RAPPORT DE RECHERCHE

Projet Seine-Aval 5

AFFLUSEINE

« Flux sédimentaires des affluents intra-estuariens de la Seine : quantification et relation avec les caractéristiques physiographiques des bassins versants »

Juin 2017

Coordination : Benoît Laignel

Co-Auteurs : Valentin Landemaine, Olivier Cerdan

GIP Seine-Aval

GROUPEMENT D'INTÉRÊT PUBLIC

TABLE DES MATIERES

RESUME EXECUTIF 3

SCIENTIFIQUES AYANT PARTICIPE AU PROJET 4

PARTICIPANTS AU SUIVI DE PROJET 4

RESULTATS 5

Introduction 5

1 Quantification des flux sédimentaires des bassins versants intra-estuariens et des rivières littorales à partir des algorithmes utilisés dans la littérature 6

1.1 Inventaire des stations avec des mesures hydrologiques et sédimentaires 7

1.2 Analyse de la représentativité hydrologique des mesures sédimentaires 10

1.3 Inter-comparaison des mesures sédimentaires 13

1.4 Evaluation des performances de différentes méthodes d'estimation et sélection de la méthode la plus adaptée au contexte de l'étude 17

2 Typologie et analyse des paramètres physiographiques forçant les flux sédimentaires des bassins versants Seine Aval-Manche 19

3 Proposition d'une nouvelle méthode de quantification des flux sédimentaires des bassins versants Seine Aval-Manche : le modèle WSRC (Weighted Sediment Rating Curve) 26

3.1 Index de Réactivité Hydrosédimentaire (HSR) 26

3.2 Modèle d'extrapolation WSRC 27

Conclusion 35

BIBLIOGRAPHIE 37

ANNEXE 1 : LISTE DES METHODES D'INTERPOLATION ET D'EXTRAPOLATION APPLIQUEES DANS CETTE ETUDE 39

ANNEXE 2 : CARACTERISTIQUES DES PARAMETRES PHYSIOGRAPHIQUES UTILISES POUR CETTE ETUDE 42

RESUME EXECUTIF

Les impacts de l'érosion accélérée des sols sont particulièrement présents au niveau des plateaux lœssiques normands et des bassins versants intra-estuariens de la Seine et des rivières littorales du Pays de Caux (problèmes de pollutions des masses d'eaux, phénomènes de coulées boueuses…), et sont à ce titre étudiés depuis plusieurs décennies. Le présent projet (AffluSeine) dans le cadre du programme Seine Aval s'est proposé de :

- Quantifier de manière la plus précise possible les flux sédimentaires de l'ensemble des affluents intra-estuariens à la Seine, en combinant données acquises à base fréquence et celles acquises à haute fréquence, en utilisant différentes méthodes de calculs des flux développées ces dernières années dans la bibliographie, et proposer éventuellement une nouvelle méthode de quantification,

- Proposer une typologie des bassins versants Seine Aval-Manche et mieux comprendre le rôle des bassins versants et de leurs caractéristiques physiographiques sur les flux sédimentaires, à partir d'un croisement statistique de l'ensemble de ces données.

Le premier apport de ce travail a été de montrer que les méthodes d'interpolation et d'extrapolation utilisées dans la littérature (12 algorithmes testés) ne sont pas satisfaisantes et mal adaptées à notre contexte, aboutissant à de mauvaises performances de prédiction des flux sédimentaires, soulignant ainsi que l'utilisation conjointe des concentrations en MES hautes et basses fréquence est difficilement envisageable en l'état pour le calcul de flux sédimentaire.

Le second apport a été de proposer une typologie des bassins versants Seine Aval-Manche composée de 7 groupes de bassins et de montrer que de nombreux paramètres physiographiques sont susceptibles de jouer un rôle sur les flux sédimentaires (à partir d'analyses statistiques : CAH et ACP), ainsi que d'établir des cartes d'identité par bassin versant.

Le troisième apport a consisté à proposer un nouveau modèle de quantification des flux sédimentaires (WSRC : Weighted Sediment Rating Curve) et une méthodologie d'extrapolation régionale pour les rivières ne disposant pas de mesures sédimentaires à haute fréquence, reposant sur un indice de réactivité hydro-sédimentaire (HSR).

La cartographie du flux sédimentaire spécifique moyen ou taux d'érosion moyen (SSY) de chaque rivière du bassin Seine-Aval Manche qui en découle, indique que SSY varie en moyenne entre 2.7 et 55.9 $t.km^{-2}.y^{-1}$, avec des valeurs plus élevées pour les rivières littorales du Pays de Caux que pour les affluents de la Seine… Le flux sédimentaire moyen annuel de la Seine au barrage de Poses est évalué à 494 000 $t.an^{-1}$, avec un écart type de 288 000 $t.an^{-1}$. Les apports sédimentaires moyens annuels des affluents intra-estuariens de Seine sont évalués à 55 500 $t.an^{-1}$, avec un écart type de 46 600 $t.an^{-1}$. Ils représentent ainsi 10% de l'ensemble des apports sédimentaires à l'estuaire de Seine.

SCIENTIFIQUES AYANT PARTICIPE AU PROJET

● **Equipe 1**: UMR CNRS 6143 M2C (Morphodynamique Continentale et Côtière), Université de Rouen

Coordinateur scientifique
Laignel, Benoit, PR

Chercheurs (ou équivalents) permanents
Deloffre, Julien, MCF
Copard, Yoann, MCF
Fournier, Matthieu, MCF

Doctorant
Landemaine, Valentin, Doctorant, Allocation Région Haute-Normandie/BRGM

Autres étudiants, stagiaires
Patault, Edouard, Stage de Master 1 (financé par le projet AffluSeine)

● **Equipe 2** : Laboratoire : Direction Risque et Prévention, BRGM, Orléans

Coordinateur scientifique
Cerdan, Olivier, CR, o.cerdan@brgm.fr

PARTICIPANTS AU SUIVI DE PROJET

Personnes ayant contribué au suivi du projet.

Acteurs de l'estuaire : Guillaume Fresnel (Métropole Rouen), Barbara Leroy (AESN), Manuel Sarraza (AESN), Albert Galicher (GPMR).

Scientifiques : Romaric Verney (Ifremer*)*

RESULTATS

Introduction

Les exports de sédiments dans les rivières constituent l'essentiel des transferts de matières des surfaces continentales vers les océans et jouent un rôle majeur dans la dynamique des cycles biogéochimiques globaux (Ludwig et Probst, 1998 ; Rabouille et al., 2001 ; Lal, 2003 ; Mackenzie et al., 2004). Ils représentent pour l'essentiel le résultat de processus variés d'érosion, transfert et dépôt au sein des bassins versants. L'érosion des sols et les transferts de sédiments peuvent alors être responsables des apports aux masses d'eau de surface d'éléments tels que les nutriments associés aux sédiments (par exemple le phosphore particulaire, le carbone organique particulaire…), des bactéries, des pesticides, des métaux lourds ou encore des radioéléments (Horowitz et al., 2001 ; Steegen et al., 2001). Ces transferts peuvent avoir un impact majeur sur la qualité des eaux de surface avec des dommages importants sur l'habitat aquatique (Prosser et al., 2001a ; Young et al., 2001).
Ces impacts sont particulièrement présents au niveau des plateaux lœssiques normands qui présentent de forts taux d'érosion (Delmas et al., 2012) et de nombreux problèmes de pollutions des masses d'eaux et des phénomènes de coulées boueuses. Les études, menées dans ce contexte, se sont intéressées à la dynamique érosive des versants (e.g. Cerdan et al., 2001 ; Delmas et al., 2012), aux transferts d'eau entre la surface et le karst (Mouhri, 2010), et des premiers bilans d'export de certaines rivières à la Seine et à la côte ont été réalisés (Laignel et al., 2006, 2008).
Par ailleurs, ces dernières années, plusieurs méthodes de calcul ont été développées pour déterminer des flux sédimentaires à partir des données acquises à basse fréquence et centralisées dans des banques de données de différents organismes. Ces méthodes vont bien plus loin que les simples équations utilisées jusqu'à maintenant.
Dans le cadre des précédents programmes Seine Aval (et ce depuis SA 2), des données à haute fréquence ont été acquises sur plusieurs affluents de la Seine (Austreberthe, Andelle et Risle), mais également sur les rivières littorales dans le cadre du projet BAR (Beaches At Risk) du programme Interreg (Yères, Dun,…). Ces données ont permis de quantifier des flux sédimentaires précis sur 1 à 2 années sur chacun des bassins étudiés. Des essais de calculs de flux à la Seine et à la Mer de la Manche ont alors été proposés, reposant sur une extrapolation de ces rivières sur les autres, en se basant notamment sur l'aire drainée et des régressions simples le plus souvent linéaires. Ces calculs ont abouti à une approximation, sans pouvoir évaluer les incertitudes sur les chiffres proposés.
D'autre part, même si le BRGM (2000) a réalisé une cartographie de l'aléa érosion des sols en Haute-Normandie, aucun travail n'a été entrepris, jusqu'à maintenant, pour essayer de comprendre le rôle de l'ensemble des bassins versants intra-estuariens et littoraux et de leurs caractéristiques physiographiques sur les flux sédimentaires. En effet, le travail du BRGM, en association avec l'INRA et le Laboratoire M2C, a consisté à appliquer un modèle cartographique sous SIG reposant sur les principaux facteurs reconnus dans l'érosion des sols (pluie, occupation du sol, aire drainée et pente, lithologie du sol et du sous-sol) pour aboutir à une carte de sensibilité des sols à l'érosion. Cependant, ce travail a pris en compte un nombre réduit de caractéristiques physiographiques du bassin et n'avait pas pour objectif de combiner ces caractéristiques avec les flux sédimentaires pour déterminer les facteurs des bassins les plus discriminants sur les flux.

Le travail proposé dans le cadre de ce projet visait donc à répondre à ces objectifs, à savoir :

- ✓ Quantifier de manière la plus précise possible les flux sédimentaires de l'ensemble des affluents intra-estuariens à la Seine, en combinant données acquises à base fréquence (banque de données) et celles acquises à haute fréquence (par le laboratoire M2C), en utilisant différentes méthodes de calculs des flux développées ces dernières années dans la bibliographie et non appliquées à notre contexte pour la plupart d'entre elles, et proposer éventuellement une nouvelle méthode de quantification (dans le cas d'une mauvaise adaptation des algorithmes de la littérature à notre contexte) ;

- ✓ Proposer une typologie des bassins versants du système Seine-Manche et mieux comprendre le rôle des bassins versants et de leurs caractéristiques physiographiques sur les flux sédimentaires, à partir d'un croisement statistique de l'ensemble de ces données.

Outre les affluents intra-estuariens de la Seine, il a été nécessaire d'étendre ce travail aux rivières littorales du Pays de Caux, afin de disposer d'un nombre suffisant de bassins avec des mesures à haute fréquence pour réaliser des analyses statistiques et des quantifications suffisamment robustes.

Le travail proposé a reposé sur une collaboration entre le Laboratoire M2C de l'Université de Rouen et la Direction Risque et Prévention du BRGM d'Orléans. Ce projet a eu également l'avantage de s'appuyer sur une thèse co-financée par le BRGM et la Région Haute-Normandie et co-encadrée par le laboratoire M2C et le BRGM : thèse de Valentin Landemaine (2016), intitulée « 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 », dont un des objectifs dans le cadre du projet a été de quantifier les flux sédimentaire à la Seine et à la Mer de la Manche.

1 Quantification des flux sédimentaires des bassins versants intra-estuariens et des rivières littorales à partir des algorithmes utilisés dans la littérature

La quantification des flux sédimentaires nécessite en théorie de mesurer sur plusieurs années le débit (Q) des rivières considérées et la concentration en Matières En Suspension (MES) à une fréquence d'acquisition suffisamment élevée (minimum journalière) pour intégrer la variabilité temporelle de ces paramètres. L'absence de telles mesures sur l'ensemble des affluents intra-estuariens de Seine et des rivières littorales du Pays de Caux constitue la réelle difficulté de ce projet. Pour pallier à ce problème, nous disposons de deux types de données avec des fréquences et des durées de mesures contrastées ; d'une part, des données basses fréquences sur plusieurs décennies sur l'ensemble des rivières avec des mesures de Q (journaliers) et de MES (au mieux mensuel), d'autre part, des données hautes fréquences (30 min) de Q et MES sur une à deux années, sur deux affluents de la Seine (l'Austreberthe et l'Andelle) et sur deux rivières du littoral du Pays de Caux (le Dun et l'Yères).

L'objectif est alors de suivre le cadre méthodologique proposé par la littérature scientifique en vue d'une quantification des flux sédimentaires de l'ensemble des affluents intra-estuariens de Seine et des rivières littorales du Pays de Caux :

- ✓ Inventaire des stations avec des mesures hydrologiques et sédimentaires,
- ✓ Analyse de la représentativité hydrologique des mesures sédimentaires,
- ✓ Inter-comparaison des mesures sédimentaires
- ✓ Evaluation des performances de différentes méthodes d'estimation
- ✓ Sélection de la méthode la plus adaptée au contexte de l'étude.

Parmi l'ensemble des méthodes proposées dans la littérature, 12 méthodes ont été retenues (Annexe 1). Ces méthodes se répartissent en deux catégories : les méthodes d'interpolation et les méthodes d'extrapolation. Les méthodes d'interpolation comprennent les méthodes « averaging estimator », « linear interpolation », et « ratio estimator ». Les méthodes d'extrapolation correspondent à la courbe de tarage sédimentaire dans sa version simple et ses versions tronquées selon le débit médian, les saisons, la montée et la descente de crue.

1.1 Inventaire des stations avec des mesures hydrologiques et sédimentaires

L'étape d'inventaire et d'assemblage des mesures hydrologiques et sédimentaires disponibles sur le territoire de l'étude est détaillée dans le Chapitre 2 de de la thèse de Valentin Landemaine, fourni en pièce jointe à ce rapport. Passée cette étape, 18 des 24 bassins versants de l'Ouest du Bassin de Paris disposent d'une station hydrologique à leur exutoire (Figure 1), avec des mesures de débit et de concentration en MES : 13 bassins avec seulement des mesures à basse fréquence et 4 bassins avec à la fois des mesures à haute fréquence et à basse fréquence. Pour chaque station, les débits journaliers couvrent entièrement la période 1990-2012, hormis pour le Dun, la Béthune, la Lézarde et la Saâne. Sur la période 1990-2012, entre 82 et 298 mesures de concentrations en MES du RNB ont pu être associées par station (Figure 2).

Les 4 bassins versants disposant des deux types de mesure sont l'Andelle, l'Austreberthe, le Dun et l'Yères. Sur le bassin de l'Andelle, les stations localisées au centre et à l'amont du bassin, (Vascoeuil et Rouvray) ont été conservées. Pour ces stations, les débits journaliers ont été extraits auprès de la Banque Hydro et complétés par des concentrations en MES mensuelles issues de la station du RNB la plus proche, portant au total à 6 le nombre de stations disposant à la fois de mesures à basse fréquence et à haute fréquence.
Sur les 6 derniers bassins de l'Ouest du Bassin de Paris, seule la station hydrologique de la Sâane à Val-de-Sâane est conservée. Les mesures de débit disponibles seront ainsi utilisées pour un calcul ultérieur de flux sédimentaire. Pour les autres bassins, à savoir la Brouisseresse, la Veules, le Theluet, la Rançon et l'Aubette, les mesures de débit et/ou de concentration en MES ne sont pas satisfaisantes pour cette étude et ces bassins ne sont donc pas étudiés.

