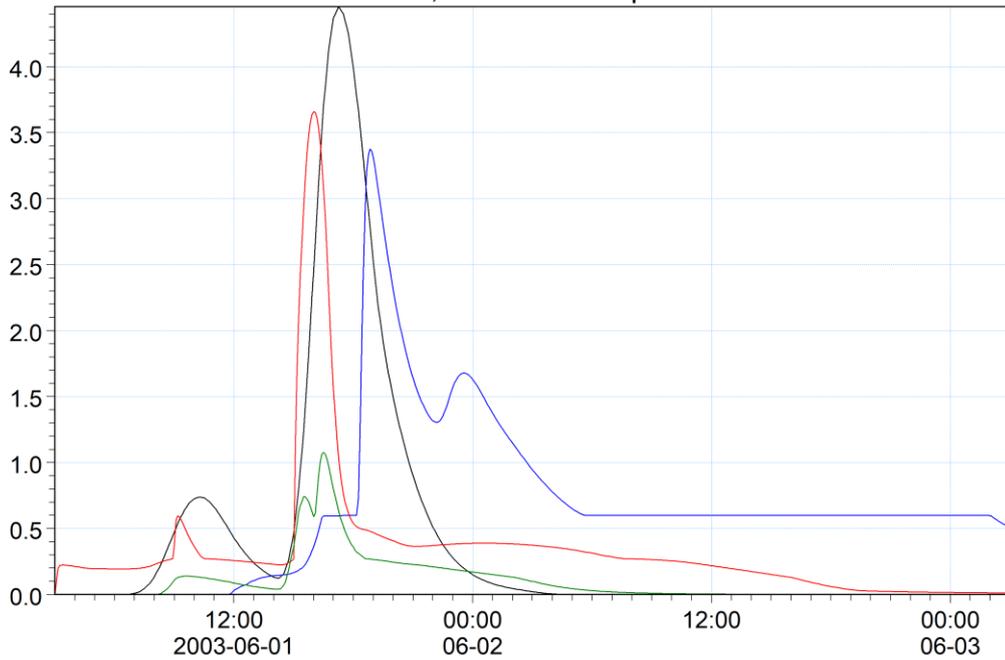
BV L1a [m³/s] —
 BV L1b [m³/s] —
 BV L1c [m³/s] —
 BV Manéglise [m³/s] —

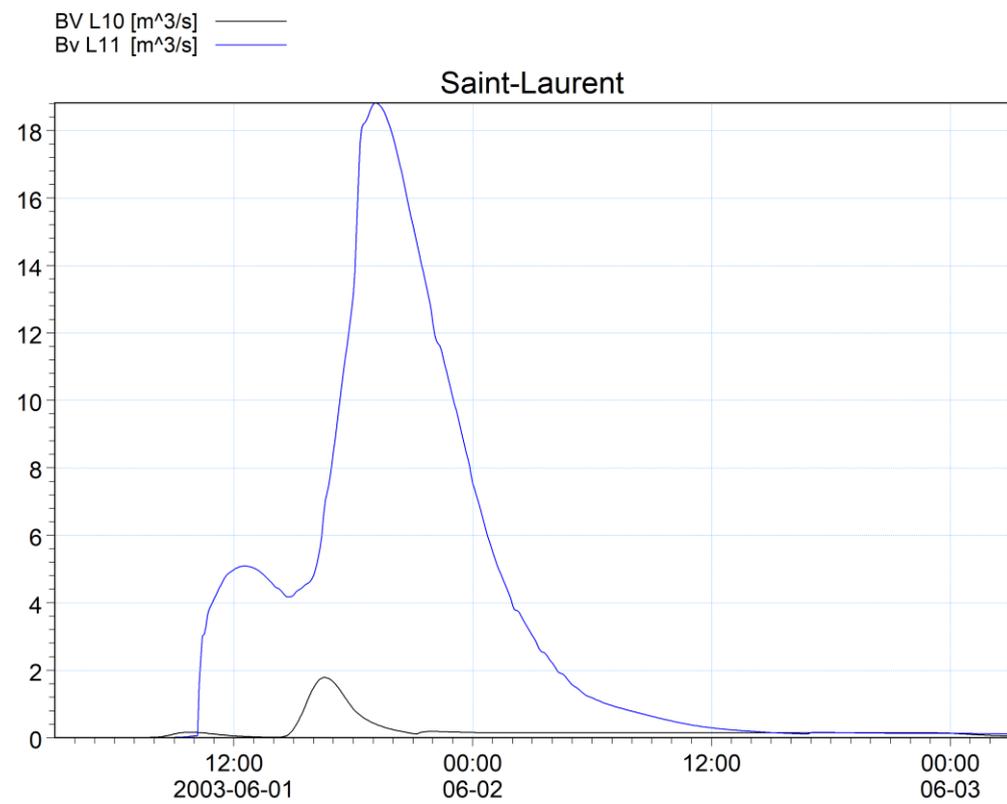
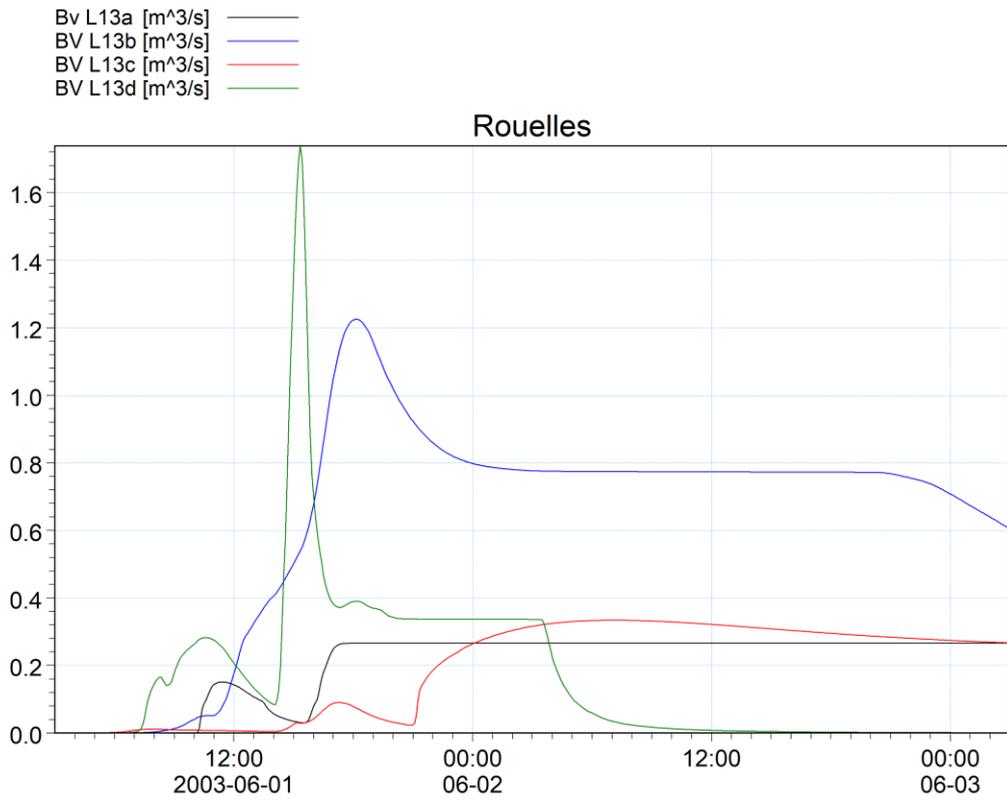
Lézarde Nord



BV L6 [m³/s] —
 BV L7 [m³/s] —
 BV L3 [m³/s] —
 BV Calois 2 [m³/s] —

Curande, Vallée et Coupeville





Scénario herb

Le scénario herb est la modélisation d'un état prospectif de la Lézarde et de son bassin versant où le nombre de prairie est réduit. Les hypothèses sont :

- La modélisation de tous les ouvrages de capacité supérieure à 5 000 m³ sur les thalwegs et la modélisation complète de la Lézarde issue de l'étude de 2006.
- La transformation pluie-débit à partir des pluies de projet construites à partir de l'événement de 2003 ;
- L'occupation du sol est modifiée par rapport à la situation du scénario 2 où un tiers des prairies sont transformées en culture.

Les volumes ruisselés de chaque sous bassin versant sont présentés dans le tableau suivant.

Volumes ruisselés en m³ par sous bassin versant pour le scénario herb.

Bassin versant	F10	F50	F100
CPV	21 968	33 328	59 410
BV1	9 170	14 051	25 329
BV2	12 798	19 277	34 081
CUR	81 175	128 605	241 399
BV 1 Chemin du Golf	15 290	23 949	44 655
BV 2 Bois Caulot	11 136	17 882	33 804
BV 3 Cavee Rouge	3 457	5 700	10 931
BV 4 Fontenay Amont	20 948	34 435	66 709
BV 5 Clinardiere	27 019	42 031	78 020
BV 6 Aval	3 326	4 608	7 280
LNA	103 785	165 714	314 081
BV10	18 079	28 423	53 066
BV11	13 858	22 163	42 690
BV13	16 880	27 081	50 090
BV14	4 710	7 428	13 350
BV15	10 984	17 849	35 077
BV16	7 517	12 215	24 006
BV17	7 992	12 903	25 872
BV18	2 459	4 198	8 816
BV20	5 703	9 022	16 097
BV21	9 580	14 656	26 149
BV22	3 690	5 846	11 318
BV23	2 332	3 931	7 550
LNB	81 061	127 133	236 396
BV1	11 324	17 702	32 938
BV2	12 978	20 351	36 497
BV3	5 514	8 792	16 720
BV4	13 136	20 232	36 619
BV5	868	1 332	2 405
BV6	8 001	12 184	22 324
BV7	17 742	27 018	49 503
BV8	7 458	12 795	26 263

BV9	4 039	6 727	13 127
LNC	100 253	160 250	328 133
BV10	13 177	21 475	41 807
BV11	5 141	8 378	15 805
BV12	3 301	5 828	12 044
BV13	2 851	4 937	10 067
BV20	29 091	45 322	85 021
BV30	5 400	8 714	15 861
BV31	4 118	6 691	13 149
BV40	16 501	26 390	49 763
BV50	8 991	14 563	28 904
BV60	8 967	13 538	24 220
BV61	2 716	4 414	8 674
BV70			22 819
LND	72 306	112 084	214 501
BV1	23 402	36 940	72 195
BV2	40 635	62 601	120 579
BV3	8 269	12 544	21 727
ROU	143 742	225 471	411 031
BV R Ex	5 340	14 678	30 437
BV01	9 534	14 388	26 546
BV02	3 151	4 755	8 501
BV03	10 900	15 510	25 857
BV04	2 182	3 309	5 497
BV05	7 354	10 604	17 964
BV06	2 208	3 394	5 953
BV07	1 178	1 880	3 430
BV08	3 714	5 944	11 346
BV09	1 394	2 500	5 358
BV10	3 806	5 962	11 117
BV11	4 420	7 074	13 502
BV12	7 769	11 360	20 164
BV13	2 961	4 738	9 362
BV21	1 366	2 098	3 828
BV22	11 174	17 164	31 316
BV23	6 234	9 576	17 472
BV24	3 513	6 090	12 628
BV31	11 880	18 586	33 229
BV32	40 341	57 403	95 699
BV33	3 144	1 208	3 118
BV41	178	7 251	18 709
STL	322 002	467 588	819 166
BV10	157 012	201 034	288 086
BV11	17 130	27 748	55 072
BV12	30 190	52 842	103 494
BV13	30 927	50 404	134 694