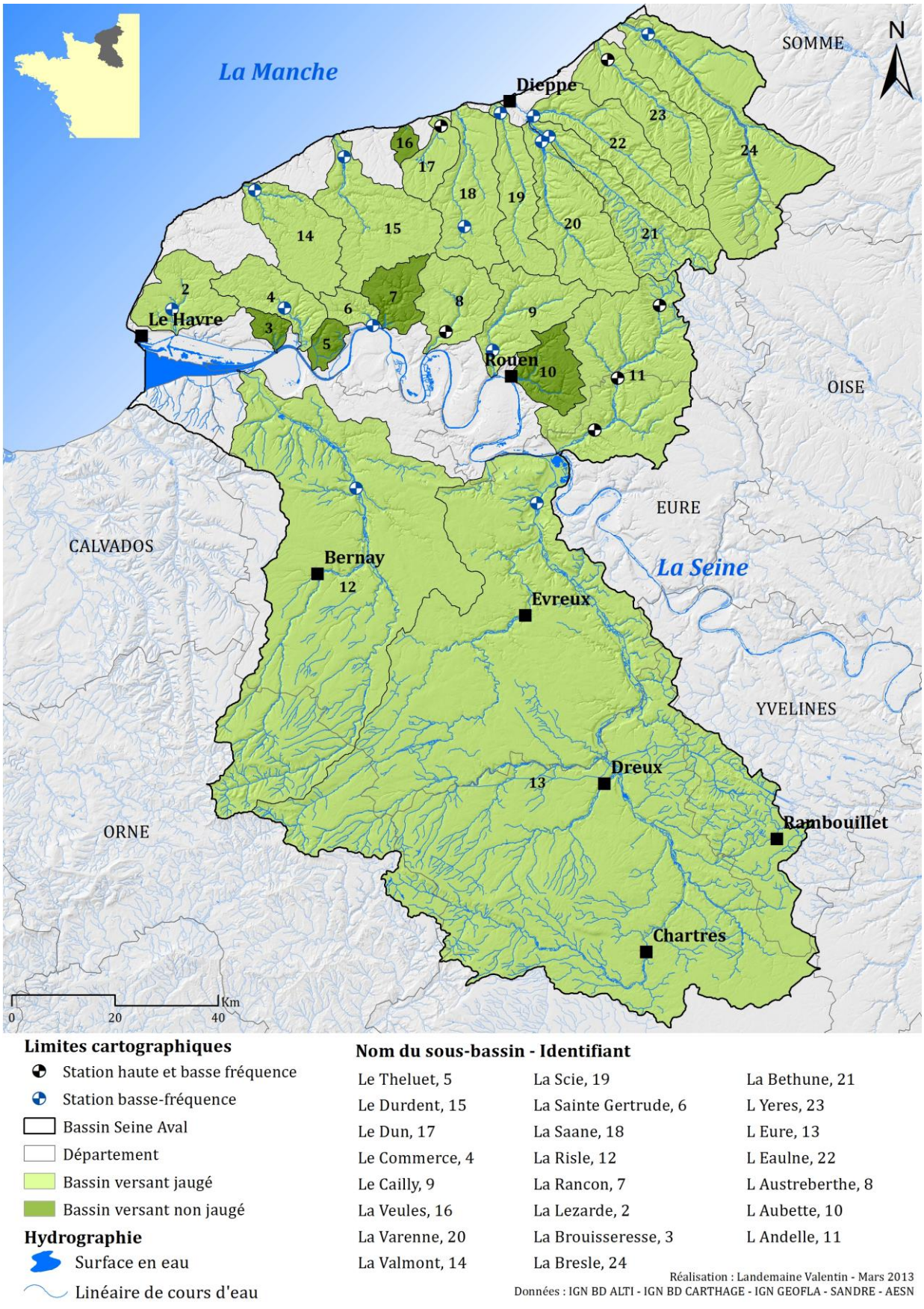

Figure 1 Localisation des bassins versants étudiés dans le bassin Seine Aval-Manche

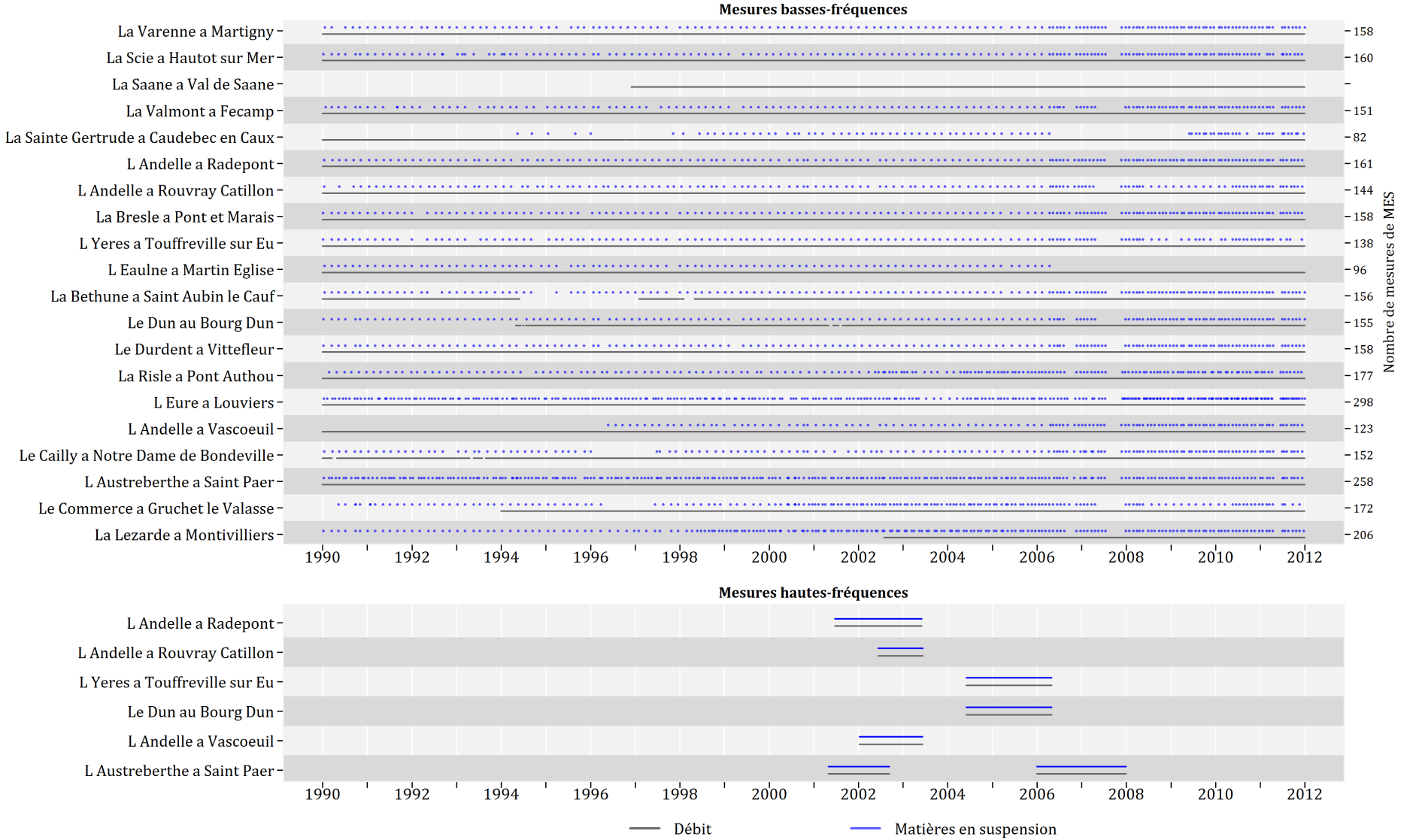

Figure 2 : Synthèse des mesures de débits et de concentrations en MES disponibles pour les rivières de l'Ouest du Bassin de Paris

1.2 Analyse de la représentativité hydrologique des mesures sédimentaires

L'échantillonnage des concentrations en MES à basse fréquence est dit représentatif si l'ensemble des conditions hydrologiques (étiage, crue) sont échantillonnées. Afin de tester cette représentativité, pour chaque station, les mesures de débit sont divisées en 40 classes de débit. Ce nombre a été défini arbitrairement, mais suffisamment élevé pour un découpage fin de l'amplitude de variabilité des débits. Le débit associé à chaque valeur de concentration en MES est ensuite positionné dans la classe adéquate. Le nombre de concentrations en MES par classe est ensuite sommé et divisé par le nombre total d'échantillons de concentrations en MES afin d'exprimer les résultats en pourcentage. Pour permettre une comparaison entre les stations, les classes de débit sont également exprimées en pourcentage. Les débits caractéristiques pour chaque station sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques des bassins versants de l'Ouest du Bassin de Paris : aire drainée A, pente du drain principal S, pourcentage de terres arables Ara, pourcentage de prairies et forêts Grass, débit moyen interannuel Q_{mean}, débit maximum Q_{max} et baseflow index BFI.

Région hydrographique	ID	Bassin	A (km^2)	S ($m.km^{-1}$)	Ara (%)	Grass (%)	Q_{mean} ($m^{-3}.s^{-1}$)	Q_{max} ($m^{-3}.s^{-1}$)	BFI (-)
Bassin de la Seine en amont du barrage de Poses	1	La Seine*	65000				490.7	2282.4	0.75
Affluents intra-estuariens de Seine	2	La Lézarde	211	5.18	67	12	1.9	13.7	0.92
	3	La Brouisseresse	40	-	-	-	-	-	-
	4	Le Commerce	176	3.70	57	32	0.3	5.4	0.82
	5	Le Theluet	51	-	-	-	-	-	-
	6	La Sainte-Gertrude	59	8.99	52	44	4.3	29.5	0.95
	7	La Rançon	120	-	-	-	-	-	-
	8	L'Austreberthe*	214	5.56	65	29	2.3	15.3	0.94
	9	Le Cailly	246	5.20	47	41	3.1	11.1	0.94
	10	L'Aubette et le Robec	152	-	-	-	-	-	-
	11	L'Andelle*	756	3.89	51	46	6.2	21.1	0.94
	12	La Risle	2313	2.08	53	44	13.6	112.0	0.85
	13	L'Eure	6078	1.07	67	26	23.9	143.4	0.86
Rivières côtières de la Manche	14	La Valmont	364	3.73	74	19	3.2	12.5	0.93
	15	Le Durdent	366	3.65	73	22	4.0	16.4	0.95
	16	La Veules	28	-	-	-	-	-	-
	17	Le Dun*	109	7.31	79	14	0.3	6.1	0.84
	18	La Saâne	301	4.13	73	22	2.8	40.6	0.93
	19	La Scie	221	3.90	68	27	2.2	8.7	0.91
	20	La Varenne	362	4.73	48	49	3.1	12.3	0.91
	21	La Béthune	319	4.12	36	60	4.2	38.3	0.82
	22	L'Eaulne	318	4.63	60	37	3.2	12.7	0.90
	23	L'Yères*	310	4.82	57	40	3.1	12.2	0.91
	24	La Bresle	762	3.16	53	40	7.7	25.2	0.93

La représentativité des concentrations en MES à basse fréquence sur l'ensemble des classes de débit est présentée sur la Figure 3 pour l'ensemble des stations. Les résultats montrent que, globalement, le nombre d'échantillons diminue avec l'augmentation de la classe de débit, quelle que soit la station considérée. Pour les classes de débits inférieures à 30%, toutes les classes de débit sont échantillonnées et le nombre d'échantillons par classe représentent entre 1 et 60% du nombre total de concentrations en MES. Au-dessus de 30%, la plupart des classes ne sont pas échantillonnées. Pour les classes échantillonnées, le nombre de mesures de concentration en MES représentent entre 1 et 3% du nombre total de mesures de concentrations en MES.

La distinction entre hautes eaux et basses eaux selon le débit moyen interannuel montre que l'essentiel des mesures est réalisé en basses eaux. Le nombre de mesures de concentration en MES représentent ainsi entre 64% pour l'Eaulne à Martin l'Eglise et 81% pour le Dun au Bourg-Dun du nombre total de concentrations en MES. Par conséquent, cette analyse démontre que l'échantillonnage réalisé sur 18 rivières de l'Ouest du bassin de Paris sur-échantillonne les périodes de basses eaux et sous-échantillonne les crues, périodes d'exports majeurs des flux sédimentaires. Cumulé au fait que le nombre d'échantillons par année est faible et que les bassins versants hauts-normands s'avèrent particulièrement réactif (Laignel et al., 2008, 2006), la stratégie d'échantillonnage semble inadaptée pour le calcul de flux sédimentaire (Moatar et al., 2007). Ces hypothèses seront vérifiées lors du calcul de flux sédimentaires selon les différentes méthodes.

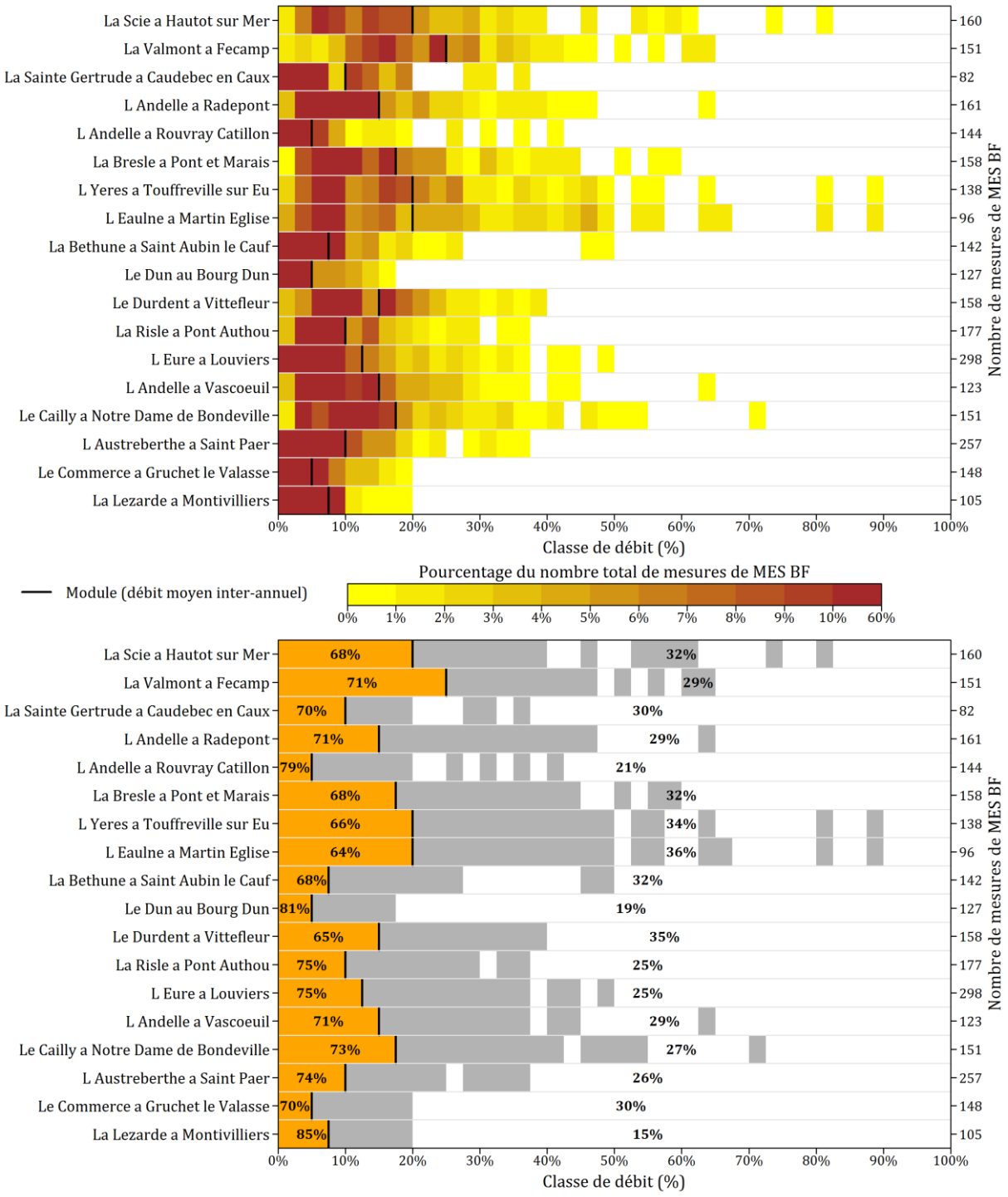

Figure 3 : Pourcentage du nombre total de mesures de concentrations en MES à basse fréquence par classe de débit et en basses eaux / hautes eaux pour chacune des stations (MES BF : concentrations en MES à basse-fréquence) (Landemaine, 2016).

1.3 Inter-comparaison des mesures sédimentaires

Cette étape se focalise seulement sur les jours où nous disposons à la fois d'une mesure de concentration en MES obtenue selon un prélèvement manuel et de mesures de concentration en MES obtenues par turbidité. Pour chacun des jours où les deux types de mesures sont disponibles, une inter-comparaison des valeurs de concentration en MES est réalisée. Ce travail concerne 6 stations : l'Austreberthe à Duclair, le Dun au Bourg-Dun, l'Yères à Touffreville-sur-Eu, l'Andelle à Radepont, l'Andelle à Vascoeuil et l'Andelle à Rouvray-Catillon.

Afin de considérer l'ensemble des compositions possibles des matières en suspension, la dispersion de la relation de tarage turbidité-concentration en MES a été prise en compte en adaptant un « cône de tarage » par station, dont la méthodologie est détaillée ci-après. L'ensemble des couples turbidité – concentration en MES ayant servi à l'établissement de la relation de calibration par station a été réparti en 10 classes de quantile (Figure 4).

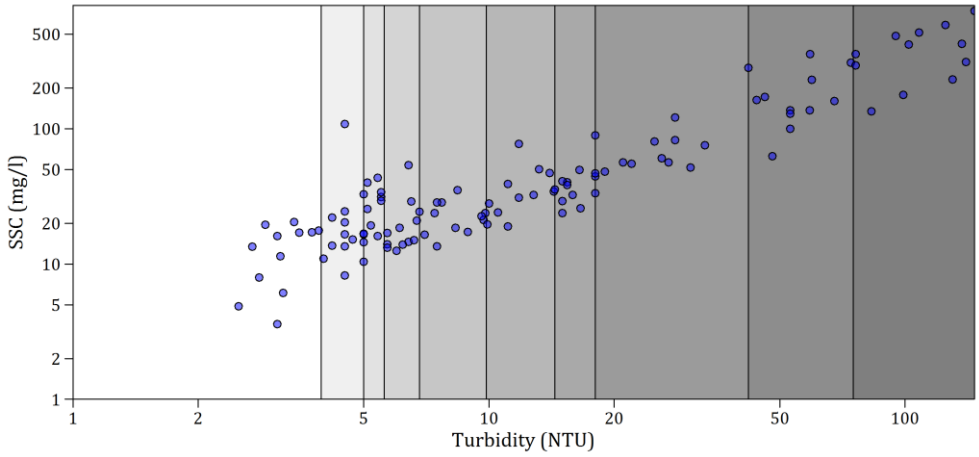

Figure 4 : Répartition des couples turbidité – concentration en MES en 10 classes de quantiles

Pour chaque classe, un couple est sélectionné aléatoirement. À partir des 10 couples tirés, une relation de tarage de type $y = a.x$ est établie. L'opération est répétée 1000 fois en vue de couvrir l'ensemble des combinaisons possibles et la distribution des 1000 coefficients *a*, où la pente de la relation de calibration est tracée (Figure 5).

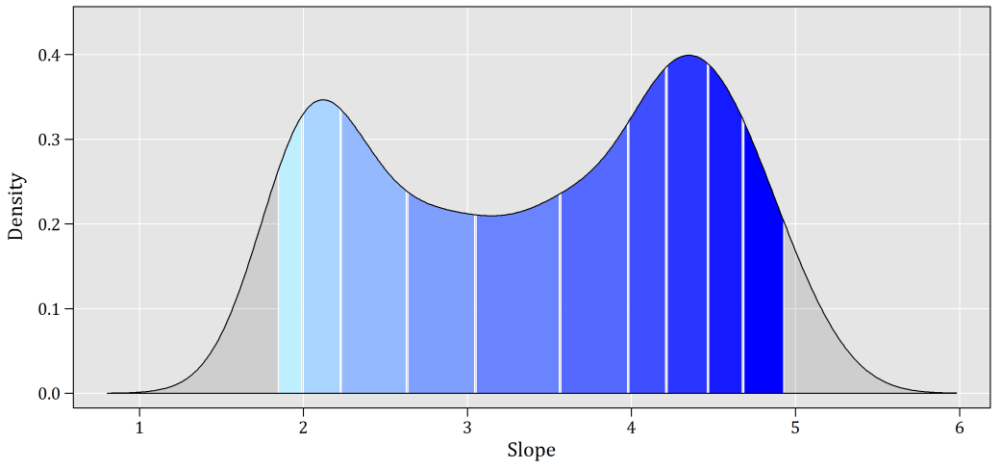

Figure 5 : Distribution des 1000 pentes de calibration simulées et représentation des 11 relations de tarage considérées (trait blanc).

Sur cette distribution, un intervalle de confiance à 95% est établi, borné par les pentes de quantile 2.5% et 97.5%. Neuf pentes intermédiaires, correspondant aux quantiles 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, et 90%, sont considérées arbitrairement pour décrire cette distribution. À partir de ces pentes caractéristiques, le cône de tarage est tracé, borné par les pentes de quantile 2.5% et 97.5% (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** 6). L'application de ce cône de tarage sur chaque valeur de turbidité se traduit alors par 11 valeurs de concentrations en MES possibles (11 pentes).

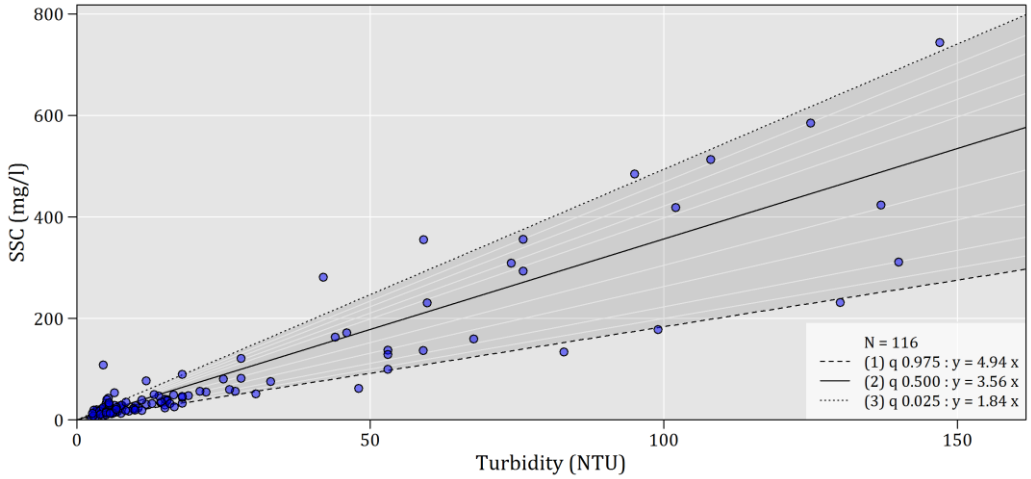

Figure 6 : Cône de tarage intégrant la dispersion de la relation de calibration turbidité – concentrations en MES.

Dans la mesure où les deux types de mesure n'ont pas été réalisés exactement au même moment (décalage de ± 15 min) et exactement au même endroit sur le tronçon hydrographique, l'intégralité des concentrations en MES mesurées à haute fréquence de la journée correspondante a été intégrée afin d'approximer cette variabilité spatiale et temporelle. La turbidité ayant été enregistrée à un pas de temps de 30 min, une journée se compose de 48 pas de temps. Un tirage aléatoire est réalisé à chaque pas de temps parmi les 11 concentrations en MES correspondantes. Le procédé est répété 1000 fois, donnant une distribution élargie des valeurs de concentrations en MES de la journée considérée (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** 7). Sur cette distribution est extrait un intervalle de confiance journalier à 95%, subdivisé ensuite en 10 classes de concentration en MES. La concentration en MES obtenue par prélèvement manuel est finalement positionnée selon les 10 classes de l'intervalle journalier.

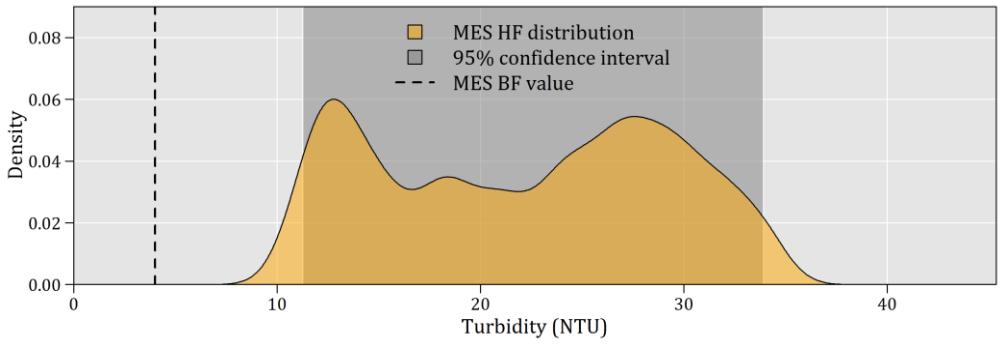

Figure 7 : Positionnement d'une valeur de concentration en MES obtenue par prélèvement manuel pour une journée donnée (MES BF) sur l'intervalle journalier à 95% des concentrations en MES mesurées par turbidité (MES HF).

Au final, sur les 84 comparaisons réalisées et réparties sur les 6 stations, 58 % des concentrations en MES issues du RNB ont une valeur inférieure à leur intervalle journalier haute-fréquence correspondant et 29% des concentrations en MES ont une valeur située dans les premiers 20% de leur intervalle journalier (Figure 8).

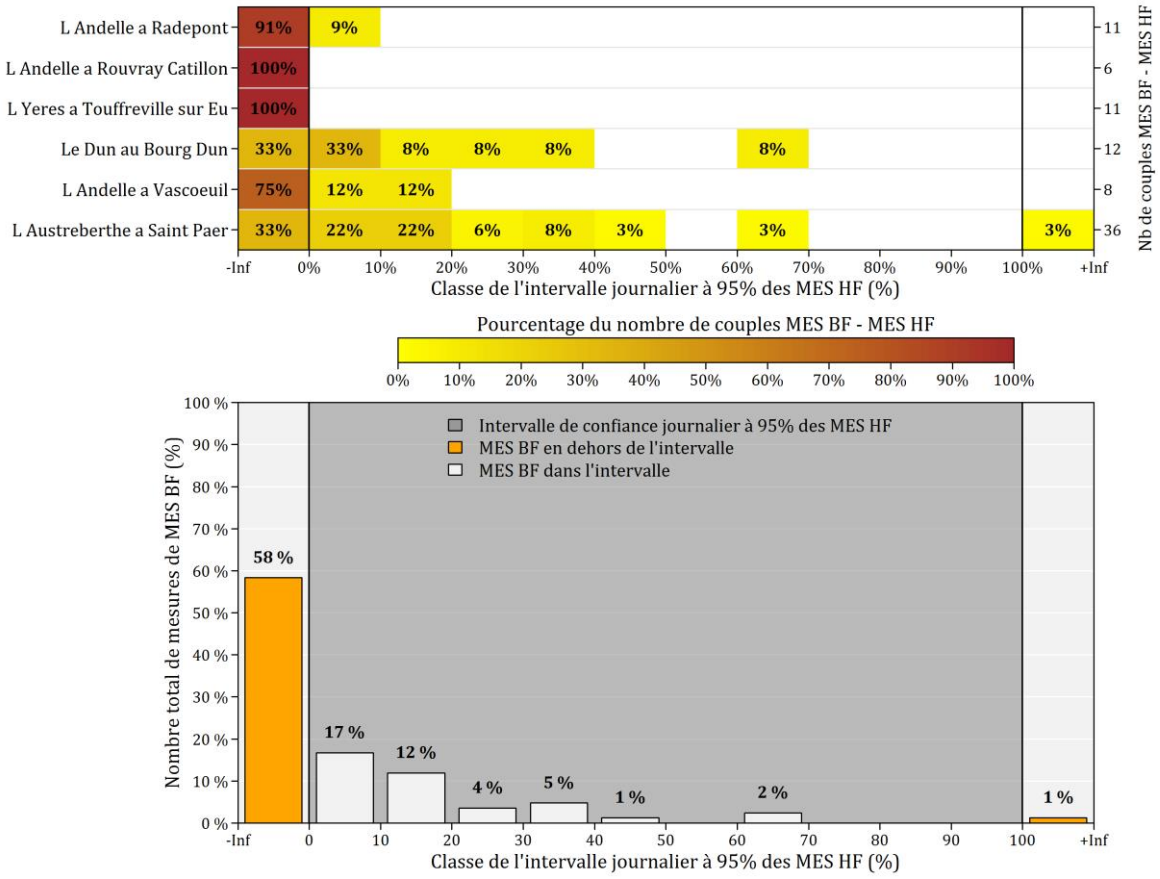

Figure 8 : Synthèse par station et synthèse globale de la position des concentrations en MES obtenues par prélèvement manuel (MES BF) par rapport à leur intervalle journalier de concentration en MES obtenues selon une conversion de mesure de turbidité par un cône de tarage (MES HF).

Malgré avoir pris en considération un intervalle de concentration en MES hautes-fréquences élargie, considérant l'ensemble des valeurs de turbidité journalière et un cône de tarage approximant l'ensemble des compositions possibles de matières en suspension, un décalage est observé entre les deux types de mesures, quel que soit la classe de concentration en MES, la classe de débit, ainsi que le bassin versant considéré (Figure 9).

En l'état, les causes de ce décalage restent inexpliquées et ce travail démontre d'une part, la nécessité de vérifier la compatibilité des mesures avant le calcul de flux sédimentaire, et d'autre part, la nécessité de recherches ultérieures afin d'harmoniser les mesures. L'influence de ce décalage sur les performances de prédiction des flux sédimentaires selon les 12 méthodes retenues a été également étudiée.

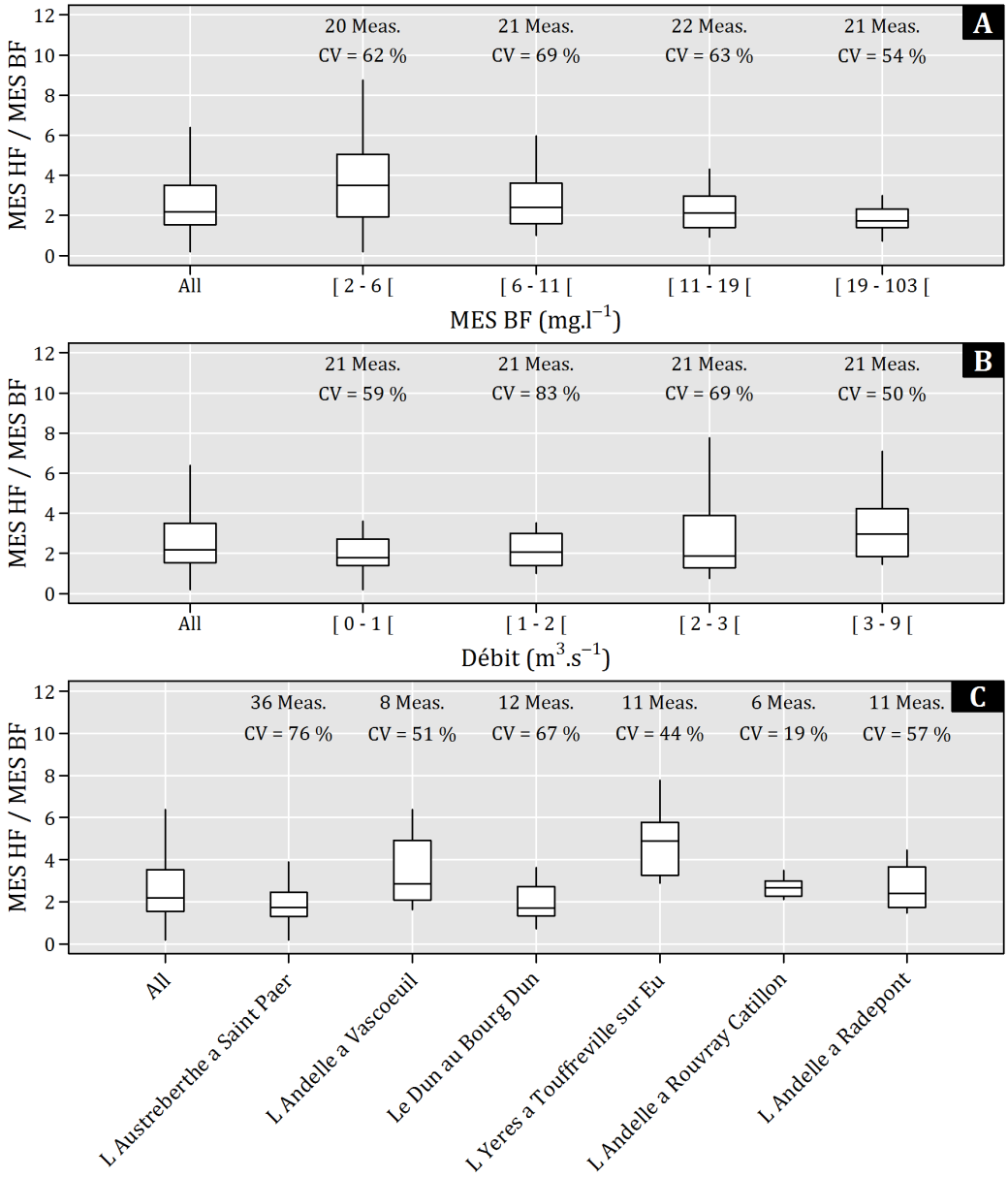

Figure 9 : Boxplot des rapports entre la concentration en MES moyenne journalière haute-fréquence et la concentration en MES basse fréquence par classe de concentration en MES basse-fréquence (A), par classe de débit (B) et par station hydrologique (C) (Landemaine, 2016).

1.4 Evaluation des performances de différentes méthodes d'estimation et sélection de la méthode la plus adaptée au contexte de l'étude

Parmi l'ensemble des méthodes proposées dans la littérature, 12 méthodes classiquement utilisées (Phillips et al., 1999) ont été retenues. Ces méthodes se répartissent en deux catégories : les méthodes d'interpolation et les méthodes d'extrapolation (Annexe 1). Les méthodes d'interpolation comprennent les méthodes « averaging estimator », « linear interpolation », et « ratio estimator ». Les méthodes d'extrapolation correspondent à la courbe de tarage sédimentaire dans sa version simple et ses versions tronquées selon le débit médian, les saisons, la montée et la descente de crue.

Pour chaque méthode et pour chaque mois où des mesures à haute fréquence de débit et de concentration en MES sont disponibles, le flux sédimentaire est estimé et comparé au flux sédimentaire réel par la mesure du biais (Eq. 1).

$$PBIAS = 100 \times \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} SY_{pred_i} - \sum_{i=1}^{n} SY_{obs_i}\right)}{\sum_{i=1}^{n} SY_{obs_i}} \quad (1)$$

Avec :
$PBIAS$: biais (%)
SY_{pred_i}: flux sédimentaire mensuel estimé selon une méthode pour le mois i considéré (t)
SY_{obs_i}: flux sédimentaire réel pour le mois i calculé à partir des mesures à haute fréquence (t)

Les biais sont compilés par méthode et représentés sous forme de boxplot afin d'observer le biais médian, ainsi que la dispersion des biais, ou imprécision de chaque méthode. Cette imprécision est quantifiée en faisant la différence entre le biais de quantile 90% et le biais de quantile 10%. Dans cette étude, une méthode optimale est dite « juste et précise » si le biais médian est proche de 0, dans un intervalle de ± 5% et si 80% des biais varient entre ± 20%, soit une imprécision maximale de 40% (Figure 10).