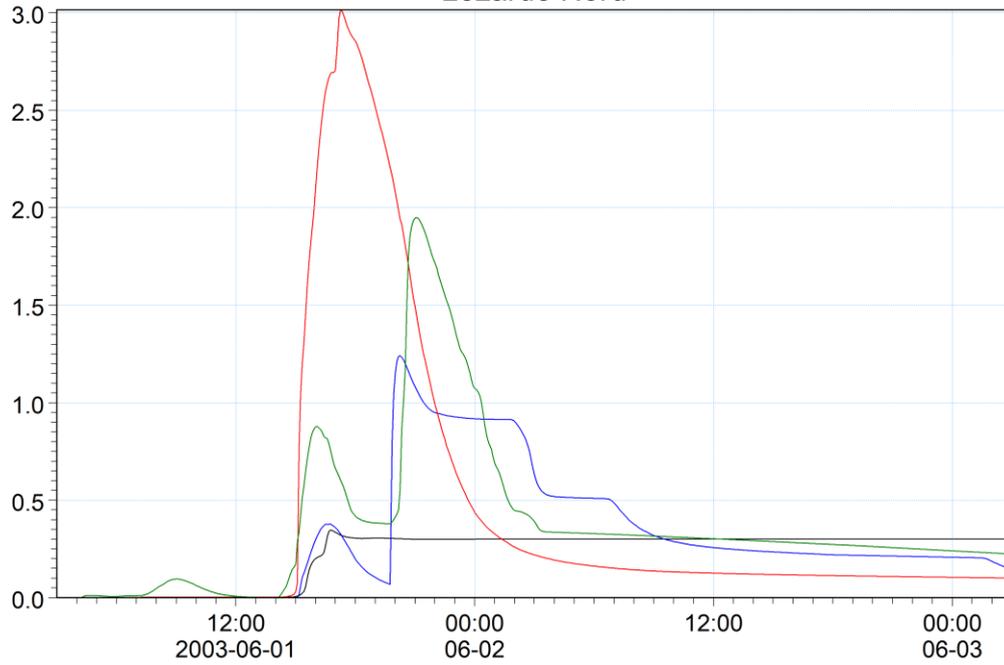
BV20	6 783	10 480	17 307
BV21	20 305	31 171	52 054
BV30	22 190	34 319	63 477
BV31	16 942	27 713	47 707
BV40	7 414	11 944	20 890
BV41	7 486	12 596	25 348
BV50	5 624	7 336	11 038
VAL	6 538	12 484	19 172
BV1	5 544	10 215	15 441
BV2	994	2 269	3 731
LEZ	254 911	382 161	676 234
BV Calois	7 754	12 316	24 189
BV DIREN	15 664	21 613	34 315
BV EPOUVIL	10 680	17 959	34 824
BV Ex	13 033	17 929	27 996
BV Ex 0	8 578	11 499	17 956
BV GOURNAY	11 169	16 033	27 342
BV L1	9 977	15 431	29 451
BV L12	16 747	26 232	48 912
BV L14	35 746	54 912	100 187
BV L2	13 060	21 425	40 537
BV L3	22 983	34 618	61 203
BV L4	3 421	4 847	7 871
BV L5	8 698	12 593	21 197
BV L8	37 148	54 318	93 591
BV L9	15 624	21 154	33 471
BV R Ex	15 433	24 621	44 921
BV SL Ex	9 196	14 661	28 270
Total	1 187 741	1 814 818	3 319 524

Les débits injectés dans le modèle global et issus des modèles de thalwegs sont présentés sur les figures suivantes en fonction des périodes de retour.

F10

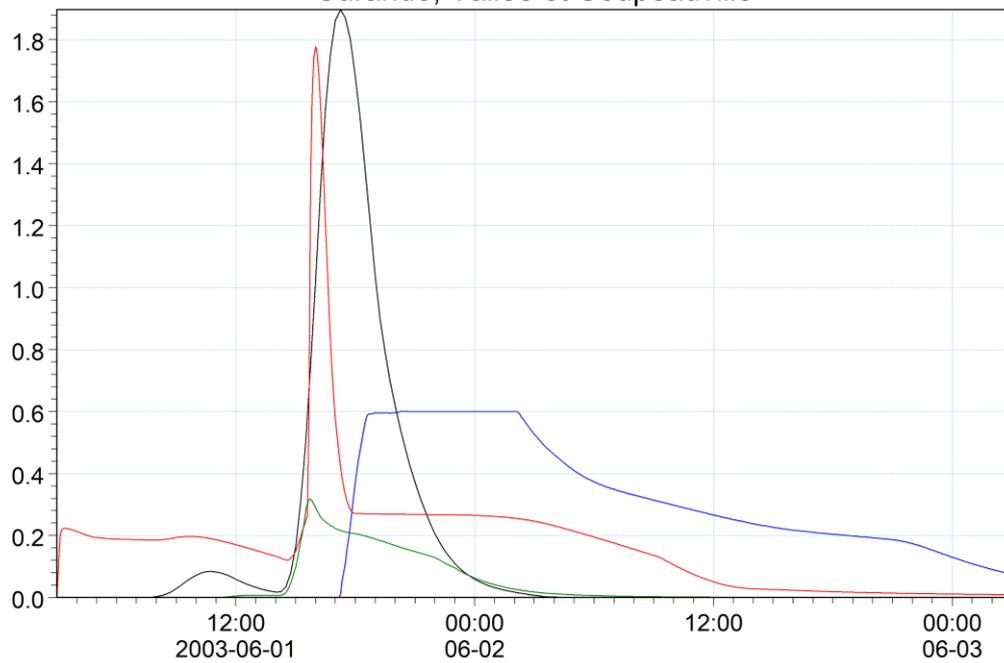
BV L1a [m³/s] —
 BV L1b [m³/s] —
 BV L1c [m³/s] —
 BV Manéglise [m³/s] —

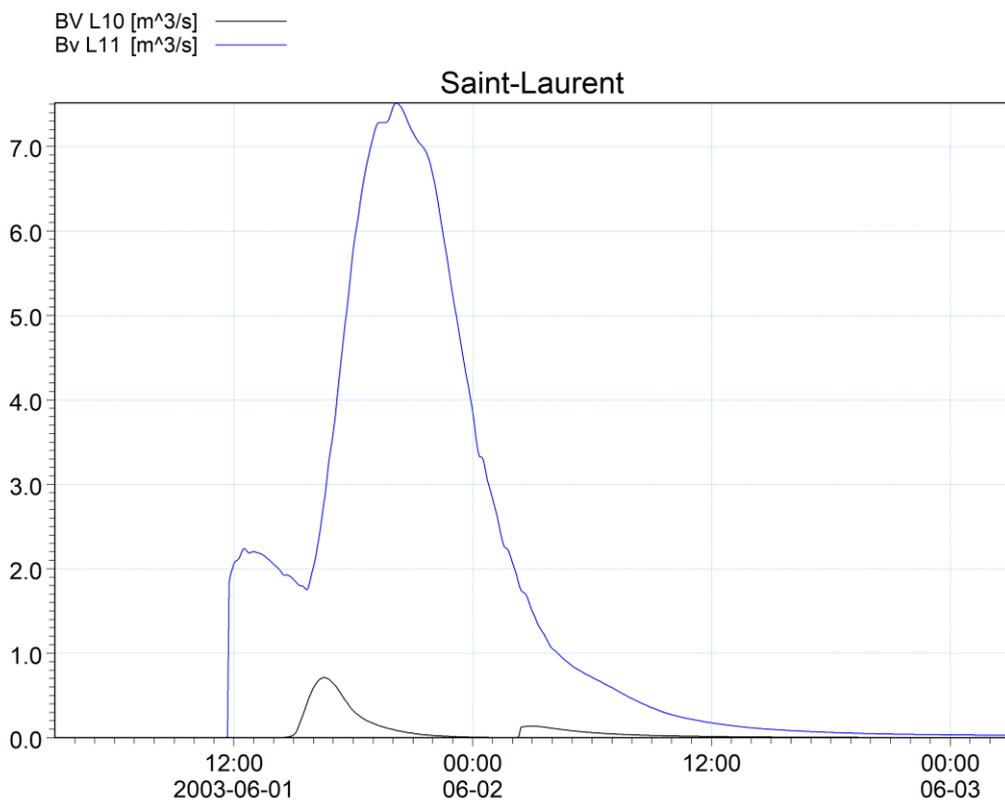
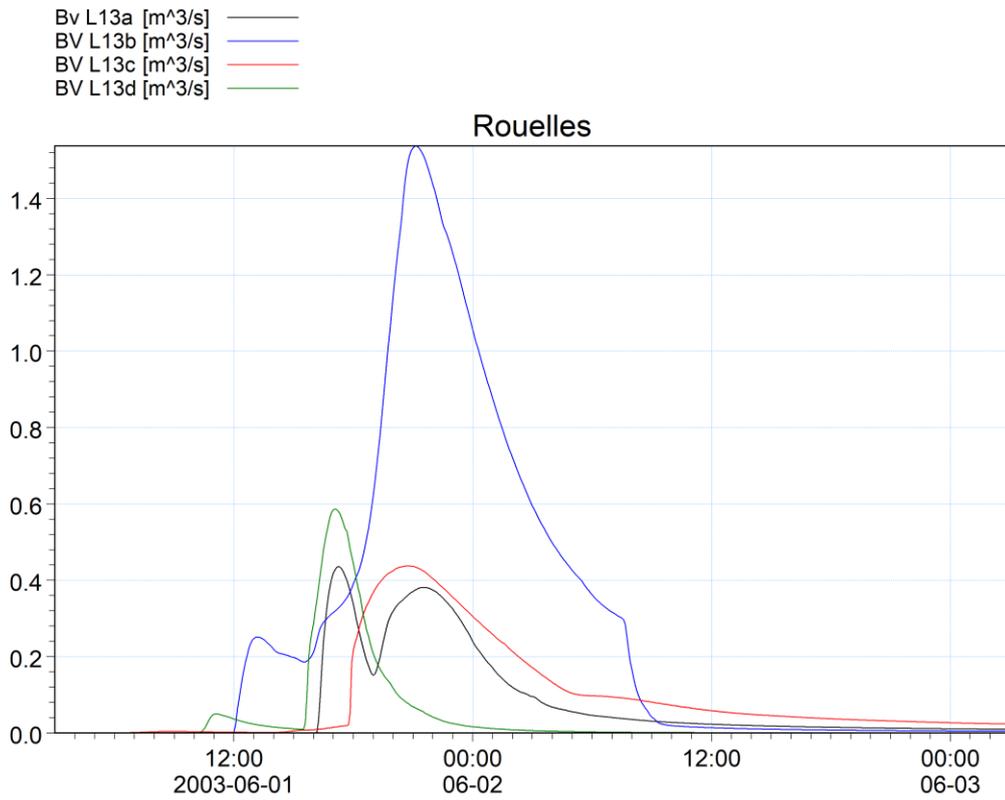
Lézarde Nord



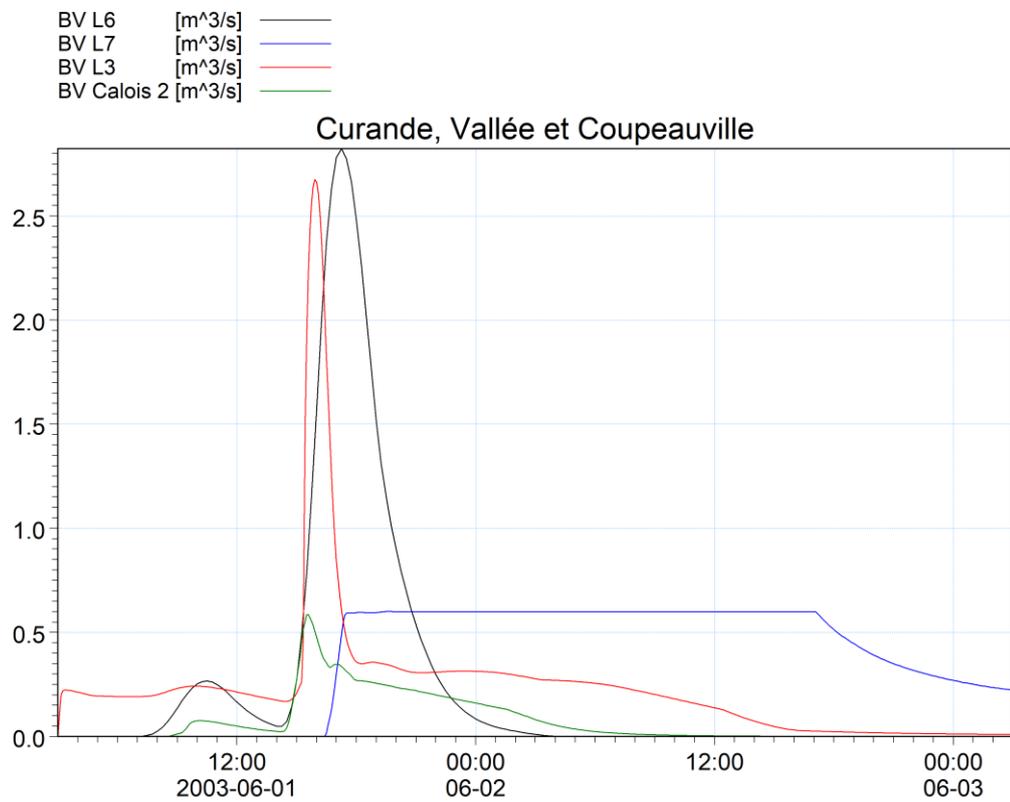
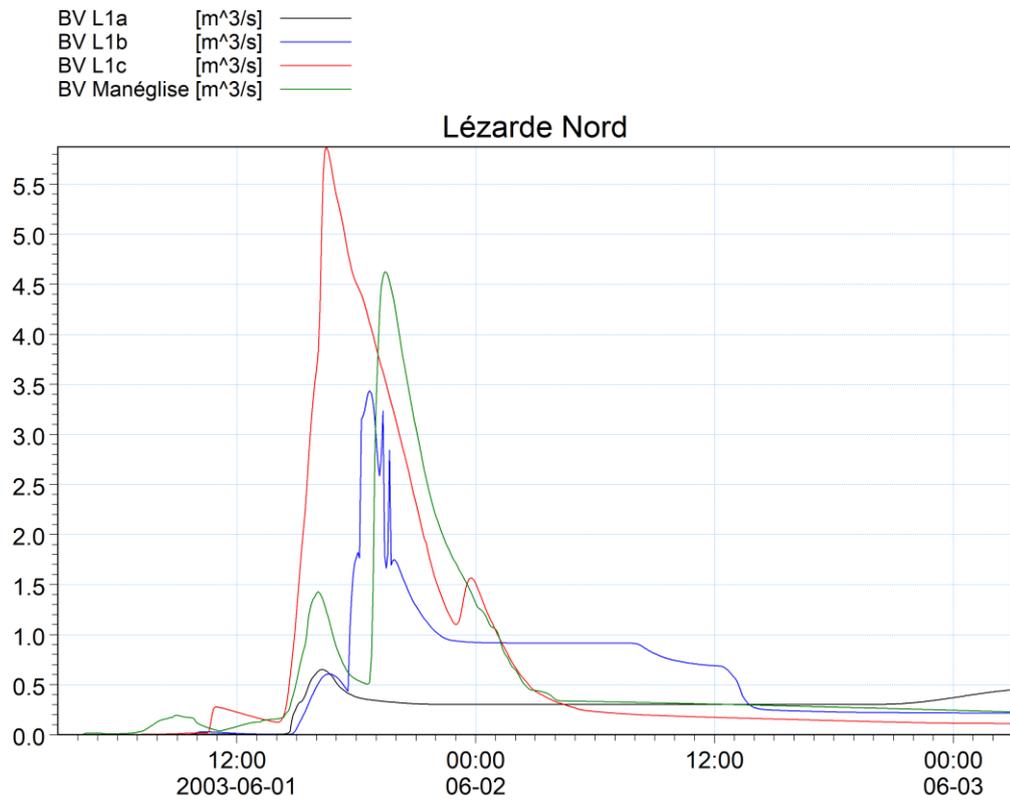
BV L6 [m³/s] —
 BV L7 [m³/s] —
 BV L3 [m³/s] —
 BV Calois 2 [m³/s] —

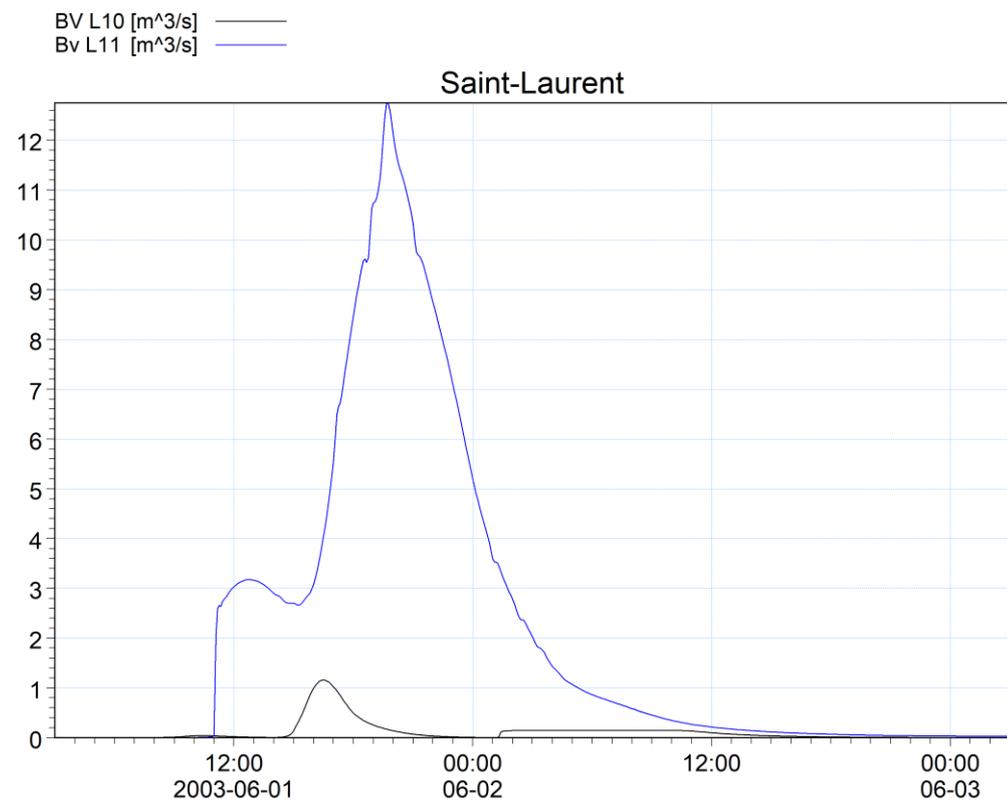
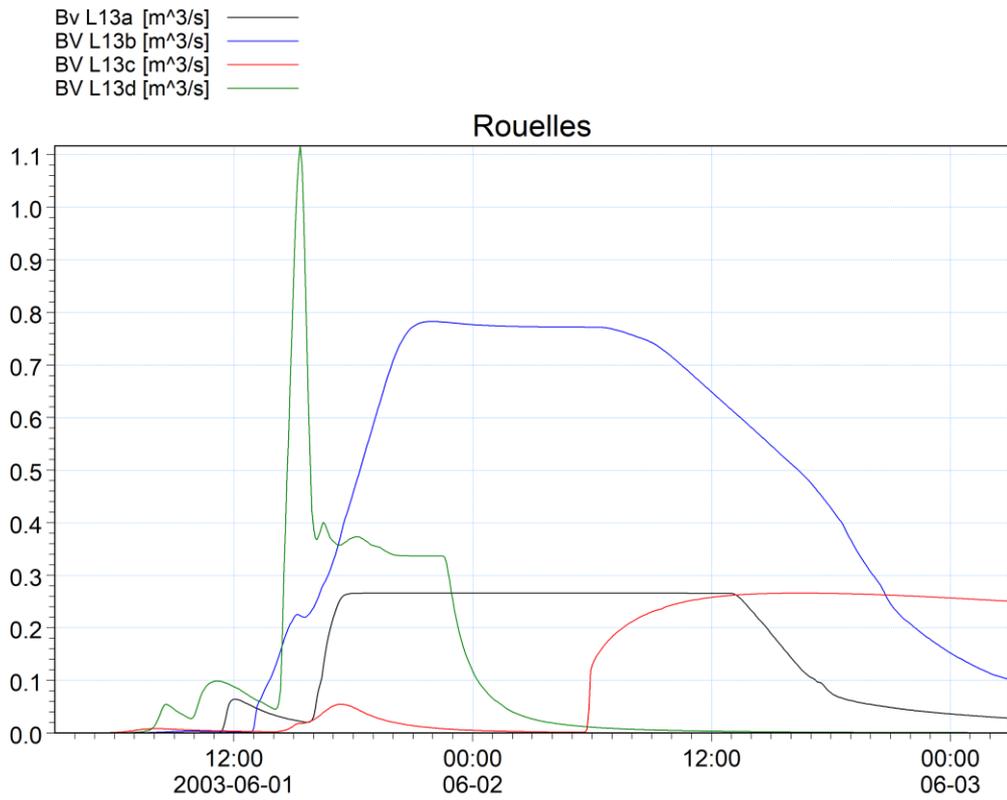
Curande, Vallée et Coupeville