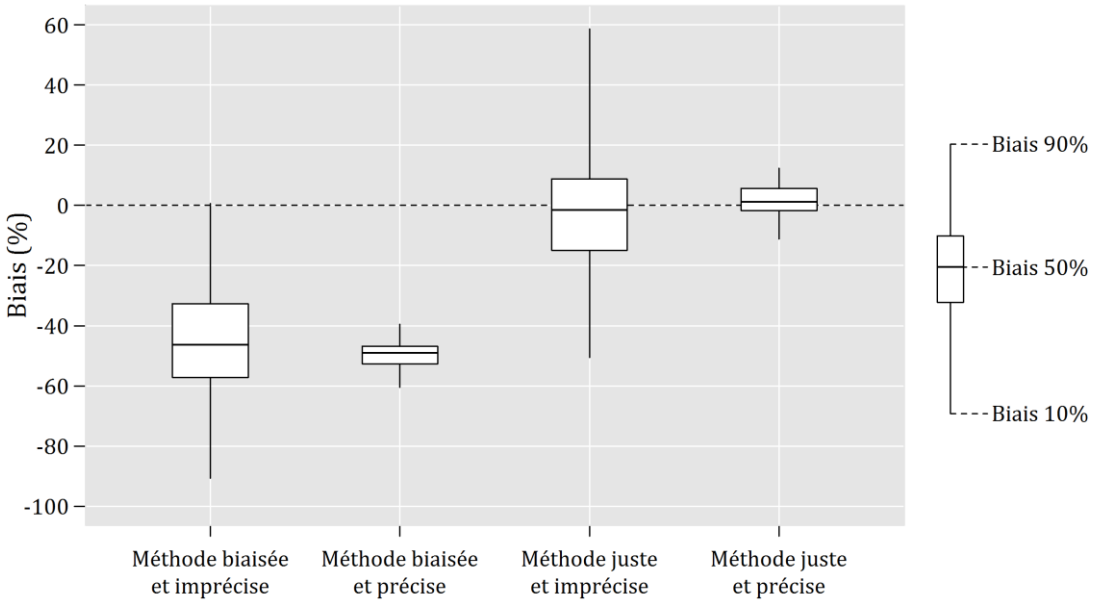

Figure 10 : Évaluation des performances d'une méthode par observation du biais médian et de la dispersion des biais (imprécision).

Pour l'ensemble des stations disposant de mesures à haute-fréquence, les flux sédimentaires mensuels ont été prédits selon les 12 méthodes et les résultats sont synthétisés sur la Figure 5. L'ajout de ce décalage cumulé à un échantillonnage inadapté des concentrations en MES se traduit par de mauvaises performances de prédiction des flux sédimentaires pour l'ensemble des 12 méthodes testées, avec en moyenne un biais médian de -50% et une imprécision variant de 60 à 170% (Figure 11).

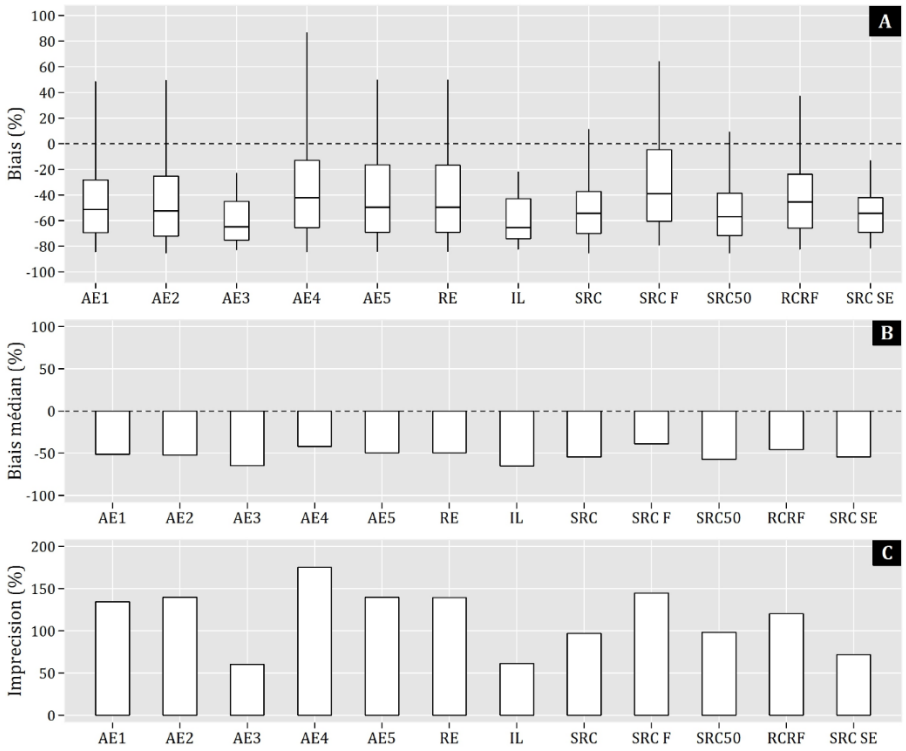

Figure 11 : Synthèse des performances de chacune des méthodes testées pour l'estimation des flux sédimentaires sur les rivières avec des mesures à haute-fréquence ; (A) boxplot des biais calculés entre flux sédimentaires réels et estimés pour l'ensemble des stations, agrégés par méthode, (B) biais médian et (C) imprécision (biais 90% - biais 10%) (Landemaine, 2016).

En conséquence, aucune des méthodes testées n'est satisfaisante pour le calcul de flux sédimentaire de l'ensemble des affluents intra-estuariens de Seine et des rivières littorales du Pays de Caux. L'utilisation conjointe des deux types de concentration en MES pour le calcul de flux sédimentaire est difficilement envisageable en l'état. Dans l'impossibilité d'établir un facteur de correction suffisamment robuste pour l'ensemble des conditions hydrologiques et l'ensemble des bassins versants, une nouvelle méthode de prédiction doit donc être développée et doit se baser sur un seul type de mesures. L'intérêt de la mesure par turbidité est de pouvoir enregistrer à haute fréquence la variabilité temporelle des concentrations en MES et ainsi étudié finement leurs dynamiques et leurs relations étroites avec les débits. Pour cette raison, dans la suite de ce travail, ces mesures sont préférées aux mesures de concentration en MES du RNB. La nouvelle méthode pourra également s'appuyer sur les chroniques de débit journalier disponibles à l'exutoire de 18 des 24 bassins versants de l'Ouest du Bassin de Paris (affluents intra-estuariens de Seine et rivières littorales du Pays de Caux).

Pour le détail de la méthodologie et des résultats, se reporter au Chapitre 2 de la thèse de Valentin Landemaine.

2 Typologie et analyse des paramètres physiographiques forçant les flux sédimentaires des bassins versants Seine Aval-Manche

Les objectifs de cet axe ont été de proposer une typologie des bassins versants Seine Aval-Manche et de mieux comprendre les rôles des caractéristiques physiographiques des bassins versants sur les flux sédimentaires et de tenter de mettre en évidence les paramètres les plus discriminants à partir de la combinaison statistiques des paramètres physiographiques et sédimentaires, mais également d'aboutir à une carte d'identité pour chaque bassin versant affluent de la Seine et du littoral à partir de la cartographie SIG (carte d'identité qui pourra être réutilisée pour d'autres études s'intéressant notamment à l'occupation du sol).

Dans la littérature, il est admis que les transferts hydro-sédimentaires dépendent de paramètres géomorphologiques (pris au sens large : morphologie et occupation du sol du bassin) et climatiques (Milliman et Syvitski, 1992 ; Ludwig et Probst, 1998 ; Harrison, 2000 ; Meybeck et al., 2003 ; Raux et al., 2011). Ainsi, les paramètres qui ont été extraits représentent un large panel de caractéristiques climatiques, anthropiques et géomorphologiques. Au total, 33 paramètres utilisés dans la littérature ont été calculés afin de caractériser chaque bassin versant (Annexe 2) :

- ✓ Des caractéristiques morphologiques du bassin : l'aire, l'intégrale hypsométrique, la pente du drain principal, etc.
- ✓ Des caractéristiques du réseau hydrographique des bassins : le coefficient de torrentialité, la densité de drainage, etc.
- ✓ Des caractéristiques d'anthropisation et d'occupations des sols,
- ✓ Des caractéristiques climatiques : les précipitations annuelles (conditionnant une partie de la variabilité hydrologique et sédimentaire annuelle).

Enfin, des paramètres supplémentaires, peu utilisés dans la littérature pour étudier les relations entre les bassins versants et l'érosion et les flux sédimentaires associés, ont été testés : élongation, dimension fractale, indice topographique IBK, indice de persistance du réseau hydrographique, indice de puissance du courant et densité de bétoires. Les paramètres illustrant le flux sédimentaire utilisés dans les analyses statistiques sont :

- ✓ Flux moyen : flux sédimentaire moyen mensuel par bassin versant,
- ✓ F_X mois : pourcentage du flux sédimentaire exporté en X mois,
- ✓ F_{max}/F_{min} : rapport du flux mensuel moyen maximum au flux mensuel moyen minimum,
- ✓ FF : rapport du flux moyen mensuel moins le flux mensuel moyen minimum sur le flux mensuel moyen maximum moins le flux mensuel moyen minimum,
- ✓ SSY : apport spécifique de sédiment pas bassin qui correspond au rapport du flux mensuel moyen à l'aire du bassin versant. C'est un très bon indicateur du potentiel érosif et il est souvent appelé taux d'érosion.

Les analyses statistiques : CAH (Classification Ascendante Hiérarchique) et ACP (Analyse sur Composante Principale) ont été réalisés pour discriminer, sur l'ensemble du jeu de données, les variables qui contrôlent la réponse du flux sédimentaire des bassins Hauts-Normands et pour proposer une typologie de ces bassins versants.

Classification Ascendante Hiérarchique

La CAH est un outil d'analyse exploratoire des données, dont le but ici est d'évaluer la relation entre les indices physiographiques des bassins versants et de classer ces derniers par groupes de bassins versants qui partagent des caractéristiques communes en considérant que le degré de similarité entre 2 bassins est maximum s'ils appartiennent au même groupe (ou cluster). Les différents bassins sont réunis dans des agrégats de taille à l'aide d'une mesure de similitude ou de distance (Raux et al., 2011). La représentation graphique de cette méthode est un arbre nommé « dendrogramme hiérarchique ». Dans ce dendrogramme, l'axe horizontal correspond à la distance de liaison. Ainsi, pour chaque nœud observé (où un nouveau cluster est formé) un critère de distance est mis en évidence pour les éléments respectifs qui ont été reliés entre eux dans un cluster. Le succès de cette analyse est d'interpréter les groupes d'après les variables utilisées. La méthode de classification de l'arbre utilise la dissimilarité entre les objets lors de la formation des ramifications de l'arbre. Parmi la variété des approches disponibles pour quantifier la dissimilarité, nous avons choisi de considérer la distance euclidienne, qui correspond à la distance géométrique entre les variables dans l'espace multidimensionnel. De plus, un lien ou une règle globale est nécessaire pour déterminer si deux groupes sont suffisamment similaires pour être reliés entre eux. La règle globale choisie dans cette étude est la méthode de Ward (Vega et al., 1998) . Cette méthode utilise une analyse de la variance pour évaluer les distances entre les clusters.
Toutefois, la compréhension de ses dissimilarités peut seulement être expliquée en réalisant en parallèle une ACP qui permet de rendre compte de la distribution des variables explicatives des bassins versants sur la composante principale.

Analyse en Composante Principale

L'ACP est une technique statistique qui peut être utilisée pour examiner la variabilité de données quantitatives. Elle est fréquemment appliquée aux données environnementales, où les ensembles de données peuvent être importants et difficiles à interpréter, et où les inter-relations complexes entre les variables sont difficiles à identifier et visualiser (Reid et al., 2009). En terme simple, l'ACP est une technique de réduction des données, de sorte que de nouvelles variables (dimensions principales) sont calculées à partir de combinaisons linéaires des variables originales.
La première dimension principale, compte pour la plus grande variabilité dans les données et fournit la plus grande quantité d'informations pour une description morphologique des bassins. Il peut y avoir également un nombre infini de nouveaux facteurs, avec chacun représentant moins de variabilité des données que le précédent (Webster, 2001). La relation entre une dimension et les variables d'origine est décrite par le pourcentage de la variance portée par une dimension (Ghimire, 2014).
Pour effectuer l'ACP, les valeurs des variables ont été centrées et normalisées, indépendamment de leur distribution originelle et de leur unité de mesure, afin d'avoir une moyenne de zéro et une variance unitaire. De plus, une matrice de corrélation des variables d'entrée a également été utilisée pour déterminer quels paramètres physiographiques sont discriminants sur la réponse sédimentaire des bassins Hauts-Normands.

Ces techniques permettent d'obtenir des informations sur les similitudes ou les différences entre des sites d'échantillonnage, d'identifier les variables responsables de variations spatiales et temporelles dans les processus étudiés et d'identifier les facteurs cachés qui expliquent la structure de l'ensemble des données (Gimenez et al., 2012).

Le couplage de l'ensemble des analyses statistiques menées nous permet de proposer une typologie avec 7 groupes de bassins versants dans le système Seine Aval-Manche (Figure 12 et 13). On constate à la fois une organisation Nord-Sud de part et d'autre de la Seine, en fonction des deux axes de drainage Seine et Manche, mais aussi de l'Ouest vers l'Est pour les bassins situés au Nord de la Seine. Les caractéristiques spécifiques de chacun des groupes sont les suivantes (les couleurs utilisées dans le texte pour les noms des bassins correspondent aux couleurs utilisées sur la carte de la Figure 13):

(1) Eure, Risle : ce sont des bassins aux flux moyens mensuels les plus élevés, et caractérisés par les paramètres géomorphologiques les plus élevés (aire, longueur, périmètre, largeur, longueur du réseau, longueur du drain principal, nombre de cours d'eau d'ordre 1, taux d'étagement, ordre de Strahler, IDPR, dénivellation maximale du bassin versant et du drain principal) ;

(2) Dun, Lézarde : ces bassins sont caractérisés par des valeurs élevées de l'intégrale hypsométrique (bassins les plus jeunes), de l'IPC, de l'apport spécifique de sédiments et du pourcentage de zones ruisselantes. Rapporté à la faible valeur de l'aire de leur bassin respectif, ils sont les plus sensibles à l'érosion ;

(3) Commerce, Valmont, Durdent, Rançon, Austreberthe, Aubette, Robec : ces bassins sont caractérisés par des valeurs assez élevées de la pente moyenne du bassin versant et du drain principal, mais surtout une très forte densité de bétoires ;

(4) Béthune : c'est un bassin au fonctionnement particulier, qui présente un très fort pourcentage de zones non ruisselantes, un fort coefficient de torrentialité, un IDPR élevé malgré la faible valeur de son aire et le rapport du flux maximum au flux minimum le plus élevé, dû à sa réponse hydrologique de type impulsionnelle ;

(5) Scie, Saâne, Cailly : ce sont des bassins aux valeurs moyennes pour l'ensemble des paramètres et pour les flux sédimentaires associés. On peut les assimiler à des bassins qui seraient représentatifs d'un bassin moyen Haut-Normand ;

(6) Yères, Eaulne, Varenne : ces bassins sont caractérisés par les valeurs les plus élevées de l'altitude moyenne, de la dénivellation maximale du bassin versant, du pourcentage de zones non ruisselantes et des valeurs moyennes de l'IDPR ;

(7) Andelle, Bresle : ces bassins sont caractérisés par des valeurs élevées de l'aire, périmètre, longueur, largeur, nombre de cours d'eau d'ordre 1, longueur du drain principal, ordre de Strahler, IDPR, dénivellation maximale du drain et des valeurs fortes pour le flux moyen. Ils présentent des caractéristiques similaires à l'Eure et la Risle, mais à un niveau plus faible car ces bassins sont moins matures.

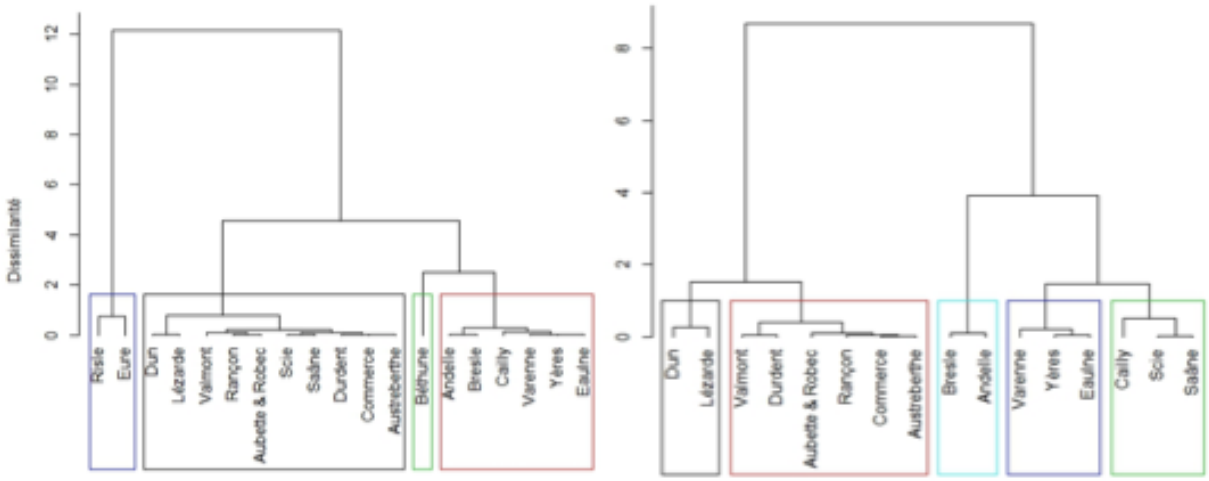

Figure 12 : Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) réalisées à partir des paramètres physiographiques et sédimentaires des bassins versants Seine-Manche (CAH à gauche, avec influence des plus grands bassins : Eure et Risle ; CAH à droite, sans l'influence des plus grands bassins : Eure et Risle) (Patault, 2014).