F50

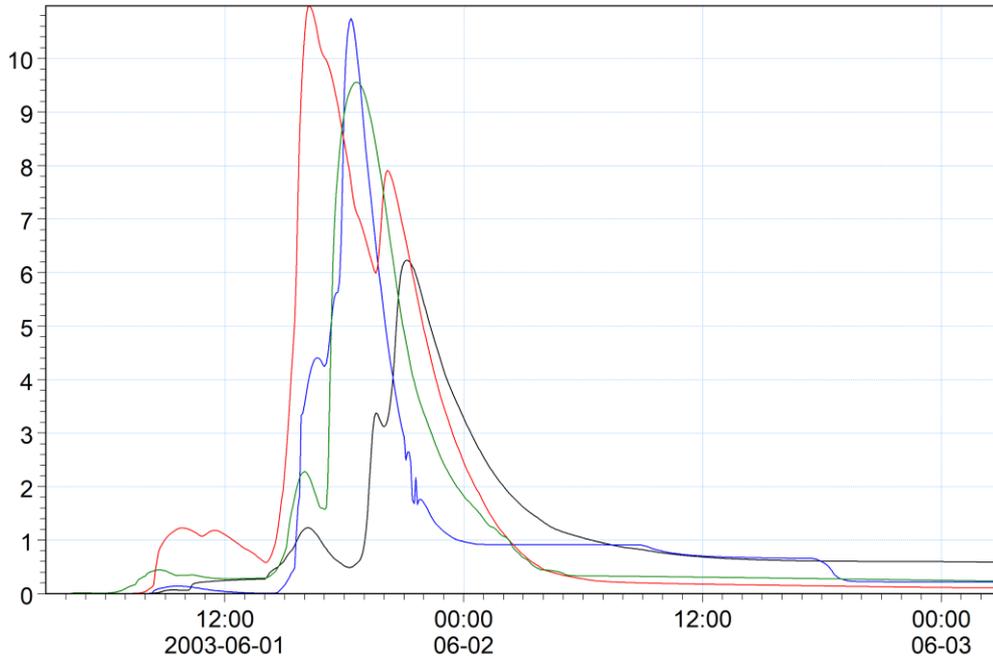




F100

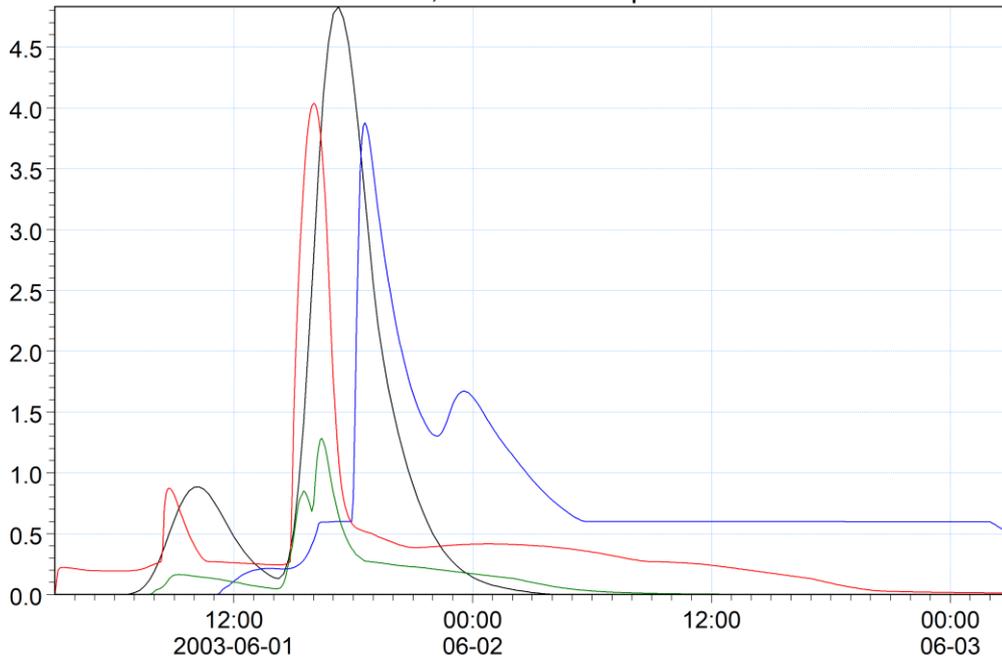
BV L1a [m³/s] —
 BV L1b [m³/s] —
 BV L1c [m³/s] —
 BV Manéglise [m³/s] —

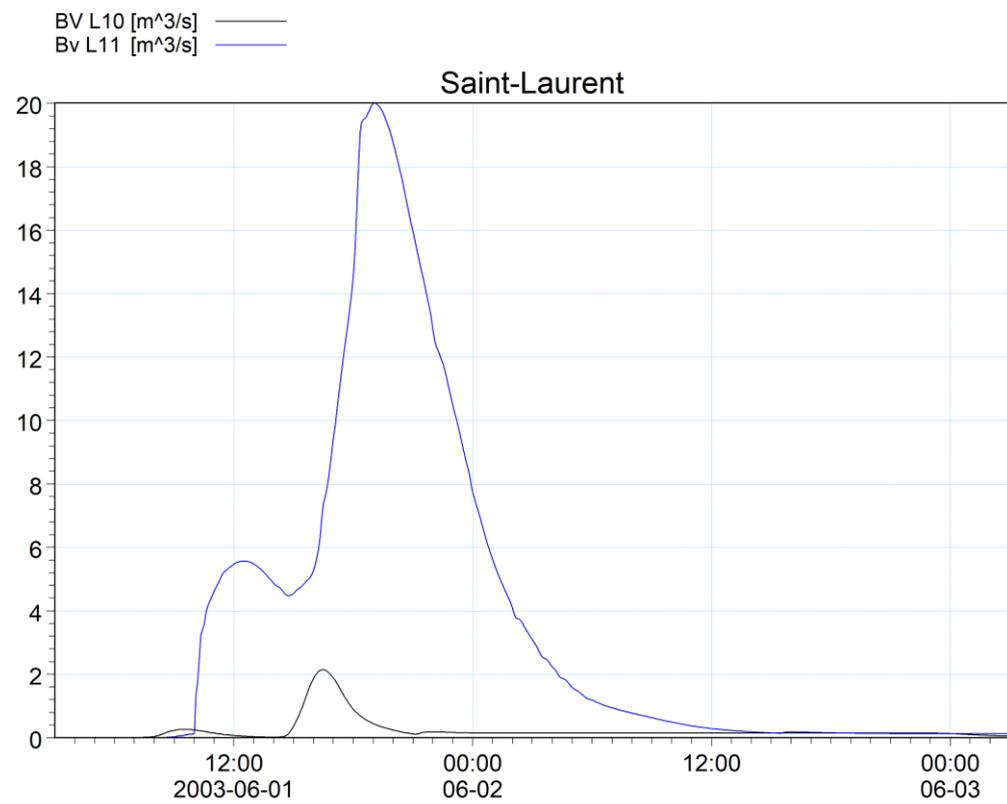
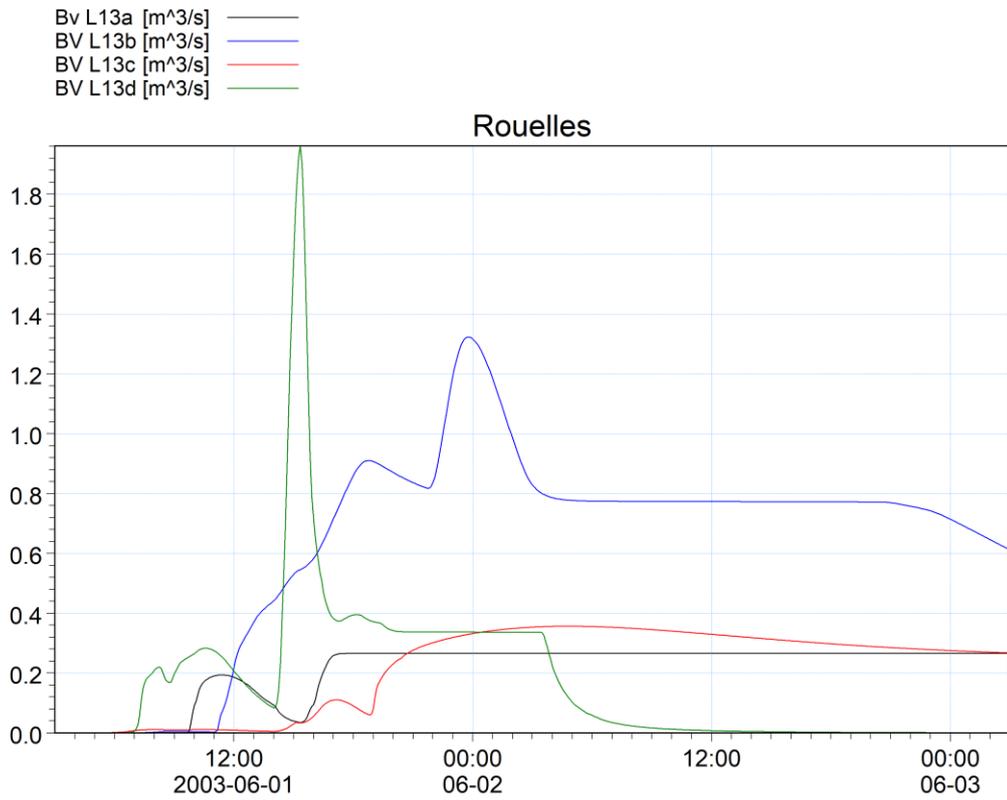
Lézarde Nord



BV L6 [m³/s] —
 BV L7 [m³/s] —
 BV L3 [m³/s] —
 BV Calois 2 [m³/s] —

Curande, Vallée et Coupeville





Scénario agr

Le scénario agr est la modélisation d'un état prospectif de la Lézarde et de son bassin versant où les pratiques agricoles sont changées pour réduire les ruissellements. Les hypothèses sont :

- La modélisation de tous les ouvrages de capacité supérieure à 5 000 m³ sur les thalwegs et la modélisation complète de la Lézarde issue de l'étude de 2006.
- La transformation pluie-débit à partir des pluies de projet construites à partir de l'événement de 2003 ;
- Le CN est réduit de 4 points sur 50% des cultures, soit une moyenne de 2 points sur la totalité des cultures.

Les volumes ruisselés de chaque sous bassin versant sont présentés dans le tableau suivant

Volumes ruisselés en m³ par sous bassin versant pour le scénario agr.

Bassin versant	F10	F50	F100
CPV	17 631	27 768	51 589
BV1	7 312	11 655	21 935
BV2	10 319	16 113	29 654
CUR	59 030	99 189	198 246
BV 1 Chemin du Golf	13 565	21 708	41 435
BV 2 Bois Caulot	7 486	13 007	26 636
BV 3 Cavee Rouge	2 646	4 606	9 321
BV 4 Fontenay Amont	13 711	24 626	52 060
BV 5 Clinardiere	18 555	30 947	61 915
BV 6 Aval	3 067	4 296	6 879
LNA	76 916	130 023	261 572
BV10	12 650	21 272	42 653
BV11	10 806	18 124	36 733
BV13	13 218	22 227	43 100
BV14	3 751	6 170	11 571
BV15	7 310	12 906	27 638
BV16	5 783	9 899	20 547
BV17	5 236	9 209	20 241
BV18	1 520	2 895	6 771
BV20	4 558	7 517	13 979
BV21	7 683	12 211	22 708
BV22	2 872	4 769	9 724
BV23	1 528	2 824	5 907
LNB	59 362	98 534	194 811
BV1	9 004	14 674	28 568
BV2	9 158	15 329	29 360
BV3	3 788	6 498	13 339
BV4	9 441	15 428	29 764
BV5	702	1 117	2 101
BV6	5 706	9 220	18 059
BV7	14 249	22 531	43 088
BV8	4 704	8 962	20 333

BV9	2 611	4 775	10 199
LNC	73 271	139 728	274 979
BV10	8 834	15 623	33 051
BV11	3 446	6 095	12 453
BV12	1 980	3 956	9 132
BV13	1 810	3 480	7 822
BV20	23 048	37 450	73 600
BV30	4 262	7 200	13 704
BV31	3 168	5 422	11 254
BV40	11 406	19 607	39 821
BV50	5 938	10 464	22 695
BV60	7 290	11 395	21 203
BV61	2 090	3 577	7 424
BV70		15 459	22 819
LND	52 775	86 631	176 868
BV1	18 132	30 020	61 896
BV2	27 832	45 934	95 815
BV3	6 811	10 677	19 157
ROU	119 654	191 049	367 745
BV R Ex		13 011	27 887
BV01	7 639	11 965	23 070
BV02	2 525	3 954	7 373
BV03	9 043	13 223	22 784
BV04	1 782	2 797	4 809
BV05	6 057	8 992	15 773
BV06	1 782	2 842	5 186
BV07	930	1 551	2 961
BV08	2 861	4 813	9 686
BV09	805	1 657	4 016
BV10	2 975	4 876	9 545
BV11	2 949	5 111	10 599
BV12	7 037	10 447	18 894
BV13	668	3 837	8 011
BV14	4 576		
BV15	556		
BV21	1 082	1 731	3 304
BV22	8 849	14 161	27 031
BV23	4 350	7 128	13 955
BV24	6 259	4 749	10 558
BV31	9 484	15 457	28 820
BV32	36 809	53 071	89 907
BV33		1 545	4 867
BV41	636	4 130	18 709
STL	271 693	401 039	720 976
BV10	147 278	189 129	272 297
BV11	13 116	22 396	47 031

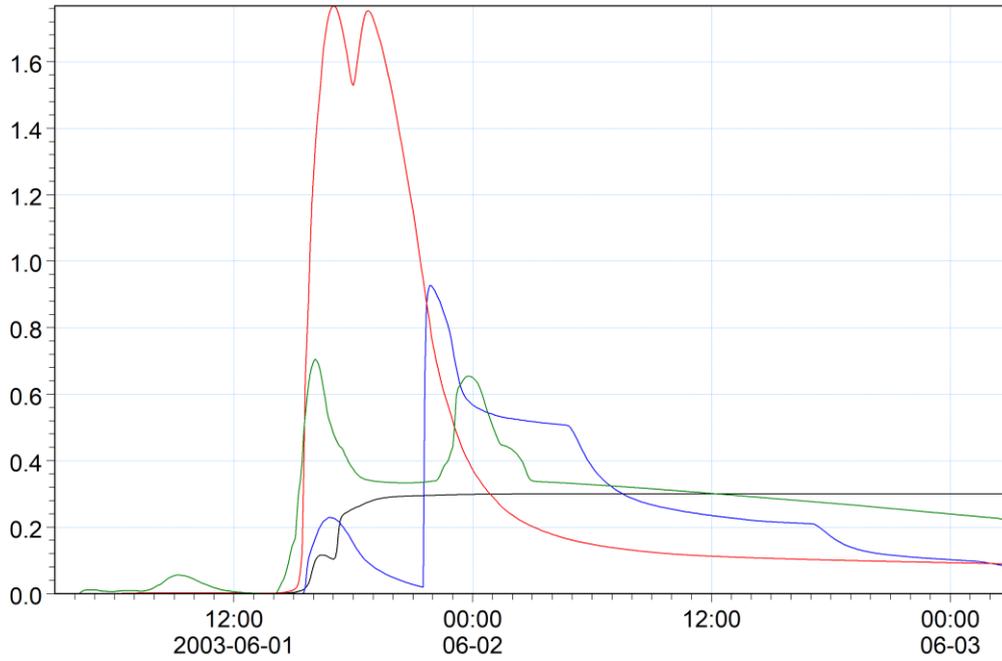
BV12	19 265	37 452	80 355
BV13	24 067	41 221	118 298
BV20	5 490	8 806	15 057
BV21	16 336	26 047	45 118
BV30	17 446	28 167	54 620
BV31	13 005	22 433	40 413
BV40	5 764	9 751	17 834
BV41	4 702	8 766	19 488
BV50	5 222	6 872	10 465
VAL	4 978	10 150	16 141
BV1	4 388	8 551	13 317
BV2	590	1 599	2 825
LEZ	223 101	341 194	618 217
BV Calois	5 992	9 994	20 723
BV DIREN	14 430	20 131	32 401
BV EPOUVIL	8 095	14 434	29 600
BV Ex	12 026	16 724	26 462
BV Ex 0	8 578	11 499	17 956
BV GOURNAY	10 142	14 766	25 622
BV L1	7 844	12 665	25 394
BV L12	11 443	19 255	38 745
BV L14	35 746	54 912	100 187
BV L2	10 073	17 411	34 677
BV L3	18 531	28 936	53 254
BV L4	3 138	4 502	7 417
BV L5	7 183	10 706	18 644
BV L8	33 647	49 950	87 620
BV L9	14 399	19 699	31 599
BV R Ex	13 751	22 410	41 786
BV SL Ex	8 083	13 200	26 128
Total	958 411	1 525 304	2 881 142

Les débits injectés dans le modèle global et issus des modèles de thalwegs sont présentés sur les figures suivantes en fonction des périodes de retour.

F10

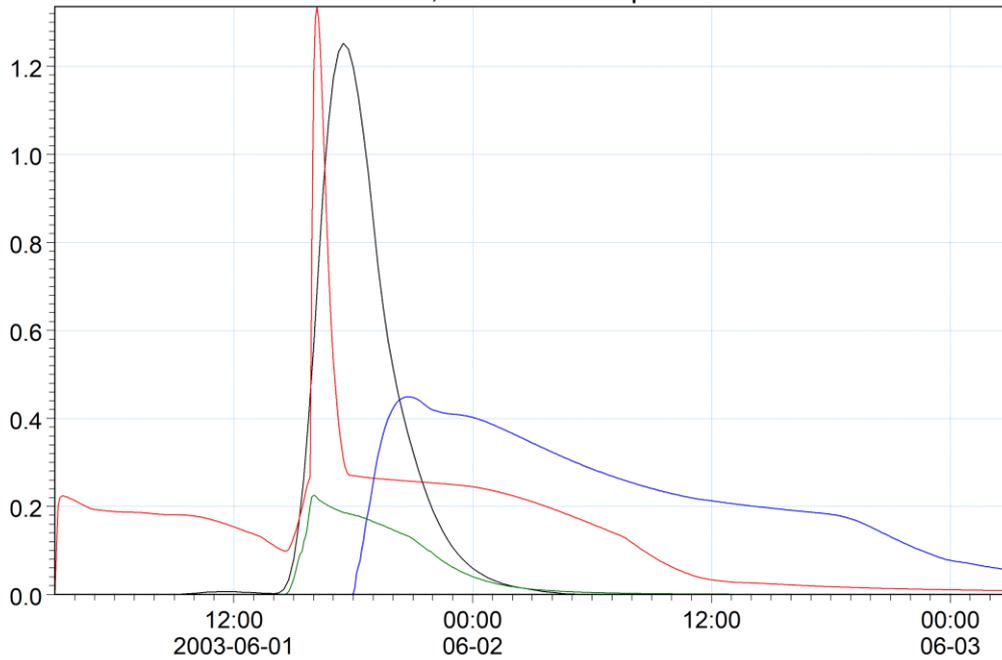
BV L1a [m³/s] —
 BV L1b [m³/s] —
 BV L1c [m³/s] —
 BV Manéglise [m³/s] —

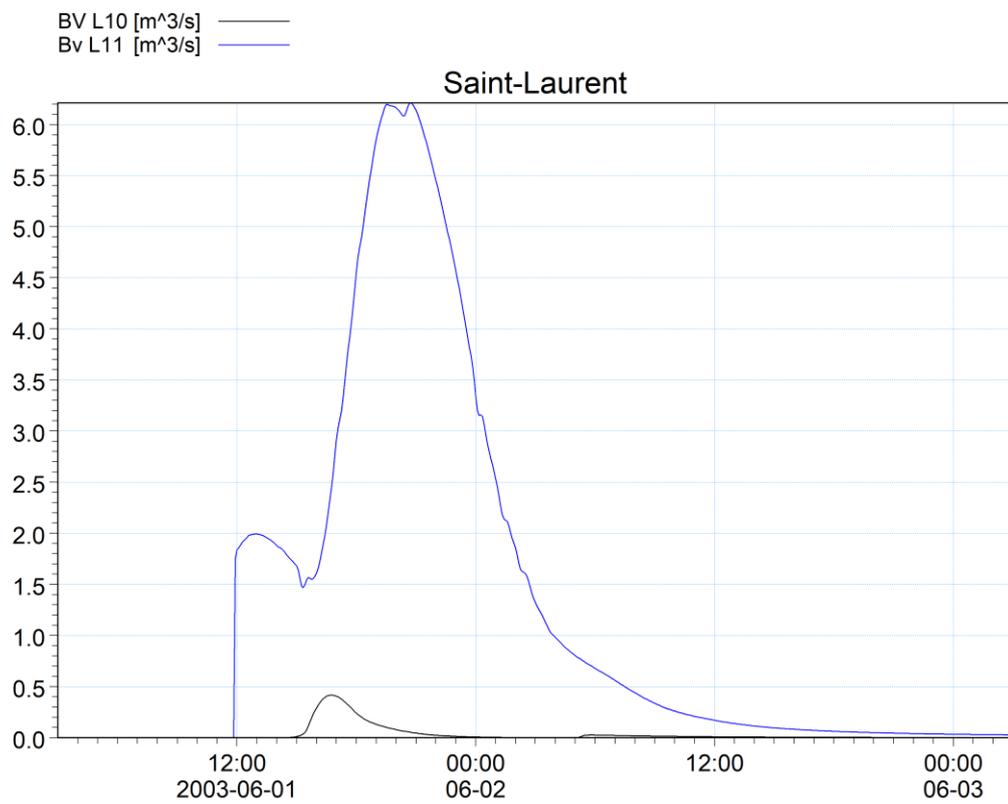
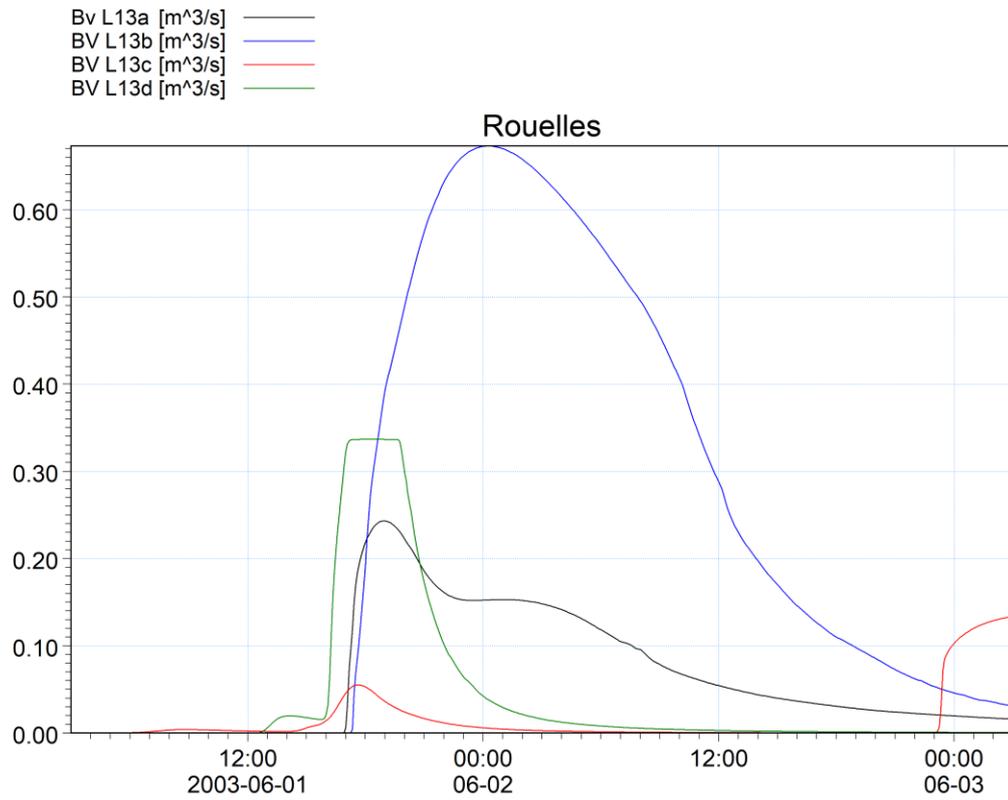
Lézarde Nord