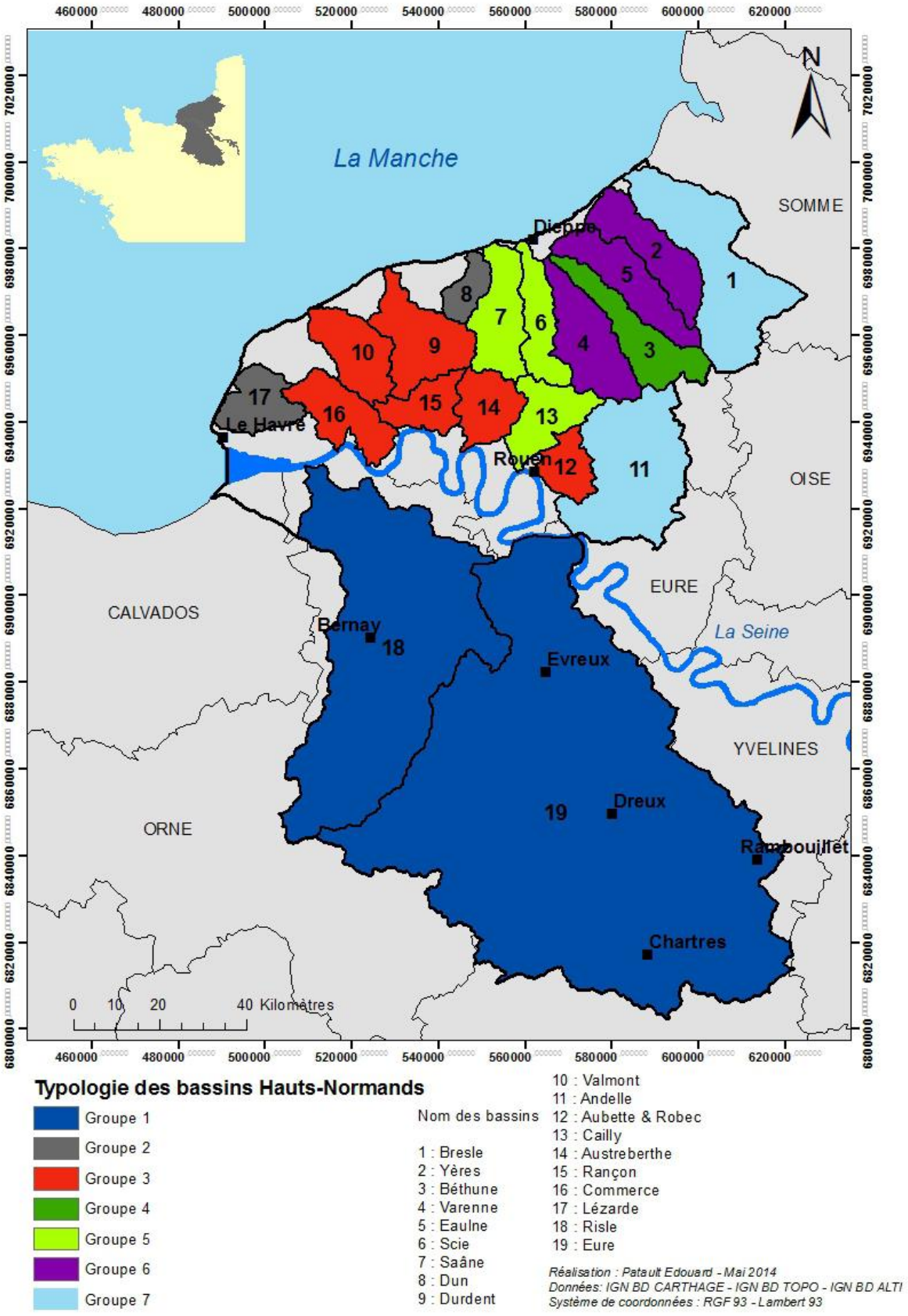

Figure 13 : Typologie des bassins versants Seine Aval-Manche à partir du croisement de l'ensemble des analyses statistiques (CAH, ACP) basées sur les paramètres physiographiques et sédimentaires (Patault, 2014).

La confrontation des matrices de corrélations a permis d'établir des relations entre les caractéristiques physiographiques des bassins versants Haut-Normands et les flux sédimentaires associés (Figure 14).

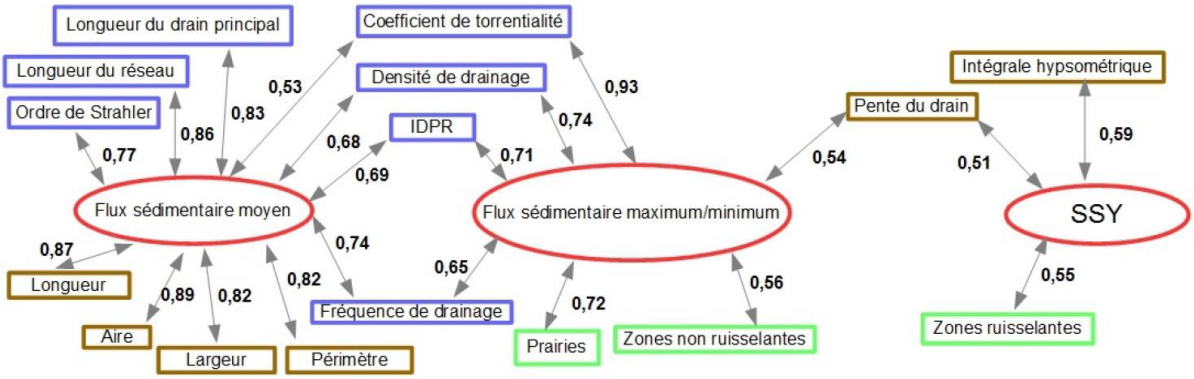

Figure 14 : Analyse des facteurs contrôlant les flux sédimentaires d'après la synthèse des matrices de corrélations (en rouge les paramètres liés aux flux sédimentaires, en marron les paramètres morphologiques, en bleu les paramètres liés au réseau hydrographique et en vert les paramètres liés à l'occupation du sol).

Analyse des facteurs contrôlant les flux sédimentaires d'après la synthèse des matrices de corrélations (en rouge les paramètres liés aux flux sédimentaires, en marron les paramètres morphologiques, en bleu les paramètres liés au réseau hydrographique et en vert les paramètres liés à l'occupation du sol).

Les résultats montrent que les paramètres géomorphologiques de taille (aire, longueur, largeur, périmètre) et la longueur du réseau et du drain principal sont des paramètres importants pour expliquer la réponse mensuelle moyenne du flux sédimentaire des bassins versants. Ces résultats confirment ceux de Meybeck et al. (2003) qui souligne que la taille du bassin versant (et notamment sa surface) est un facteur clé dans le contrôle du transport des concentrations en MES par les rivières.

Il apparaît également que la fréquence et la densité de drainage, l'IDPR, le coefficient de torrentialité, et la pente du drain sont des paramètres importants pour expliquer le rapport du flux maximum au flux minimum et donc pour expliquer la variabilité de la réponse sédimentaire du bassin, mais également pour expliquer la réponse mensuelle moyenne du flux sédimentaire. Nous pouvons ainsi supposer que les bassins versants dont la pente moyenne du drain est importante et le réseau hydrographique bien développé sont des bassins capables d'évacuer d'importants flux sédimentaires.

De plus, l'occupation du sol au travers du pourcentage de zones ruisselantes, l'intégrale hypsométrique et la pente du drain sont des paramètres qui expliquent l'apport spécifique de sédiments, résultats qui confirment ceux de Singh et al. (2008), qui indiquent, dans un contexte totalement différent (bassins versants Himalayens), qu'une valeur élevée de l'intégrale hypsométrique conduit à de plus forts apports spécifiques de sédiments. Les flux spécifiques sont d'autant plus importants que l'occupation des sols est propice au ruissellement et l'intégrale hypsométrique peu mature.

L'ordre de Strahler et le nombre de cours d'eau d'ordre 1, qui sont des paramètres peu utilisés dans la littérature pour rechercher un lien entre physiographie du bassin et flux sédimentaire/érosion, se révèlent être des paramètres très pertinents dans la relation avec la réponse du flux sédimentaire et pour l'établissement d'une typologie entre les bassins.

Néanmoins certaines incohérences par rapport à la littérature apparaissent. Par exemple, les précipitations annuelles cumulées, paramètre largement utilisé pour expliquer la réponse sédimentaire (Stocking et al., 1988, Lawrence et al., 2004), ne présente pas de lien avec le flux sédimentaire dans notre contexte. Ceci peut être lié à un manque d'hétérogénéité (étalement des valeurs) des précipitations entre les bassins versants. Il serait alors peut être plus judicieux, dans des études ultérieures, d'utiliser l'érositivité de la pluie (lié aux épisodes orageux) comme utilisé dans le modèle FKSM (Flemingh and Khadimi Scoring Model) d'après Flemingh et Khadimi (1982). La pente du bassin versant n'est pas non plus corrélée avec les flux sédimentaires, là encore sans doute à cause d'un manque d'hétérogénéité (étalement des valeurs) entre bassins, pourtant ce paramètre est utilisé dans de nombreux modèles d'érosion des sols comme le modèle FKSM (Flemingh et Khadimi, 1982), le modèle CSSM (Coleman et Scatena, 1986) et le modèle WSM (Wallingford Scoring Model) de Lawrence et al. (2004).

La dimension fractale et l'élongation ne semblent pas non plus adaptées dans cette étude. Il s'agit pourtant de paramètres discriminants dans d'autres études comme celle de Raux et al. (2011), sur les grands bassins versants mondiaux. Ceci est dû vraisemblablement à un problème d'échelle, et ces paramètres ne seraient donc pas adaptés à notre échelle d'étude.

Davantage de détail sur la méthodologie et les résultats sont disponibles dans Patault E., 2014, mémoire de Master 1 – Université de Rouen. De plus, des cartes d'identité des bassins versants sont également disponibles auprès du GIP Seine-Aval.

3 Proposition d'une nouvelle méthode de quantification des flux sédimentaires des bassins versants Seine Aval-Manche : le modèle WSRC (Weighted Sediment Rating Curve)

Face aux résultats de quantification entachés d'incertitudes avec les algorithmes de la littérature (cf. VI.1.), nous avons dû repenser notre méthode pour calculer des flux sédimentaires en considérant uniquement les mesures de MES à haute fréquence. L'intérêt de la mesure à haute fréquence est de pouvoir enregistrer la variabilité temporelle des concentrations en MES et ainsi étudier finement leurs dynamiques et leurs relations étroites avec les débits.

La solution choisie, appelée régionalisation, consiste à calibrer un modèle de prédiction des concentrations en MES pour chacune des rivières disposant de mesures à haute fréquence (Andelle, Austreberthe, Yères, Dun, Seine) et d'utiliser les caractéristiques physiographiques des bassins versants (topographie, géologie, occupation des sols, hydrographie, etc.) pour extrapoler aux rivières disposant seulement de mesures de débit.

3.1 Index de Réactivité Hydrosédimentaire (HSR)

Les analyses statistiques (ACP), croisant de nombreux paramètres physiographiques avec des descripteurs hydro-sédimentaires ont montré que plusieurs paramètres doivent être pris en compte pour caractériser le fonctionnement du bassin versant dans son ensemble (cf. VI.2.). Toutefois, l'utilisation simultanée de plusieurs paramètres complexifie la procédure de régionalisation. Dans ce contexte, un nouvel indice (HSR) a été développé pour à la fois combiner l'ensemble des paramètres précédemment identifiés et caractériser le comportement hydro-sédimentaire des bassins hauts-normands.

L'indice (HSR) proposé découle d'une analyse de la réponse hydrologique et sédimentaire en période de crue à partir des chroniques à haute fréquence de pluie, de débit et de concentration en MES des bassins versants précédemment étudiés. Pour expliquer les différences de réponse entre les bassins, l'influence de l'organisation spatiale de la topographie et de l'occupation des sols a été étudiée et synthétisée au travers de cet indice qui combine (i) l'organisation spatiale des terres arables, considérées comme des sources de ruissellement et de sédiments, (ii) l'occupation des sols le long des chemins d'écoulement des eaux et (iii) la distance de parcours et la pente depuis les zones de production jusqu'à l'exutoire du bassin versant. Les données utilisées sont le MNT au 25m pour la topographie et Corine Land Cover 2006 pour l'occupation du sol. Le traitement des données a été effectué sous SAGA GIS Environment (Conrad et al., 2015).

Les résultats (Tableau 2, Figure 15) indiquent que les bassins versants étudiés présentent des comportements hydro-sédimentaires variés et cohérents avec les travaux antérieurs sur le sujet. Par exemple, le Dun (index de 0.042) et l'Austreberthe (index de 0.030), qualifié de cours d'eau de type « torrentiel », présente une très forte valeur de l'index (Laignel et al., 2006, 2008). A l'inverse, le comportement hydro-sédimentaire de l'Andelle est plus tamponné, donnant une faible valeur de l'index (0.017).

Tableau 2 : Valeurs de l'index de réactivité hydro-sédimentaire pour les différents bassins étudiés. Cet index *HSR* caractérise le continuum hydro-sédimentaire selon différents paramètres ; *A* : aire du bassin versant ; C_{peak} : superficie maximale des cellules ruisselantes situées à égale distance de l'exutoire du bassin versant ; *S* : pente moyenne des chemins d'écoulement des eaux ; D_{peak} : longueur du chemin d'écoulement des eaux à l'exutoire ; C_{trap} : pourcentage de prairies et forêts le long du chemin d'écoulement des eaux (Landemaine, 2016).

Catchment	A (km²)	$\frac{C_{peak}}{A^{0.5}}$ (-)	S (m/km)	D_{peak} (km)	C_{trap} (%)	HSR (-)
Andelle	756	69	3.89	35.8	71	0.017
Yères	310	46	4.82	10.4	68	0.023
Austreberthe	214	79	5.56	25.2	52	0.030
Dun	109	77	7.31	15.3	63	0.042

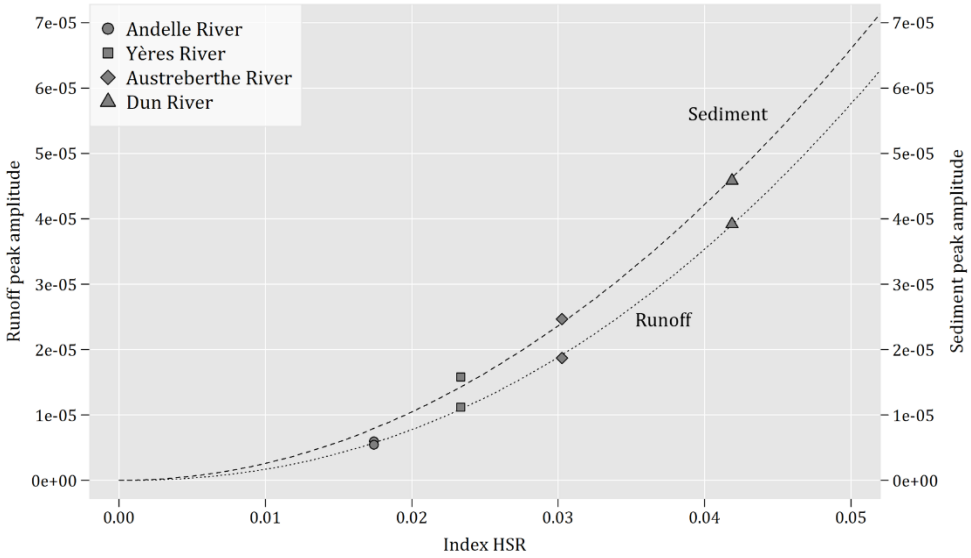

Figure 15 : Relations entre l'index de réactivité hydro-sédimentaire (HSR) et amplitude des pics de ruissellement et de flux sédimentaire pour les 4 bassins disposant de mesure à haute fréquence de débit et de concentration en MES (Landemaine, 2016 ; Landemaine et al., Soumis).

Le détail de la méthodologie et des résultats de l'index de réactivité hydro-sédimentaire sont décrits dans Landemaine, 2016 – Thèse de doctorat – chapitre 3.

3.2 Modèle d'extrapolation WSRC

Un nouveau modèle de prédiction des concentrations en MES (WSRC : Weighted Sediment Rating Curve, Tableau 3) a été développé en améliorant la courbe de tarage sédimentaire de type $C = a.Q^b$ (classiquement utilisée dans la littérature scientifique pour quantifier les concentrations en MES et les flux sédimentaires), grâce à l'ajout d'une fonction de pondération visant à corriger les limites de ce modèle : prise en compte de la position de chaque valeur de débit sur l'hydrogramme et de l'épuisement du stock sédimentaire faisant suite à des crues consécutives. Une procédure de calage simplifiée a été établie, faisant passer le nombre de paramètres à caler de deux pour la courbe de tarage sédimentaire (les paramètres a et b) à un pour le modèle proposé (le paramètre SSC_{max}).