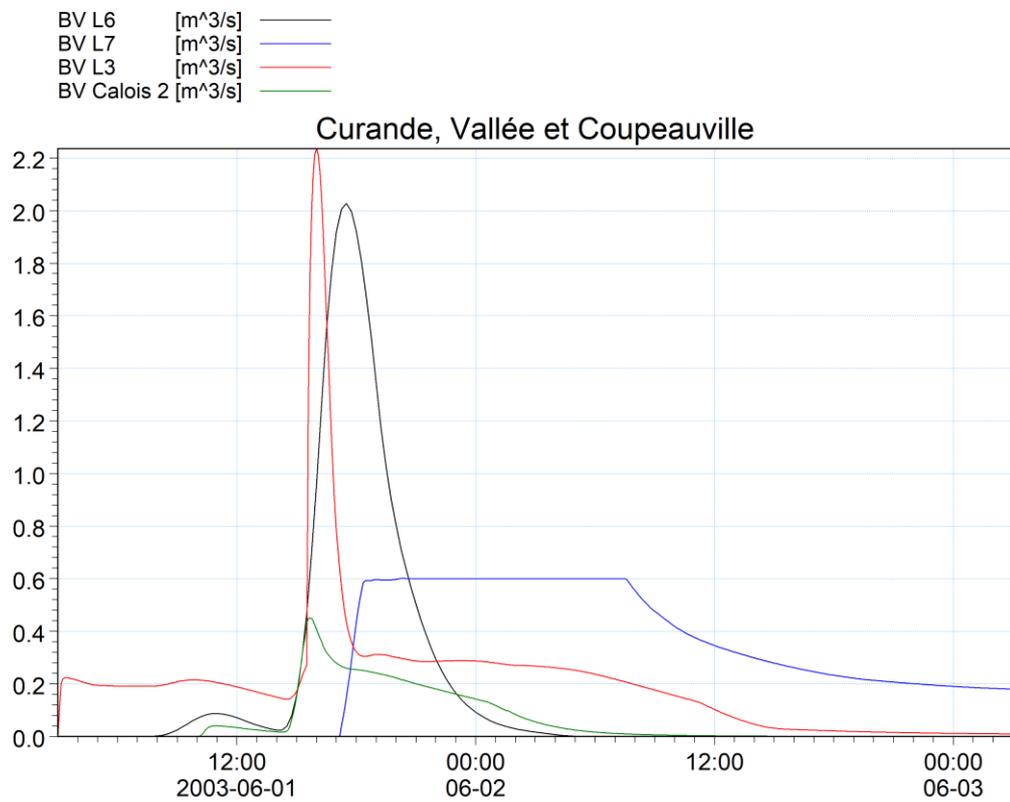
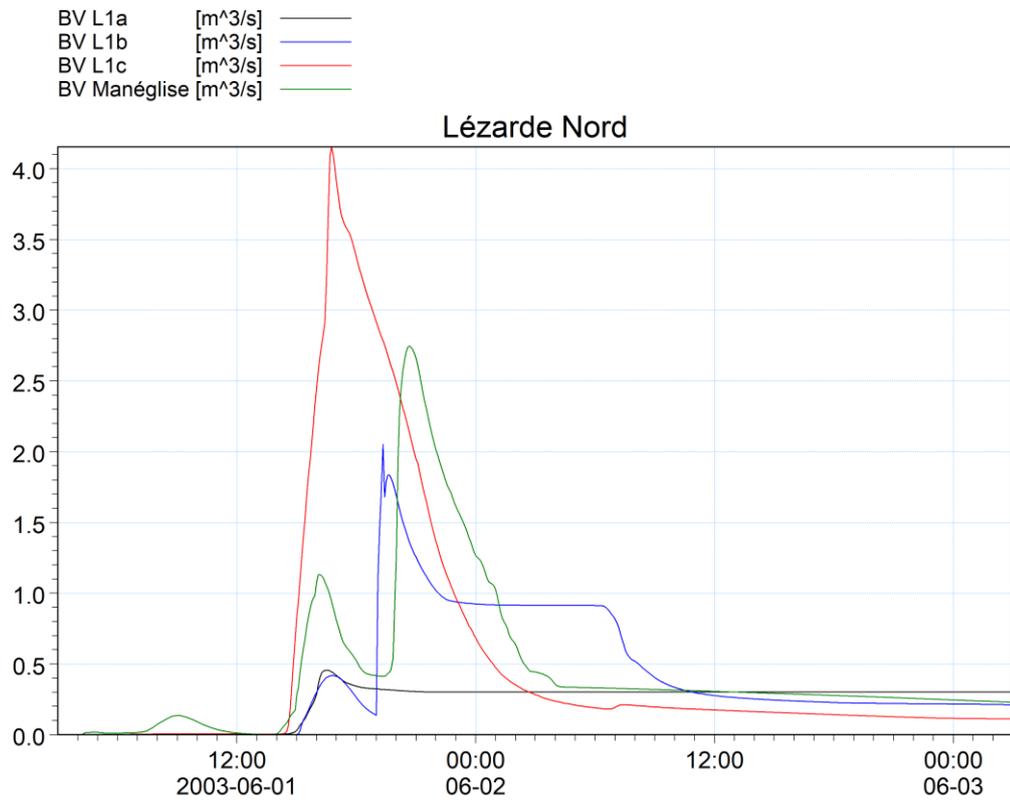
BV L6 [m³/s] —
 BV L7 [m³/s] —
 BV L3 [m³/s] —
 BV Calois 2 [m³/s] —

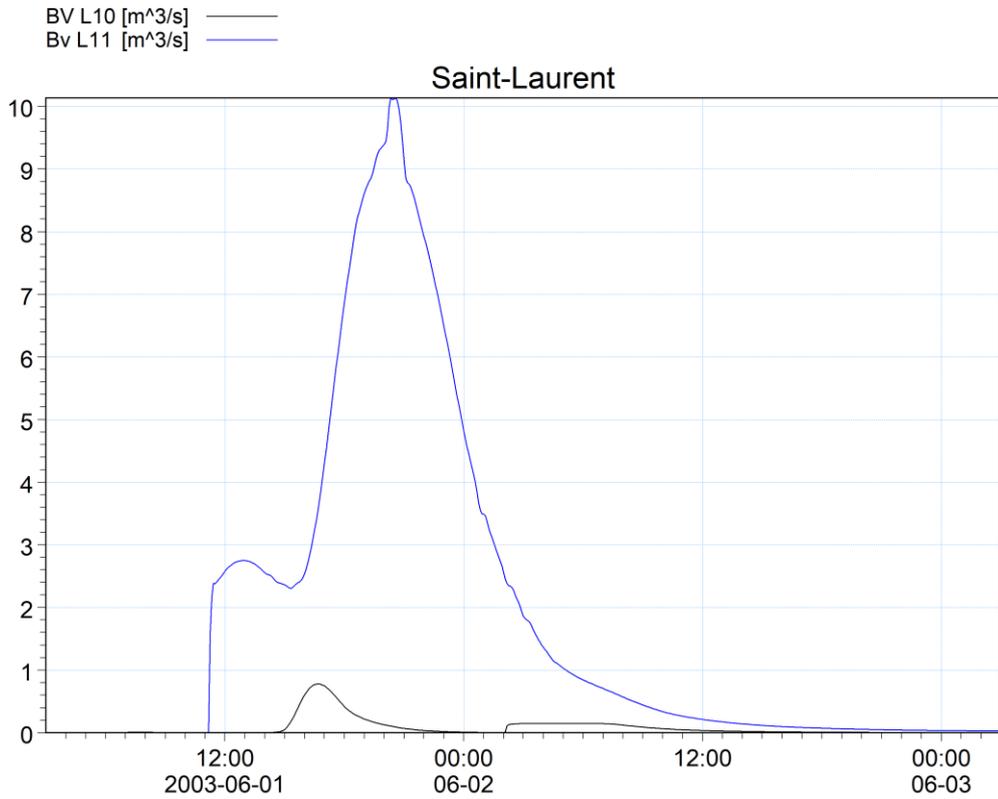
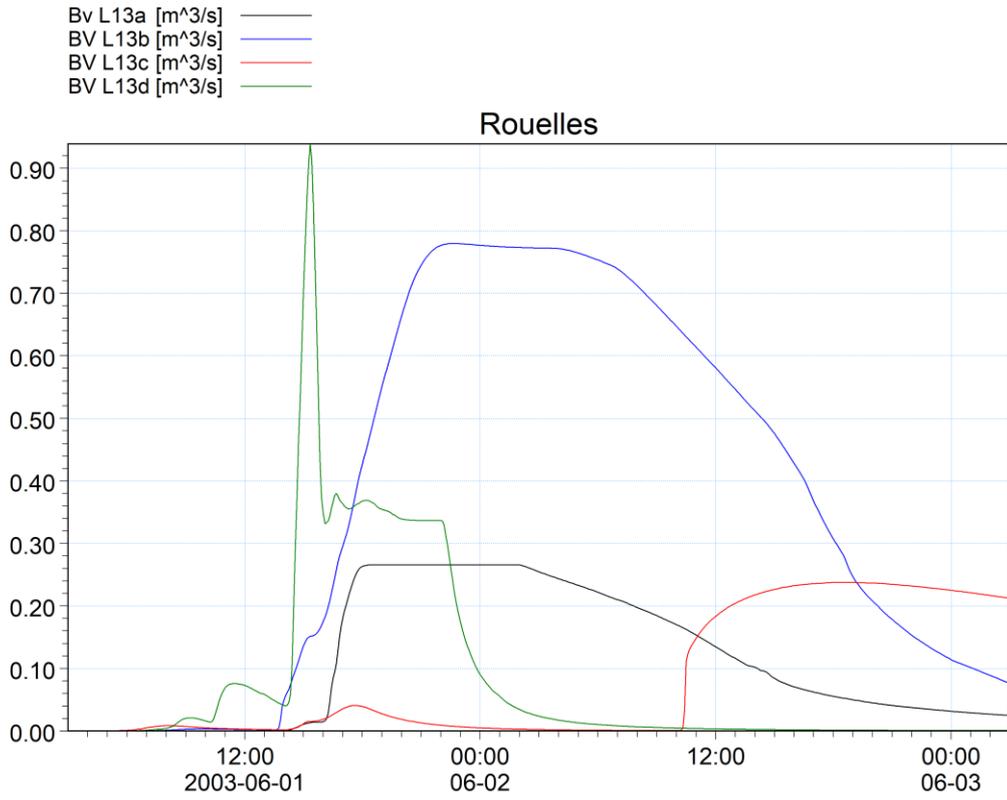
Curande, Vallée et Coupeauville