Tableau 3 : Expression mathématique de la courbe de tarage sédimentaire pondérée (WSRC) et de la courbe de tarage classique (SRC) (Landemaine, 2016 ; Landemaine et al., Soumis)

Method	Name	Mathematical expression	
WSRC	Weighted sediment rating curve	$SSC_i = a.{Q_i}^b.W_i$ $W_i = 1 - exp\left(\frac{q_i}{Qb_i}\right)$	(1)
SRC	Sediment rating curve	$SSC_i = a.{Q_i}^b$	(2)
SSC_i	Suspended sediment concentration (mg.l^{-1}) at time i		
Q_i	Total streamflow (m^3.s^{-1}) at time i		
a, b	Coefficients		
W_i	Weighted function (dimensionless) at time i		
q_i	Filtered runoff (m^3.s^{-1}) at time i		
Qb_i	Baseflow (m^3.s^{-1}) at time i		

L'analyse des performances de prédiction des taux d'érosion annuels du modèle WSRC et du modèle SRC a été réalisée en deux temps afin de tester (1) les performances de prédiction des flux sédimentaires et (2) la robustesse des paramètres calibrés.

Pour atteindre l'objectif (1), une calibration des deux modèles a été réalisée à partir de l'ensemble des mesures de concentrations en MES disponibles sur chaque station. Le principe consiste à sélectionner le(s) paramètre(s) (un pour le modèle WSRC et deux pour le modèle SRC) minimisant l'écart entre les concentrations en MES prédites et observées. A partir des concentrations en MES prédites, des débits observés et de l'aire du bassin versant, les taux d'érosion annuels de chaque station sont calculés suivant les deux méthodes et comparés aux taux d'érosion annuels observés (Fig. 16). La qualité de l'ajustement est évaluée selon deux critères de performance : le NSE (Nash Sutcliffe Effiency) et le RMSE (Root Mean Square Error).

Pour le modèle SRC, une dispersion modérée est observée autour de la droite 1:1 (Fig. 16A). Le modèle sous-estime les faibles valeurs de taux d'érosion (SSY : Specific Sediment Yields) (< 15 t.km^{-2}.a^{-1}) pour l'Andelle et l'Austreberthe. Pour les fortes valeurs de SSY (> 15 t.km^{-2}.a^{-1}), une sous et surestimation est observée pour l'Autreberthe et la Seine. Cette dispersion explique que le NSE atteint 0.86 et le RMSE est de 2.63 t.km^{-2}.a^{-1}.

Le modèle WSRC améliore la prédiction des SSY annuels avec une dispersion limitée autour de la droite 1:1 (Fig. 16B). Le NSE augmente à 0.97 et le RMSE diminue à 1.10 t.km^{-2}.y^{-1} sans tendance à la sur ou sous-estimation.

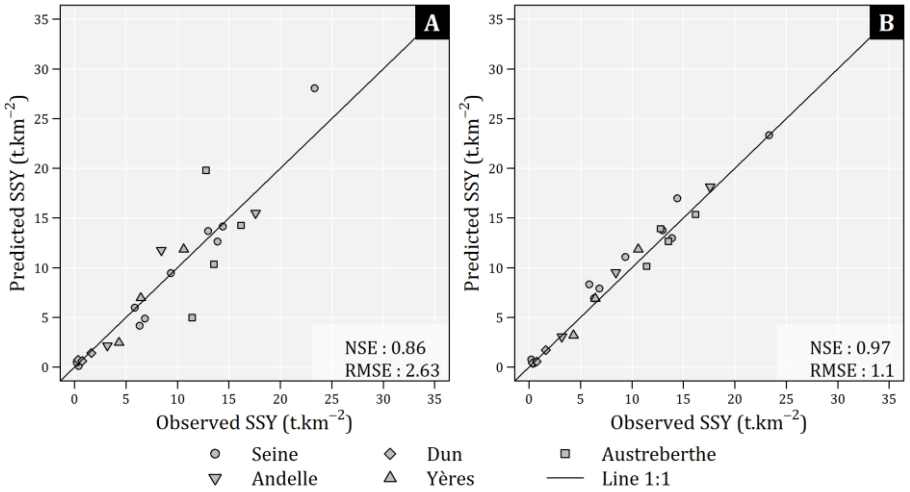

Figure 16 : Taux d'érosion annuels observés versus taux d'érosion annuels prédits pour la méthode SRC (A) et la méthode WSRC (B), pour les cinq rivières étudiées disposant de 2 à 8 ans de mesures de débit et de concentration en MES à haute fréquence.

Pour atteindre l'objectif (2), une validation croisée a été réalisée. La validation croisée consiste, dans un premier temps, à sélectionner aléatoirement pour chaque station une année de mesure de débit et de concentrations en MES à haute fréquence. Les paramètres respectifs à chaque méthode sont calibrés sur cette année de mesure de telle manière à minimiser l'écart entre les concentrations en MES observées et prédites. Dans un second temps, les paramètres retenus sont ensuite appliqués aux autres années de mesures non sélectionnées et les taux d'érosion annuels correspondant sont calculés.

La calibration par année augmente les performances du modèle SRC avec un NSE et un RMSE qui augmente respectivement à 0.99 et 0.64 t.km-^{2}.a^{-1} (Fig. 17A). Cependant, l'application des paramètres calibrés sur les années de validation conduit à de mauvaises performances de prédiction, avec un NSE de 0.17 et un RMSE de 16.4 t.km-^{2}.a^{-1} (Fig. 17B). De fortes surestimations et sous-estimations des SSY sont observées, quel que soit le bassin versant considéré, conduisant à une forte dispersion autour de la droite 1:1. Ce résultat démonte que la calibration par année augmente les performances de prédiction par ajustement de paramètres spécifiques au régime sédimentaire de l'année considérée. Cependant, la calibration par année réduit drastiquement la validité des paramètres du modèle en dehors de la période de calibration.

Concernant le modèle WSRC, la calibration par année améliore également les performances de prédiction des SSY avec un NSE et un RMSE de 0.96 et de 1.27 t.km-^{2}.a^{-1}, respectivement (Fig. 17C). Contrairement au modèle SRC, le modèle WSRC fournit de bons résultats pour la validation avec un NSE de 0.75 (Fig. 17D). Une légère tendance à la surestimation est observée, tout particulièrement pour la Seine et l'Austreberthe, mais la dispersion est clairement plus faible que précédemment avec un RMSE de 3.18 t.km-^{2}.a^{-1}. Plusieurs raisons expliquent pourquoi le modèle WSRC améliore la prédiction des taux d'érosion spécifique SSY. Premièrement, la forte variabilité des paramètres a et b du modèle SRC entre les années de calibration est supprimée, puisque ces paramètres sont déterminés pour l'ensemble de la chronique de mesure de débit et de concentrations en MES. Deuxièmement, chaque valeur de débit est pondérée selon sa position sur l'hydrographe (montée de crue, descente de crue, étiage, etc.). Troisièmement, le paramètre SSC_{max} calibré par année correspond à la concentration en MES maximale que le modèle peut prédire, empêchant en conséquence la surestimation de SSY durant les hautes-eaux. Enfin, la variabilité du paramètre SSC_{max} est

faible et dans la mesure où la calibration par année ou sur l'ensemble de la période de mesure donne des performances similaires, une unique valeur de SSC_{max} peut être appliquée à l'ensemble de la chronique de mesures de débit et pouvant être déterminé avec quelques années de mesures.

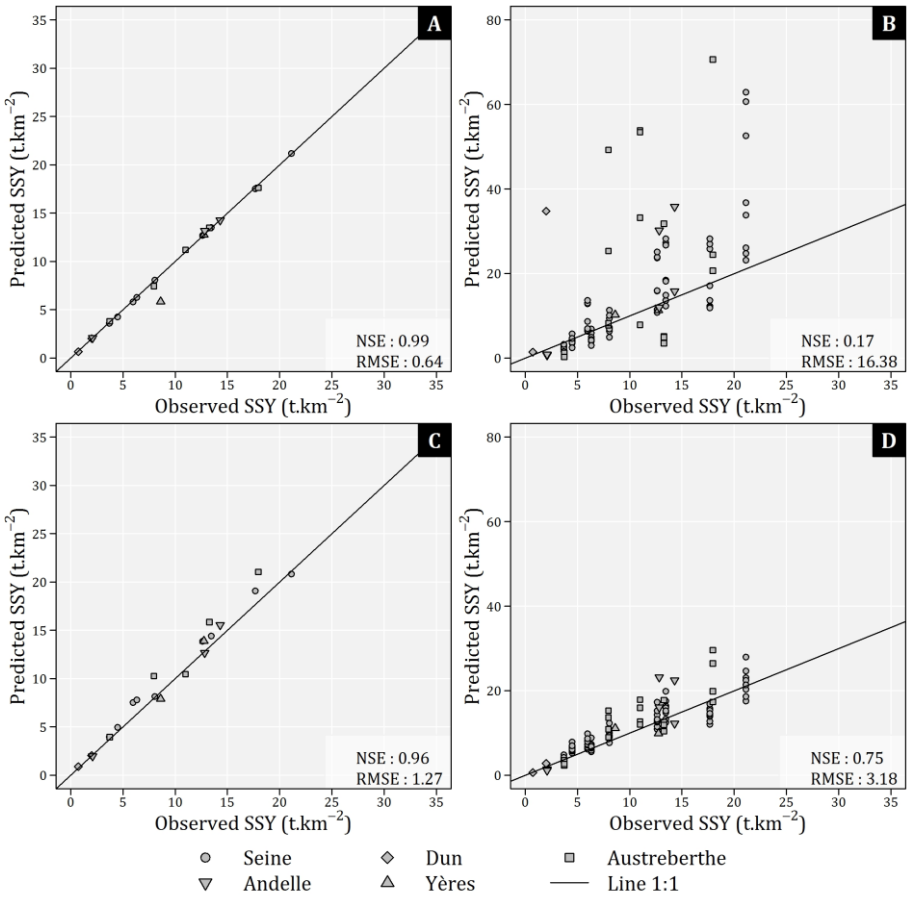

Figure 17 : Taux d'érosion spécifique annuel (SSY) observe versus taux d'érosion spécifique annuel prédit calculé par validation croisée pour le modèle SRC et WSRC ; (A, B) Calibration et validation pour le modèle SRC ; (C, D) Calibration et validation pour le modèle WSRC.

Une fois le modèle calibré pour chaque bassin versant disposant de mesures à haute fréquence, le paramètre SSC_{max} du modèle, déterminé pour chaque bassin versant, a été mis en relation avec l'indice de réactivité hydro-sédimentaire (HSR). Une relation empirique a ensuite été développée pour le contexte régional, permettant le calcul de concentration en MES, de flux sédimentaires et de taux d'érosion spécifique pour l'ensemble des affluents intra-estuariens de Seine et des rivières littorales (Fig. 18A).

Une dernière étape a consisté à déterminer les incertitudes sur les flux sédimentaires prédits à partir de cette relation et du modèle WSRC et d'identifier l'échelle temps (1 mois, 2 mois, 12 mois, etc.) où cette méthode peut être qualifiée de juste et précise, c'est-à-dire avec un biais médian autour de 0% et une erreur de ± 40%. Dans un premier temps, pour les mois couverts par des mesures à haute fréquence, les flux sédimentaires ont été calculés. Dans un second temps, pour chaque station, un tirage aléatoire croissant est réalisé en sélectionnant de une valeur de flux sédimentaire à vingt valeurs de flux sédimentaires. Pour chaque période de temps (de 1 à 20 mois), les flux sédimentaires sont sommés et comparés aux flux

sédimentaires observés correspondant. L'erreur est quantifiée par la mesure du biais (Eq. 1). Cette opération est répétée 1000 fois dans le but de dériver un intervalle de confiance à 90% des biais, ainsi que le biais médian.

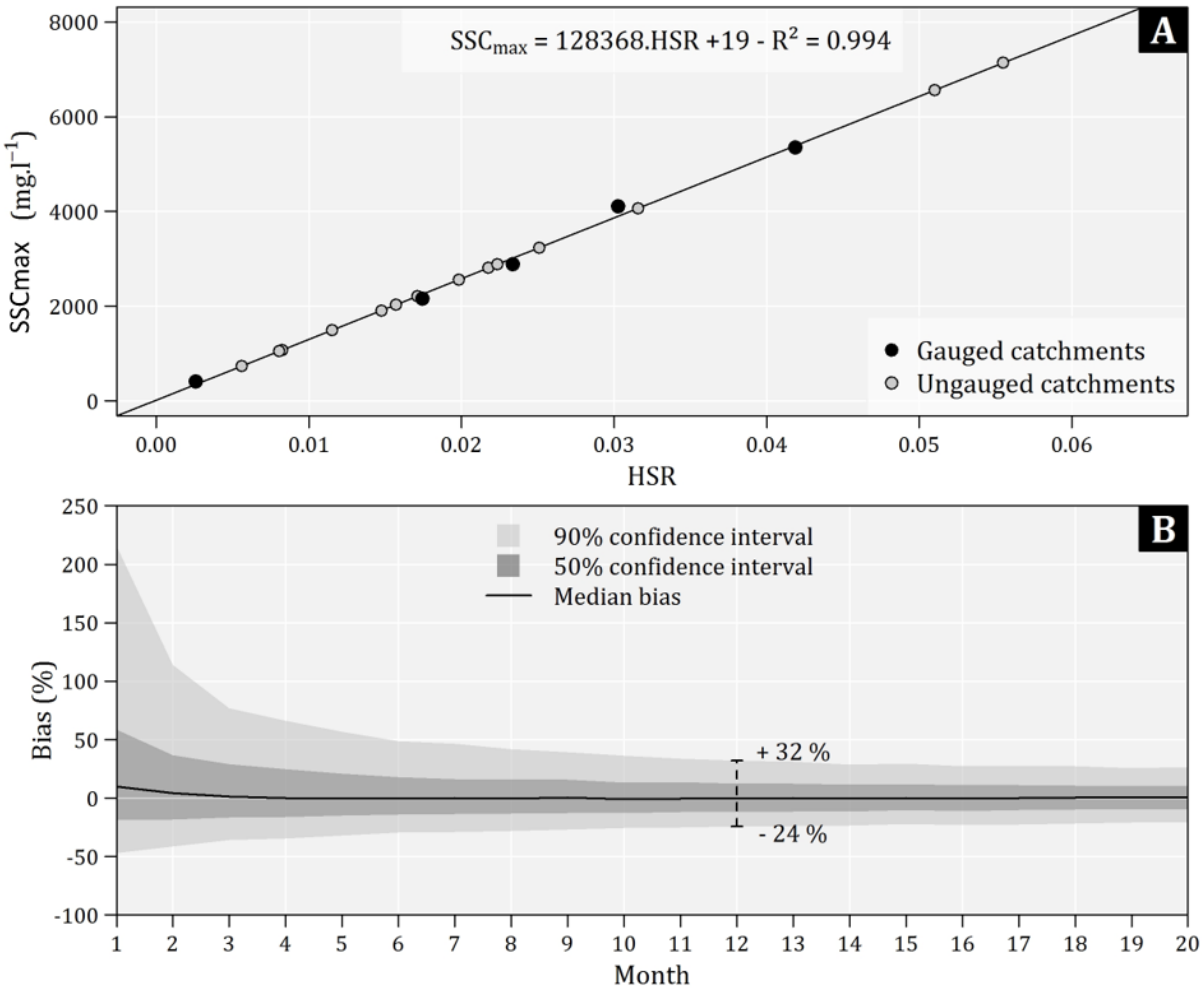

Figure 18 : (A) Relation entre le paramètre du modèle WSRC et l'index de réactivité hydro-sédimentaire (HSR) pour les bassins versants jaugés (bassins disposant de mesure à haute fréquence en noir) et non jaugés (bassins ne disposant de mesure à haute fréquence en gris) du bassin Seine Aval-Manche ; (B) Convergence des biais et des intervalles de confiance à 90% pour l'ensemble des bassins versants jaugés. Le biais médian et l'intervalle de confiance à 90% sont issus d'un tirage aléatoire de flux sédimentaires mensuels calculés par le modèle WSRC, agrégés pour le nombre de mois donné. Le flux sédimentaire total est comparé au flux sédimentaire observé par la mesure du biais. L'opération est répétée 1000 fois (Landemaine, 2016 ; Landemaine et al., Soumis).

Les résultats sont synthétisés sur la Figure 18B. A l'échelle d'un mois, l'erreur est importante, avec un biais médian qui varie entre -50% et +200% entre flux sédimentaire mensuel observé et prédit. Cependant, avec l'augmentation du nombre de mois considérés, l'erreur sur la prédiction des flux sédimentaires diminuent. Pour un bilan réalisé sur une période de 6 mois, l'incertitude se situe entre -50% et +50% avec un biais médian proche de 0%. Au bout de 12 mois, cette incertitude diminue encore et se situe entre -24% et +32% avec un biais médian proche de 0%. Ces résultats démontrent que la méthode proposée est en mesure de prédire des flux sédimentaires annuels avec une incertitude limitée.

De cette méthode, les flux sédimentaires et les taux d'érosion (ou flux sédimentaires spécifiques) moyens annuels ont été calculés sur 19 des 24 bassins versants Seine Aval-Manche, couvrant 97% de la superficie du territoire d'étude. Nous proposons ainsi une cartographie du flux sédimentaire spécifique moyen ou taux d'érosion moyen (SSY) de chaque rivière du bassin Seine-Aval Manche (Fig. 19). Cette cartographie nous apprend que SSY varie en moyenne entre 2.7 to 55.9 $t.km^{-2}.y^{-1}$, avec des valeurs plus élevées pour les rivières littorales du Pays de Caux que pour les affluents de la Seine. Les taux d'érosion calculés confortent la conclusion tirée des premiers bilans d'exports de sédiments réalisés sur quelques bassins versants et sur quelques années : les exports de sédiments des bassins versants normands sont faibles au regard des exports des bassins européens de taille similaire situés dans le même contexte climatique. Les écarts trouvés avec les précédents taux d'érosion calculés démontrent cependant la nécessité de réaliser cette quantification sur une période de temps décennale en vue de fournir des chiffres représentatifs d'une longue période de temps.

Cette approche régionale a été également l'occasion de fournir une quantification des apports sédimentaires fluviatiles à l'estuaire de Seine (Figure 20). Le flux sédimentaire moyen annuel de la Seine au barrage de Poses (limite physique entre le fleuve et l'estuaire) est évalué à 494 000 $t.an^{-1}$, avec un écart type de 288 000 $t.an^{-1}$. Les apports sédimentaires moyens annuels des affluents intra-estuariens de Seine sont évalués à 55 500 $t.an^{-1}$, avec un écart type de 46 600 $t.an^{-1}$. Ils représentent ainsi 10% de l'ensemble des apports sédimentaires à l'estuaire de Seine. En plus de la quantification des flux sédimentaires, les chroniques journalières de concentration en MES produites pour la Seine et la quasi-totalité des affluents intra-estuariens de Seine viendront alimenter dans d'autres études la modélisation du fonctionnement hydro-morpho-sédimentaire de l'estuaire de Seine (Lazure and Dumas, 2008; Le Hir et al., 2011).

Les performances de la méthode WSRC ont été également comparées à la méthode proposée par Avoine (1985), méthode actuellement utilisée pour le calcul de flux sédimentaire au barrage de Poses, limite physique entre le fleuve et l'estuaire. Sur la période disponible de mesures à haute fréquence, les concentrations en MES ont été prédites suivant les deux modèles et comparées aux concentrations en MES prédites (Fig. 21A et 21B). Pour le modèle WSRC, la dispersion est importante, mais contenue autour de la droite 1:1, sans de véritables tendances à la sur ou sous-estimation des concentrations en MES. Le NSE est ainsi de 0.56 avec un RMSE de 20.54 mg/l (Fig. 21A). Pour le modèle d'Avoine, les performances sont nettement moins bonnes. De très fortes sur et sous-estimations sont observées donnant un NSE négatif de -0.47 et un RMSE de 37.63 mg/l (Fig. 21B). Ces résultats montrent une nouvelle fois, que même en tronquant les concentrations en MES suivant la montée ou la descente de crue, la courbe de tarage type $C = aQ^b$ fournit de mauvaises performances. Dans ces conditions, les performances de prédiction pour les flux sédimentaires mensuels et annuels sont également mauvaises. Pour les flux sédimentaires mensuels, le NSE est de -0.12 et le RMSE est de 90 573 t (Fig. 21D). Pour les flux sédimentaires annuels, le NSE est de -0.40 et le RMSE est de 516 139 t (Fig. 20F). Pour le modèle WSRC, le NSE est 0.95 et de 99 055 t pour le flux sédimentaire annuel (Fig. 21E).

Le détail de la méthodologie et des résultats du modèle l'index de réactivité hydro-sédimentaire sont décrits dans Landemaine, 2016 – Thèse de doctorat – chapitre 4.

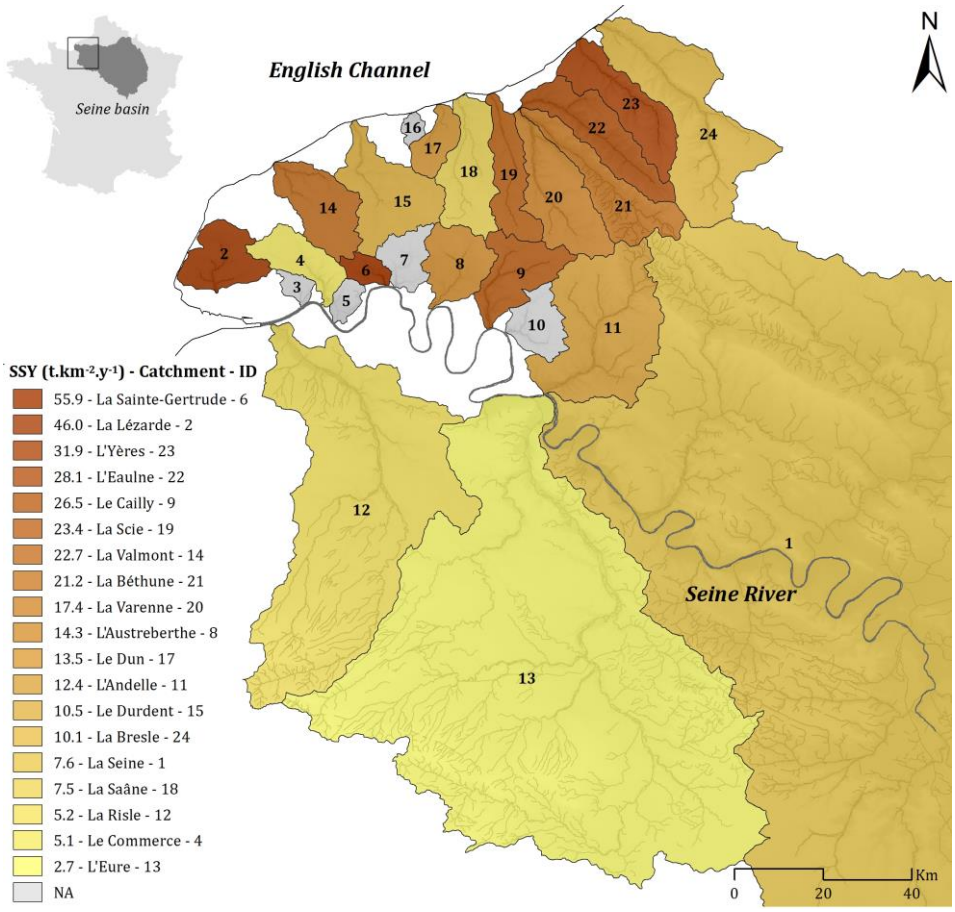

Figure 19 : Flux sédimentaire spécifique des bassins versants Seine Aval-Manche (Landemaine, 2016 ; Landemaine et al., Soumis). Les valeurs correspondent à des flux sédimentaires spécifiques moyens calculés pour la période 1990-2012.

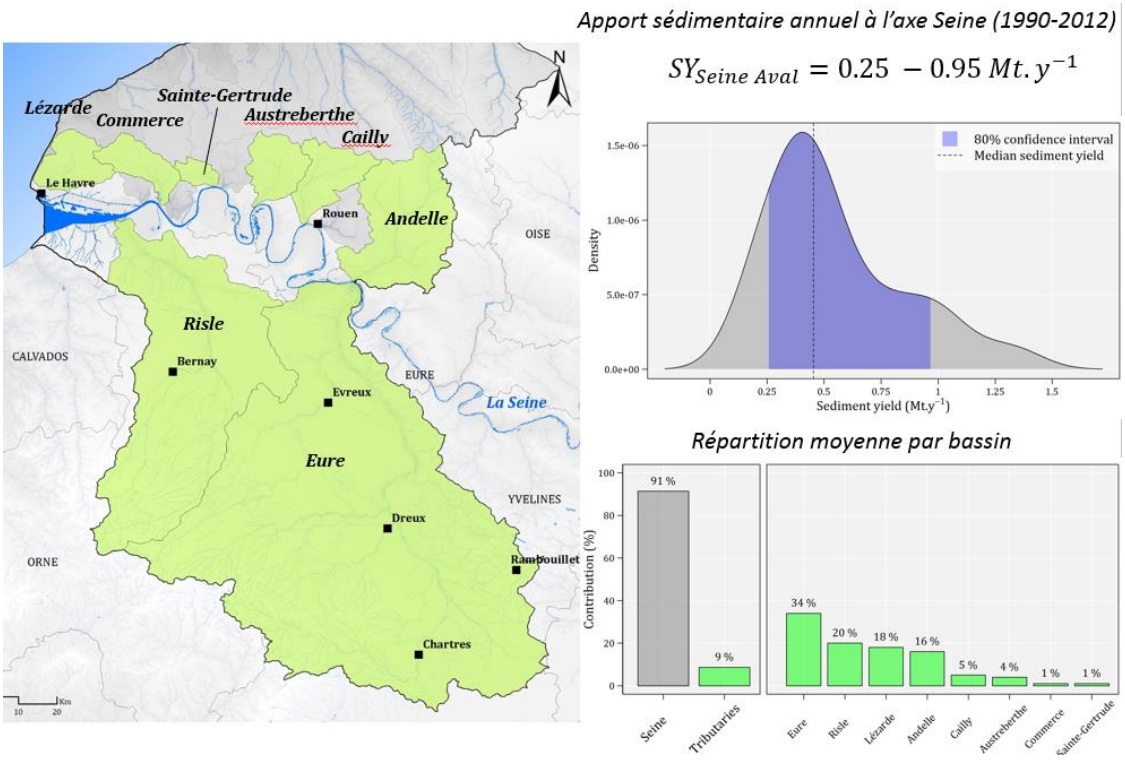

Figure 20 : Répartition des apports sédimentaires moyens à l'estuaire de Seine, de la Seine à Poses et des affluents intra-estuariens de Seine.

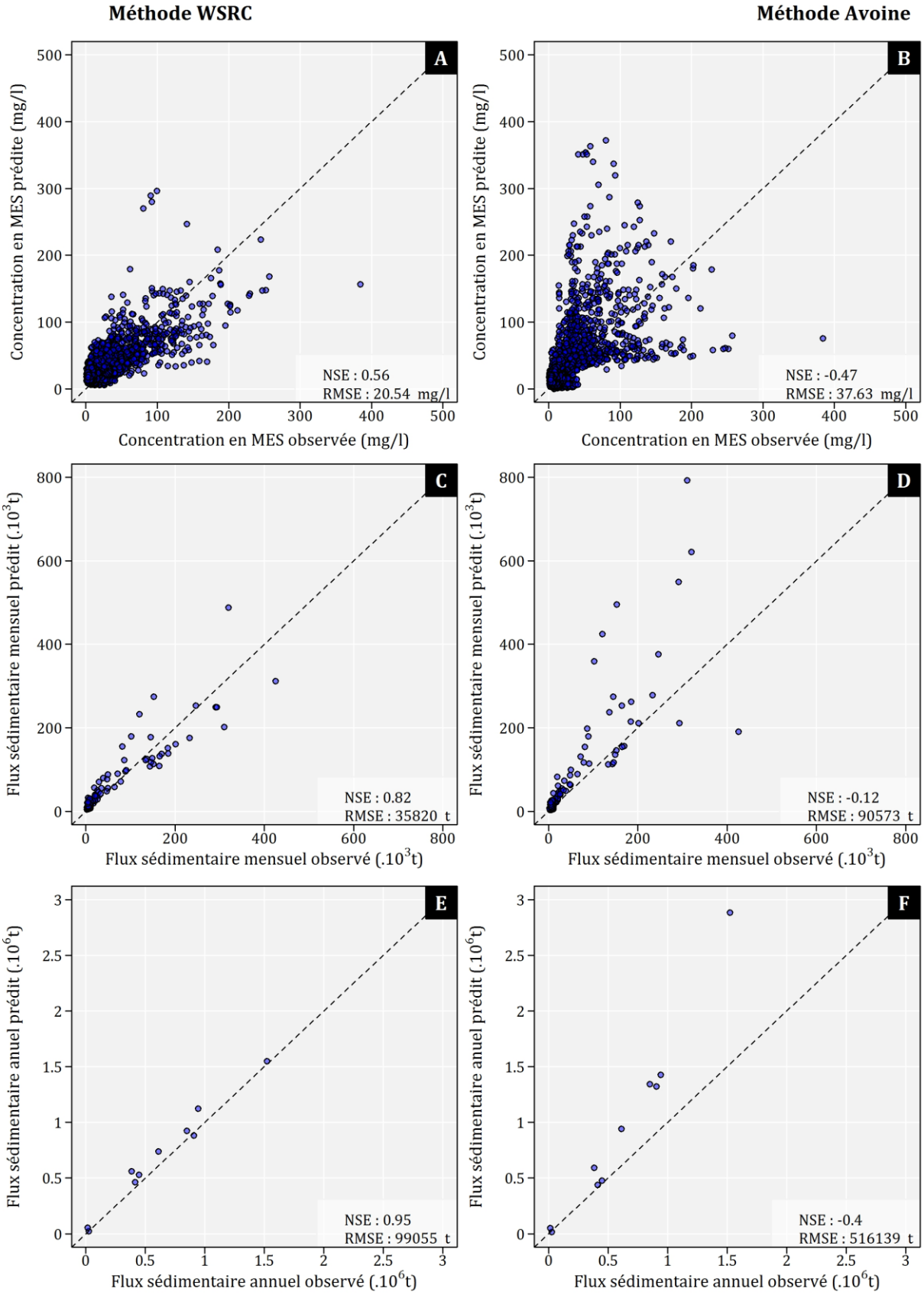

Figure 21 : Comparaison des performances de prédiction du modèle WSRC et du modèle d'Avoine sur la Seine à Poses sur les concentrations en MES (A, B), sur les flux sédimentaires mensuels (C, D) et sur les flux sédimentaires annuels (E, F).

Conclusion

Les plateaux lœssiques normands sont particulièrement sensibles à l'érosion et les bassins versants intra-estuariens de la Seine et du littoral de la Manche sont confrontés à de nombreux problèmes de pollutions des masses d'eaux et des phénomènes de coulées boueuses en lien avec cette érosion et les transferts sédimentaires associés.
Dans le cadre des précédents programmes Seine Aval (et ce depuis SA 2), des données à haute fréquence ont été acquises sur plusieurs affluents de la Seine, mais également sur quelques rivières littorales (projet Beaches At Risk du programme Interreg). Ces données ont permis de quantifier des flux sédimentaires sur 1 à 2 années sur chacun des bassins étudiés et conduit à des extrapolations de manière approximative sur les autres bassins Seine Aval-Manche, sans pouvoir évaluer les incertitudes sur les chiffres proposés.

Le travail proposé dans le cadre du projet AffluSeine avait comme objectifs de :
- Quantifier de manière la plus précise possible les flux sédimentaires de l'ensemble des affluents intra-estuariens à la Seine, en combinant données acquises à base fréquence et celles acquises à haute fréquence, en utilisant différentes méthodes de calculs des flux développées ces dernières années dans la bibliographie, et proposer éventuellement une nouvelle méthode de quantification,
- Proposer une typologie des bassins versants Seine Aval-Manche et mieux comprendre le rôle des bassins versants et de leurs caractéristiques physiographiques sur les flux sédimentaires, à partir d'un croisement statistique de l'ensemble de ces données.

Parmi l'ensemble des méthodes proposées dans la littérature pour quantifier l'érosion et les flux sédimentaires, 12 méthodes ont été retenues. Ces méthodes se répartissent en deux catégories : les méthodes d'interpolation et les méthodes d'extrapolation. L'application de ces méthodes à notre contexte a abouti à de mauvaises performances de prédiction pour l'ensemble des algorithmes testés. Aucune des méthodes n'apparaît donc satisfaisante pour le calcul de flux sédimentaire sur l'ensemble des affluents intra-estuariens de la Seine et des rivières littorales du Pays de Caux. L'utilisation conjointe des deux types de concentration en MES (haute et basse fréquence) pour le calcul de flux sédimentaire est difficilement envisageable en l'état.

Les analyses statistiques (CAH et ACP) menées sur 33 paramètres physiographiques (descripteurs morphologiques du bassin et du réseau hydrographique et de l'occupation du sol), climatiques et sédimentaires sur l'ensemble des bassins versants Seine Aval-Manche ont permis de proposer une typologie composée de 7 groupes de bassins.
La confrontation des matrices de corrélations a montré qu'il existait de nombreuses relations entre les caractéristiques physiographiques des bassins versants et les flux sédimentaires associés. Les principaux paramètres jouant un rôle sur les flux sédimentaires sont : l'aire, la longueur, la largeur, le périmètre et l'intégrale hypsométrique du bassin, la longueur du réseau et du drain principal, la pente du drain la fréquence et la densité de drainage, l'IDPR, le coefficient de torrentialité, l'ordre de Strahler, le nombre de cours d'eau d'ordre 1 et l'occupation du sol au travers du pourcentage de zones ruisselantes.