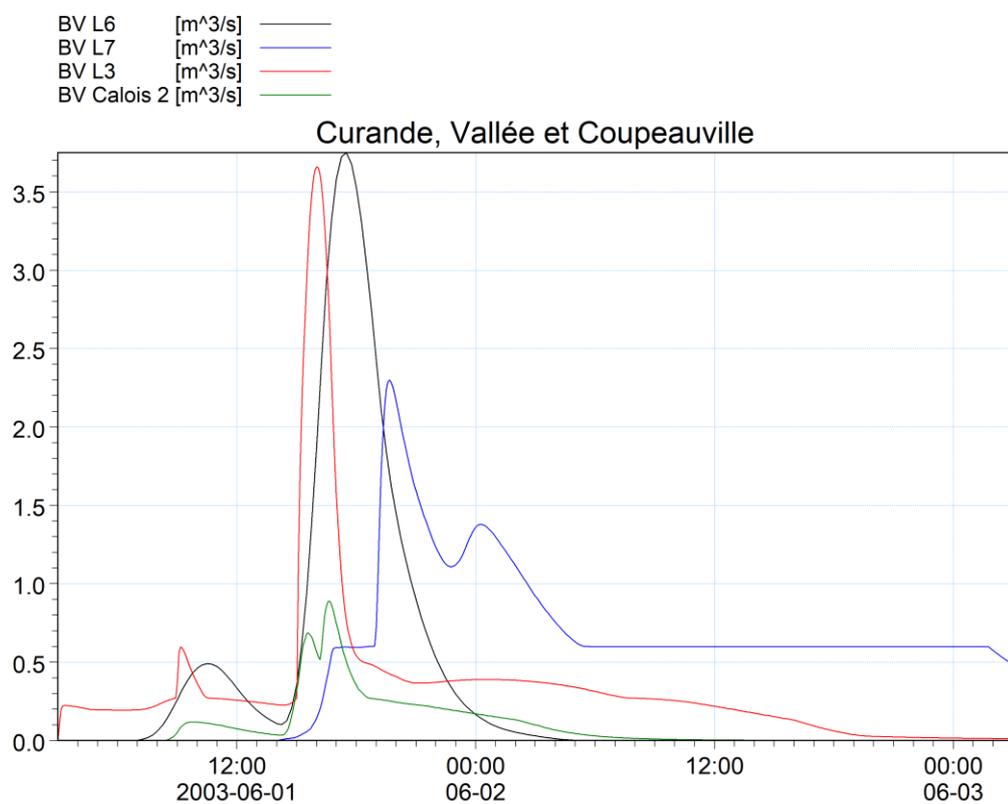
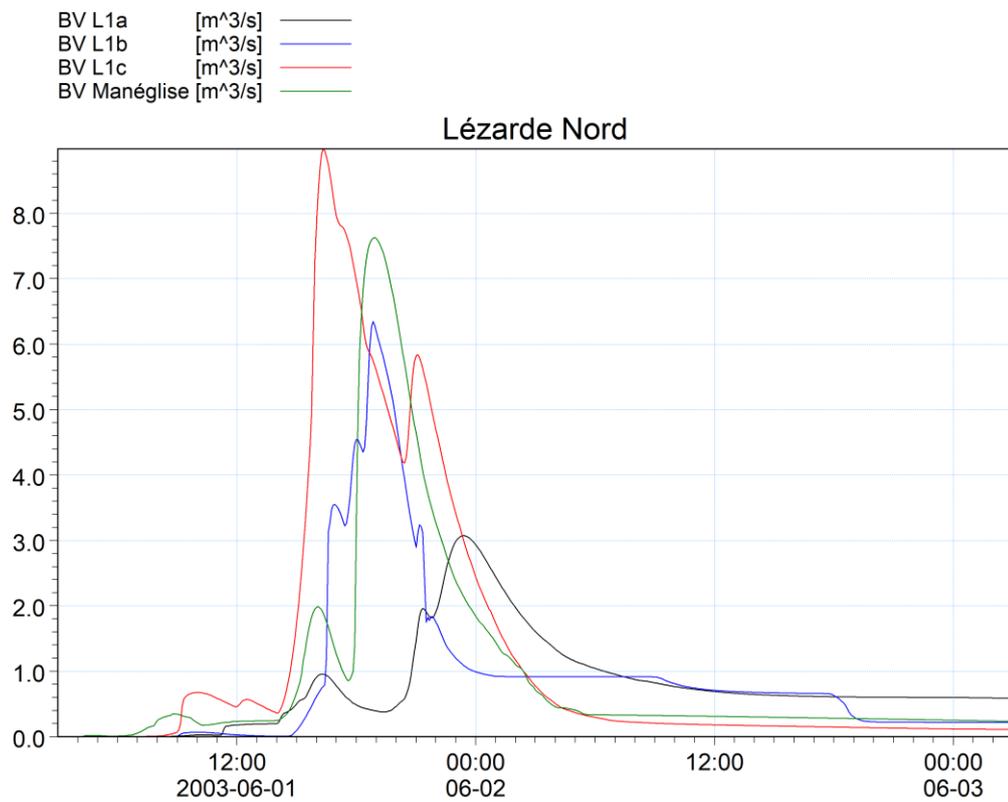


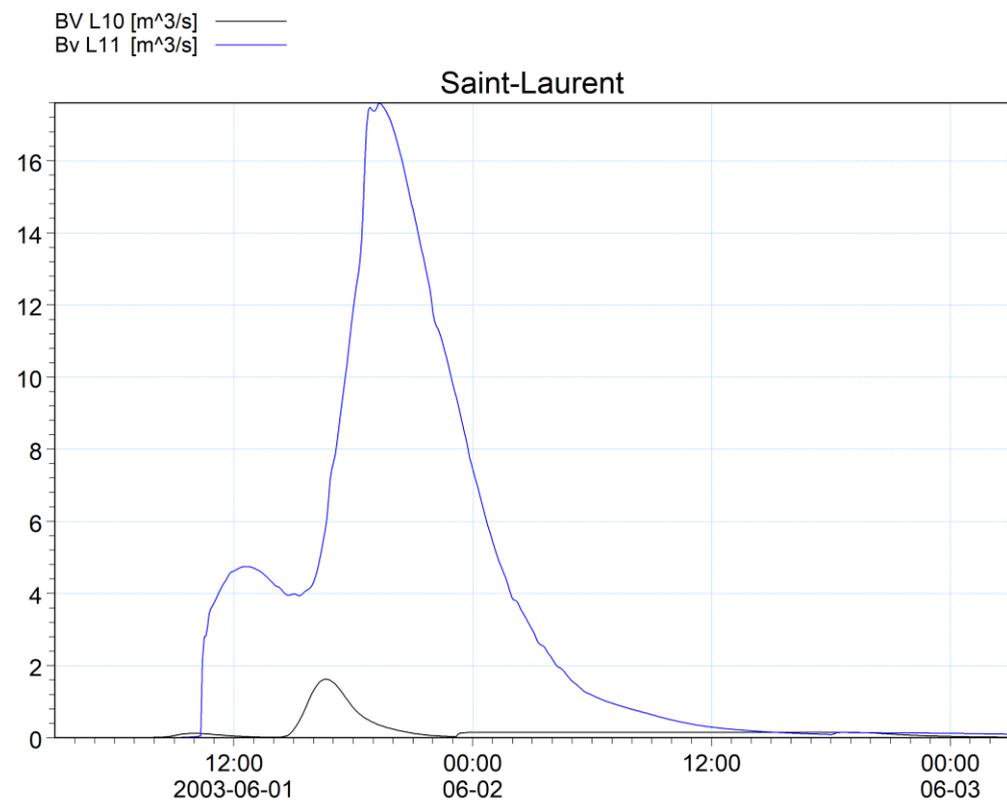
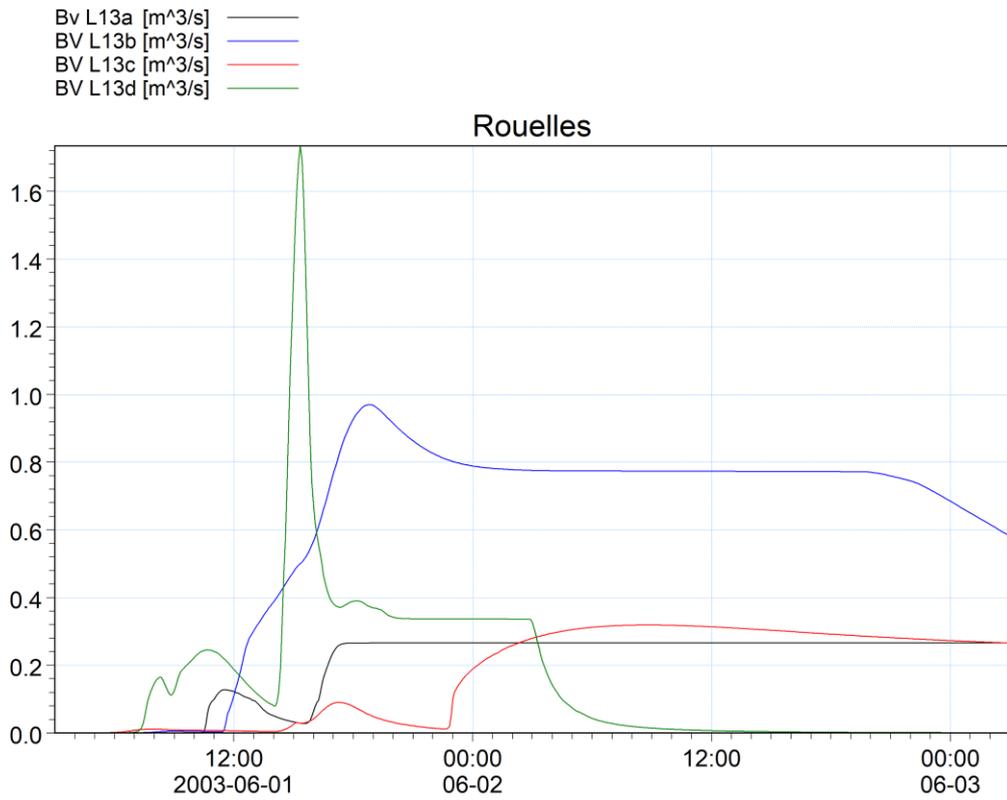
F50