Face aux résultats de quantification entachés d'incertitudes avec les algorithmes de la littérature, un nouveau modèle de prédiction des concentrations en MES (WSRC : Weighted

Sediment Rating Curve, Tableau 2) a été développé en améliorant la courbe de tarage sédimentaire de type $C = a.Q^b$, grâce à l'ajout d'une fonction de pondération visant à corriger les limites de ce modèle : prise en compte de la position de chaque valeur de débit sur l'hydrogramme et de l'épuisement du stock sédimentaire faisant suite à des crues consécutives. Une fois le modèle calibré pour chaque bassin versant disposant de mesures hautes-fréquences, le paramètre du modèle a été mis en relation avec un indice de réactivité hydro-sédimentaire (HSR). L'indice (HSR) proposé découle d'une analyse de la réponse hydrologique et sédimentaire en période de crue à partir des chroniques hautes-fréquences de pluies, de débits et de concentration en MES des bassins versants. Pour expliquer les différences de réponse entre les bassins, l'influence de l'organisation spatiale de la topographie et de l'occupation des sols a été étudiée et synthétisée au travers de cet indice qui combine (i) l'organisation spatiale des terres arables, considérées comme des sources de ruissellement et de sédiments, (ii) l'occupation des sols le long des chemins d'écoulement des eaux et (iii) la distance de parcours et la pente depuis les zones de production jusqu'à l'exutoire du bassin versant. Une relation empirique a ensuite été développée pour le contexte régional, permettant le calcul de flux sédimentaire pour l'ensemble des affluents intra-estuariens de Seine et les rivières littorales du Pays de Caux.

Une cartographie du flux sédimentaire spécifique moyen ou taux d'érosion moyen (SSY) de chaque rivière du bassin Seine-Aval Manche a alors été proposée. Cette cartographie nous apprend que SSY varie en moyenne entre 2.7 to 55.9 $t.km^{-2}.y^{-1}$, avec des valeurs plus élevées pour les rivières littorales du Pays de Caux que pour les affluents de la Seine… Le flux sédimentaire moyen annuel de la Seine au barrage de Poses (limite physique entre le fleuve et l'estuaire) est évalué à 494 000 $t.an^{-1}$, avec un écart type de 288 000 $t.an^{-1}$. Les apports sédimentaires moyens annuels des affluents intra-estuariens de Seine sont évalués à 55 500 $t.an^{-1}$, avec un écart type de 46 600 $t.an^{-1}$. Ils représentent ainsi 10% de l'ensemble des apports sédimentaires à l'estuaire de Seine.

BIBLIOGRAPHIE

Avoine J., 1985. Evaluation des apports fluviatiles dans l'estuaire de la Seine. In: La Baie de Seine - Fonctionnement, conséquences en matière d'environnement et d'utilisation de la mer, Vol. 2 (Ed. by GRECO Manche), pp. 61-68. CNRS, Université de Caen.

Cerdan, O., Souchere, V., Lecomte, V., Couturier, A. and Le Bissonnais, Y., 2001. Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model: Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management. Catena, 46(2-3): 189-205.

Coleman, D.J., Scatena, F.N., 1986. Identification and evaluation of sediment sources. In: Hadley, R.F. (Ed.), Drainage Basin Sediment Delivery. IAHS Publication, vol. 159, pp. 3–18

Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., Böhner, J., 2015. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. Geosci. Model Dev. 8, 1991–2007. doi:10.5194/gmd-8-1991-2015

Delmas M., Cerdan O., Cheviron B., Mouchel J.M., Eyrolle F., 2012. Sediment exports of French rivers to the sea, Earth Surface Processes & Landforms 37 (7), 754-762.

Fleming, G., al Kadhimi, A., (1982). Sediment modelling and data sources: a compromise in assessment. Walling D.E

Harrison, C.G.A., 2000. What factors control mechanical erosion rates? Int. Journ. Earth Sciences 88, 752–763.

Horowitz A.J., Elrick K., Smith J., 2001. Estimating suspended and trace element fluxes in large river basins: methodological considerations as applied to the NASQAN programme. Hydrological Processes 15, 1107-1132.

Laignel B., Dupuis E., Durand A., Dupont J.P., Hauchard E., Massei N., 2006 - Erosion balance in the loamy watersheds of the Western Paris Basin from the continuous measurement in the surface water. C. R. Geoscience, 338, 556-564

Laignel B., Lequien A., Costa S., Massei N., Durand A., Dupont J.P., Le Bot S., 2008 - Continental sedimentary contributions to the beaches and the sea of the English Channel. Example of cliffs and littoral rivers of the Western Paris Basin. Z.F. Geomorphologie, 52, 3, 21–40.

Lal R., 2003. Soil erosion and the global carbon budget. Environment International 29, 437-450.

Landemaine, 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, Univ. Rouen.

Landemaine, V., Cerdan, O., Laignel, B., Fournier, M., Copard, Y. Scale effect and hydro-sedimentary response of rivers in Upper Normandy (submitted)

Landemaine, V., Cerdan, O., Laignel, B., Fournier, M., Copard, Y. Temporal and spatial extrapolation of sediment yields for gauged and ungauged rivers in the Western Paris Basin (submitted)

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. 237p.

Lawrence, P., Lo Cascio, A., Goldsmith, P., Abbott, C.L., (2004). Sedimentation in small dams. Development of a catchment characterization and sediment yield prediction procedure. Report OD TN 120, HRWallingford.

Lazure, P., Dumas, F., 2008. An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). Adv. Water Resour. 31, 233–250. doi:10.1016/j.advwatres.2007.06.010

Le Hir, P., Cayocca, F., Waeles, B., 2011. Dynamics of sand and mud mixtures: A multiprocess-based modelling strategy. Cont. Shelf Res. 31, 135–149. doi:10.1016/j.csr.2010.12.009

Ludwig, W., Probst, J.L., 1998. River sediment discharge to the oceans: present-day controls and global budgets. Am. J. Sci 298, 265–295

Mackenzie F.T., Lerman A., Andersson A.J., 2004. Past and present of sediment and carbon biogeochemical cycling models. Biogeoscience 1, 11-32.

Meybeck, M., Laroche, L., Dürr, H.H., Syvitski, J.P.M., 2003. Global variability of daily total suspended solids and their fluxes in rivers. Glob. Planet. Change 39, 65–93

Milliman, J.D., Syvitski, J.P.M., 1992. Geomorphic/Tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous river. J. Geol. 100, 525–544.

Mouhri A., 2010. Approches multi-échelles du fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère karstique de la craie, application au bassin des sources de Fontaine sous Préaux. Thèse de Doctorat, Université Rouen.

Prosser I.P., Rutherford I.D., Olley J.M., Young W.J., Wallbrink P.J., Moran C.J., 2001a. Large-scale patterns of erosion and sediment transport in river networks, with examples from Australia. Marine and Freshwater Research 52, 81-99.

Rabouille C., Mackenzie F.T., Ver L.M., 2001. Influence of the human perturbation on carbon, nitrogen and oxygen biogeochemical cycles in the global coastal ocean. Geochim.Cosmochim. Acta 65, 3615–3641.

Raux J., Copard Y. Laignel B., Fournier M., Massei N., 2011. Classification of worldwide drainage basins through the multivariate analysis of variables controlling their hydrosedimentary response. Global & Planetary Change, 76, 3-4, 117-127.

Singh, O., Sarangi, a., & Sharma, M. C., 2008. Hypsometric Integral Estimation Methods and its relevance on erosion status of North-Western Lesser Himalayan watersheds. Water Resources Management, 22(11).

Steegen A., Govers G., Takken I., Nachtergaele J., Poesen J., Merckx R., 2001. Factors controlling sediment and phospohorous export from two Belgian agricultural catchments. Journal of Environmental Quality 30, 1249-1258.

Stocking, M.A., Chakela, Q., Elwell, H.A., 1988. An improved methodology for erosion hazard mapping: Part I. The technique. Geografiska Annaler 70 (3).

Young W.J., Olley J.M., Prosser I.P., Warner R.F., 2001. Relative changes in sediment supply and sediment transport capacity in a bedrock-controlled river. Water Resources Research 37, 3307-3320.

ANNEXE 1 : LISTE DES METHODES D'INTERPOLATION ET D'EXTRAPOLATION APPLIQUEES DANS CETTE ETUDE

	Méthode	Equation	Description	Auteur(s)
Averaging estimator	**AE1**	$Flux = K\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{C_i}{n}\right)\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{Q_i}{n}\right)$	Produit des moyennes arithmétiques des concentrations instantanées (Ci) et des débits instantanés (Qi) sur la période d'enregistrement	Verhoff et al., 1980
	AE2	$Flux = K\sum_{i=1}^{n}\frac{C_iQ_i}{n}$	Moyenne arithmétique des flux instantanés calculés pour chaque échantillon	Walling and Webb, 1981
	AE3	$Flux = K\,\overline{Q_r}\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{C_i}{n}\right)$	Produit du débit moyen annuel ($\overline{Q_r}$) de la période d'enregistrement et de la moyenne des concentrations instantanées (Ci)	Ongley, 1973
	AE4	$Flux = K\,\overline{Q_r}\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}C_iQ_i}{\sum_{i=1}^{n}Q_i}\right)$	Produit des concentrations moyennes instantanées (Ci) pondérées par le débit instantané (Qi), et le débit moyen annuel ($\overline{Q_r}$) sur la période d'enregistrement	Verhoff et al., 1980
	AE5	$Flux = K\sum_{i=1}^{n}C_i\,\overline{Q_p}$	Somme des produits de la concentration instantanée (Ci) représentative d'un intervalle [i-1/2 ; i+1/2] et du débit moyen ($\overline{Q_p}$) calculé sur cet intervalle	Walling and Webb, 1981
Linear Interpolationn	**IL**	$Flux = K\sum_{j=1}^{365}C_j^{int}.Q_j$	Somme des produits des concentrations calculées par interpolation linéaire (C_j^{int}) et des débits mesurés en continu (Q_j)	Moatar and Meybeck, 2005
Ratio estimator	**RE**	$Flux = K\,\bar{Q}\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}C_iQ_i}{\sum_{i=1}^{n}Q_i}\right)CF_8$ $S_{lq} = \left(\frac{1}{n-1}\right)\left[\sum_{i=1}^{ns}(Q_i^2C_i) - n.\bar{q}.\bar{l}\right]$ $CF_8 = \left(\frac{1+\frac{1}{n}\frac{S_{lq}}{\bar{l}\bar{q}}}{1+\frac{1}{n}\frac{S_q^2}{\bar{q}^2}}\right)$ $S_q^2 = \left(\frac{1}{n-1}\right)\left[\sum_{i=1}^{ns}(Q_i^2) - n.\bar{q}^2\right]$	Méthode A4 avec correction « Beale Ratio Estimator » : correction par un facteur explicatif prenant en compte la covariance entre le flux instantané et le débit aux instants échantillonnés, divisé par la variance des débits	Littlewood, 1995

	Méthode	Equation	Description	Auteur(s)
Rating curve	**SRC**	$\boldsymbol{C_e = a.Q^b}$ et $\log C_e = \log a + b.\log Q$ $Flux = K \sum_{i=1}^{365-n} C_{e_i}.Q_i + K \sum_{i=1}^{n} C_i.Q_i$	Régression logarithmique « concentrations – débits »	Walling and Webb, 1981
	SRC F	$\boldsymbol{C_{ec} = C_e.CF_1}$ $avec$ $CF_1 = e^{2,651.\sigma^2}$ $Flux = K \sum_{i=1}^{365-n} C_{ec_i}.Q_i + K \sum_{i=1}^{n} C_i.Q_i$	Régression logarithmique « concentrations – débits » avec la correction de Fergusson CF1	Ferguson, 1986
	SRC SE	Version tronquée de SRC suivant les saisons		
	SRC RF	Version tronquée de SRC suivant les la montée et la descente de crue		
	SRC50	Version tronquée de SRC suivant les le débit médian		

Liste des sigles des différentes méthodes décrites ci-dessus

Sigle	Description
K	Facteur de conversion pour tenir compte de la période d'estimation et de l'unité des mesures pour exprimer le flux en unité appropriée, variable d'une méthode à l'autre
C_i	Concentration mesurée au moment du prélèvement « i » (mg/l)
Q_i	Débit mesuré au moment du prélèvement « i » (m^3/s)
n	Nombre de prélèvements
i	Indice allant de i = 1 à n
$\overline{Q_r}$	Débit moyen annuel (m^3/s)
$\overline{Q_p}$	Moyenne des débits entre les moments de prélèvement « i+1/2» et « i-1/2 » (m^3/s)
$\overline{C_m}$	Concentration moyenne mensuelle (calculé à partir de quelques échantillons par mois sur plusieurs années) (mg/l)
$\overline{Q_m}$	Débit moyen mensuel (m^3/s)
m	Indice allant de m = 1 à 12
C_j^{int}	Concentration interpolée de façon linéaire entre deux prélèvements (mg/l)
Q_j	Débit mesuré en continu (m^3/s)

Sigle	Description
j	Indice allant de 1 à 365
$\bar{l}$	Concentration moyenne de tous les prélèvements sur la période d'étude (mg/l)
$\bar{q}$	Débit moyen associé à l'ensemble des prélèvements sur la période d'étude (m^3/s)
$\bar{Q}$	Module annuel (m^3/s)
C_e	Concentration estimée par R1 : $C_e = a.Q^b$ (mg/l) a et b : Constantes de régression à déterminer
C_{e_i}	Concentration estimée par R1 pour le prélèvement i (mg/l)
Q_i	Débit mesuré le jour du prélèvement (m^3/s)
C_i	Concentration mesurée au moment du prélèvement i (mg/l)
n	Nombre de prélèvements
i	Indice allant de i = 1 à n
σ	Ecart type sur le jeu de données des concentrations mesurées

ANNEXE 2 : CARACTERISTIQUES DES PARAMETRES PHYSIOGRAPHIQUES UTILISES POUR CETTE ETUDE

Variables	Formule/Description	Référence
Aire (A)	Aire du bassin versant	
Périmètre (P)	Périmètre du bassin versant	
Longueur du bassin versant (L)	Longueur maximale du bassin versant	
Largeur du bassin versant (l)	Largeur maximale du bassin versant	
Longueur du drain principal (L_D)	Longueur du drain principal	Horton, 1945
Longueur du réseau (L_R)	Somme des longueurs des drains	Horton, 1945
Dénivellation maximale du bassin versant (ΔH_{BV})	$\Delta Hbv = Hmax - Hmin$	d'après Laignel, 2003
Dénivellation maximale du drain principal (ΔH_D)	$\Delta Hd = Hmax - Hmin$	d'après Laignel, 2003
Pente moyenne du bassin versant (P_{BV})	$Pbv = \frac{\Delta Hbv}{L}$	d'après Laignel, 2003
Pente moyenne du drain principal (P_D)	$Pd = \frac{\Delta Hd}{Ld}$	d'après Laignel, 2003
Coefficient de Gravelius (K_G)	$Kg = \frac{P}{2 * \sqrt{\pi * A}}$	Gravelius, 1914
Altitude moyenne (H_{MOY})	$Hmoy = \sum (Ai * Hi)/A$	Horton, 1945
Intégrale hypsométrique (IH)	Degré de maturité du bassin versant	Strahler, 1952
Densité de drainage (D_D)	$Dd = Lr/A$	Horton, 1945
Fréquence de drainage (F_D)	$Fd = Nd/A$ Avec Nd = Nombre de drains	d'après Laignel, 2003
Ordre de Strahler (O_{STR})	Méthode de classification des cours d'eau	Strahler, 1952
Nombre de cours d'eau d'ordre 1 (N_{O1})	Nombre de cours d'eau d'ordre 1 suivant l'ordre de Strahler	
Fréquence des cours d'eau d'ordre 1 (F_{O1})	$FdO1 = NdO\ 1/A$	d'après Bentekhici, 2006
Coefficient de torrentialité (C_T)	$Ct = Dd * FdO1$	d'après Gomez-Villar, 2010
Élongation (E)	$E = [2(A/\pi)]/Ld$	d'après Raux, 2011
Dimension fractale (D_M)	$Dm = \frac{2 * log(P)}{log(A)}$	d'après Paszto, 2011
Indice topographique IBK	$IBK = ln(As/tan(\beta))$ Avec As = aire contributive et β = gradient de pente en degrés	Beven and Kirkby, 1979
Précipitations (P_{TOT})	Précipitations annuelles cumulées	
Taux d'étagement (T_E)	Rapport des hauteurs de chute cumulées et de la dénivellation du bassin versant	Ici
Indice de persistance des réseaux (IDPR)	Rapport entre la distance théorique au réseau hydrographique et la distance réelle pour tout point de l'espace étudié	BRGM, 2007

Densité de bétoires (D_B)	Rapport entre le nombre de bétoires et l'aire du bassin	Ici
Indice de puissance du courant (IPC)	$IPC = ln(As * tan(\beta))$Avec As = aire contributive et β = gradient de pente en degrés	d'après Chen, 2011
Occupation du sol	Pourcentage de zones ruisselantes (zones urbanisées + terres arables), zones non ruisselantes (prairies + forêts) et de la surface en eau	

GIP Seine-Aval
GROUPEMENT D'INTÉRÊT PUBLIC

POUR PLUS D'INFORMATIONS SUR LE GIP SEINE-AVAL

www.seine-aval.fr

CONTACT
Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval
Pôle Régional des Savoirs
115, Boulevard de l'Europe
76100 ROUEN
Tél : 02 35 08 37 64
gipsa@seine-aval.fr

En cas d'utilisation de données ou d'éléments de ce rapport, il devra être cité sous la forme suivante :
Laignel B. (coord.), Landemaine V., Cerdan O., 2017. Projet Affluseine : Flux sédimentaires des affluents intra-estuariens de la Seine : quantification et relation avec les caractéristiques physiographiques des bassins versants. Projet Seine-Aval 5, 44 p.

Le GIP Seine-Aval ne saurait être tenu responsable d'évènements pouvant résulter de l'utilisation et de l'interprétation des informations mises à disposition.
Pour tout renseignement, veuillez contacter le GIP Seine-Aval.