F100



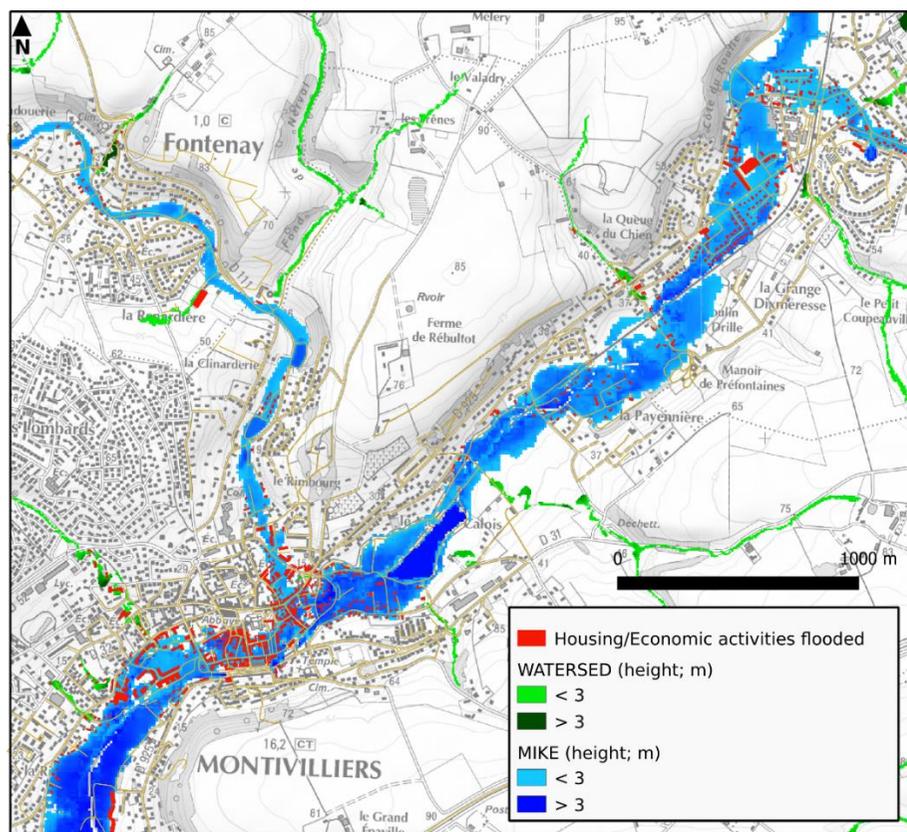


Annexes du Volume 3

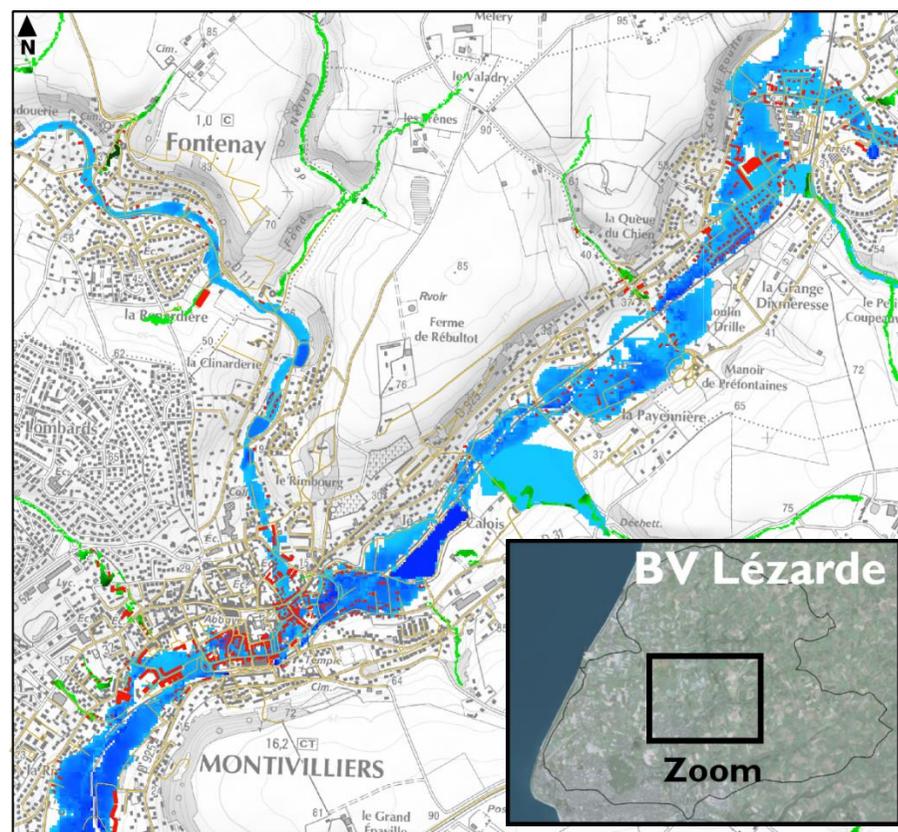
3.1 Extrait cartographique des résultats des modélisations Mike et WaterSed pour deux scénarios

La figure ci-dessous 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.



Q100 _ Scénario de référence sans ouvrages



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

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

3.2 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
Montvilliers	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
TOTAL	2 564 272	3 623 572	1 745 542	19 686 541	1 738 271	29 358 200

Commune	Dommages aux cultures
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
TOTAL	56 640

Q100_ref1 – coulée boueuse

Euros 2000 Commune	Dommages logements		Dommages entreprises		Etab publics	TOTAL
	Bâti	Mobilier et sous sc	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-Neuille	-	-	-	-	-	-
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
TOTAL	190 590	259 237	60 704	1 707 688	249 288	2 467 507

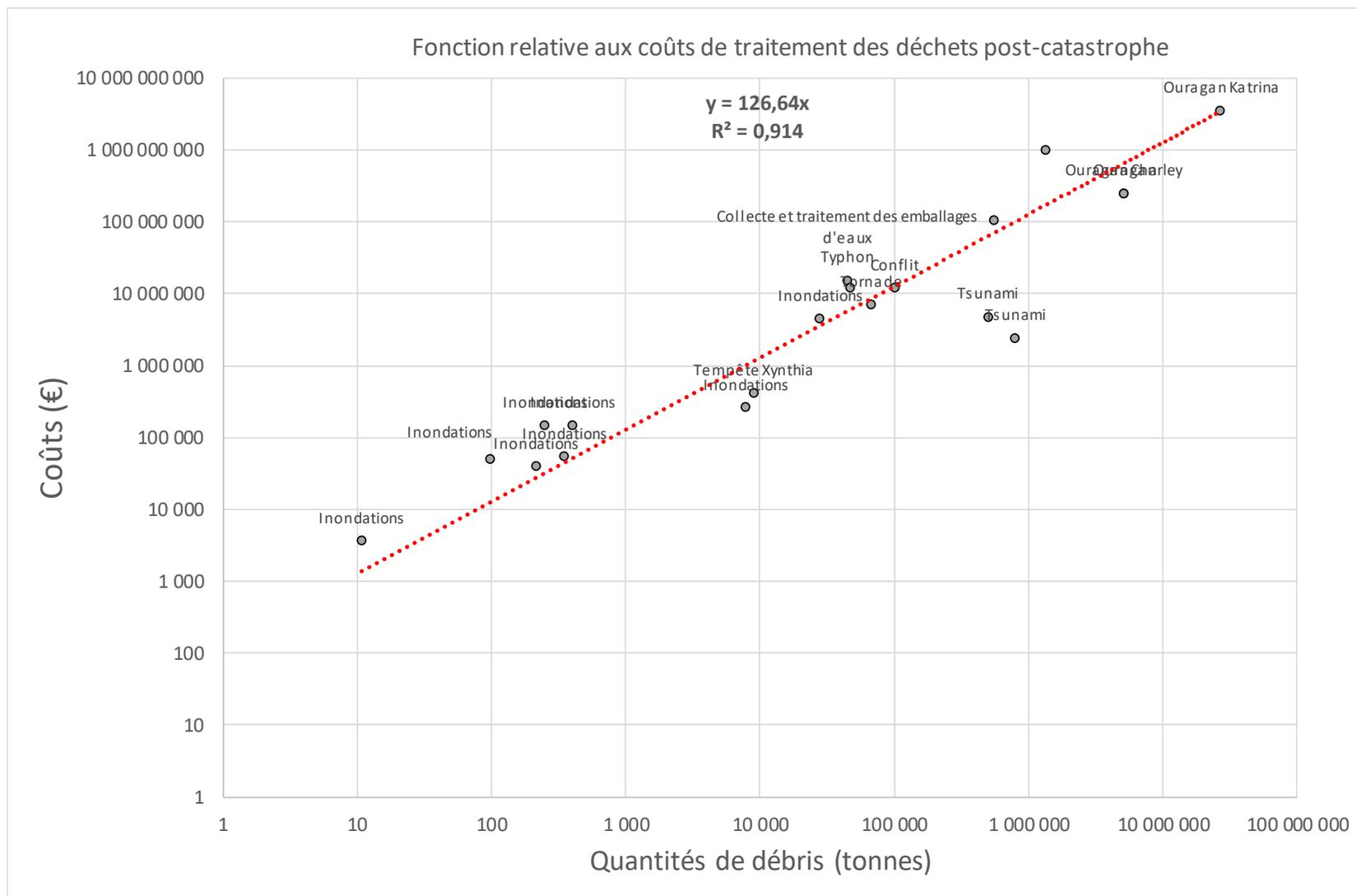
Euros 2000

Commune	Dommmages aux cultures
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
TOTAL	157 039

3.3 Construction d'une fonction de coût de gestion des déchets d'inondation

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., Viswanathan, C.	Wastelands: clearing up after the tsunami in Sri Lanka and Thailand	2006		https://waste-management-world.com/a/wastelands	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., Viswanathan, C.	Wastelands: clearing up after the tsunami in Sri Lanka and Thailand	2006		https://waste-management-world.com/a/wastelands	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	Tornade	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	http://dise.seine-maritime.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/finance_menteaujanv2012_cle061fe6.pdf	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	https://cepri.net/rl_files/pdf/rap.%20gestion%20dechets%20post%20cat.pdf	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	https://cepri.net/rl_files/pdf/rap.%20gestion%20dechets%20post%20cat.pdf	Non renseigné	Inondations	Angleterre (Hull City Council)	7 800		261719	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	https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/20131101_integrat%20dechets_plans_prevention_gestion.pdf	févr-10	Tempête Xynthia	Vendée	9 000		420 000	47	
Groupe d'Expertise	Les déchets des inondations du 28 mai au 5 juin 2016 dans les bassins amont de la Seine et de la Loire	2017	Rapport	http://www.robindesbo	2016	Inondations	Gidy	350		55 000	157	
Groupe d'Expertise	Les déchets des inondations du 28 mai au 5 juin 2016 dans les bassins amont de la Seine et de la Loire	2017	Rapport	http://www.robindesbo	2016	Inondations	Charny-Orée-de-Puisaye	98		51 000	520	
Groupe d'Expertise	Les déchets des inondations du 28 mai au 5 juin 2016 dans les bassins amont de la Seine et de la Loire	2017	Rapport	http://www.robindesbo	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	Les déchets des inondations du 28 mai au 5 juin 2016 dans les bassins amont de la Seine et de la Loire	2017	Rapport	http://www.robindesbo	2016	Inondations	Chartrettes	11		3 668	343	
Groupement d'Expertise	Les déchets des inondations du 28 mai au 5 juin 2016 dans les bassins amont de la Seine et de la Loire	2017	Rapport	http://www.robindesbo	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	https://www.bfmtv.com	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	https://www.fema.gov	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	https://doi.org/10.1016	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	http://postconflict.unep	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	http://postconflict.unep	2011	Tsunami	Japon	1 350 000	1 150 000 000	1 015 237 250	752	



Projet EVAPORE

Evaluation de l'efficacité des politiques publiques pour les actions visant à réduire les impacts du ruissellement et de l'érosion en Haute-Normandie

MAI 2020

