
Rapport de stage individuel
4^{ème} année
Relations entre la présence de
dunes et la concentration des
Matières en Suspension

Tuteur académique :
Stéphane Rodrigues

Lorenzo Boisson
IMA

Remerciement :
Antoine Duperray
Jules Le Guern

2019-2020

Glossaire des abréviations

MES : Matières en suspension

[C] : Concentration

AELB : Agence de l'Eau Loire-Bretagne

Q_b : Débit *bedload* (ou débit en charge de fond)

Q_s : Débit en suspension

Q : débit liquide

U : vitesse longitudinale de l'écoulement

C : célérité ou vitesse de progradation des dunes

S : Pente de la face de dépôt des dunes

H : Hauteur des dunes

λ : longueur d'onde des dunes

P : Profondeur d'eau

Li : Largeur d'influence

V : Verticale de mesure

Contexte

Ce travail s'inscrit dans la continuité du projet de fin d'étude (PFE) réalisé en avril dont le sujet était une étude bibliographique concernant l'évolution des Matières en Suspension (MES) au-dessus des formes de lit sableuses que sont les dunes. Ce document permet, à l'aide d'une importante base de données concernant les concentrations des matières en suspension et les dunes présentes sur la Loire et plus précisément sur le site de Saint Mathurin, d'appuyer ou de réfuter de façon concrète les différentes hypothèses abordées dans le PFE et se place ainsi à l'inverse du travail bibliographique rendu précédemment dans une catégorie s'approchant davantage de la recherche. Ce document s'inscrit également dans la complémentarité de la thèse de Jules Le Guern, étudiant la dynamique des transports sédimentaires sur la Loire, où notamment la question de l'interaction des dunes avec le transport sédimentaire en suspension est évoquée. Le travail de recherche mené par Jules Le Guern a comme aboutissement l'amélioration de notre compréhension concernant la dynamique sédimentaire de la Loire, ce qui est cruciale pour à la fois, le bon calibrage des opérations de restaurations et de meilleurs dimensionnements des ouvrages envisagés, sur la zone d'étude. Les travaux de restaurations menés sur la Loire visent principalement à stopper, ou du moins à ralentir l'incision spécifique observée dans ce secteur, conséquence d'une mauvaise gestion sédimentaire depuis plus d'un siècle. De plus il est important de noter que les données utilisées dans ce rapport sont celles échantillonnées par l'équipe de recherche entourant Jules Le Guern dans son projet.

1. Introduction

La charge sédimentaire dans les rivières est définie comme étant l'ensemble des sédiments transportés et se décline en deux composantes ; le transport en suspension et le transport sur le fond. Le transport des sédiments en suspension, communément appelé charge en suspension, représente la plus grande partie des charges sédimentaires dans les rivières. En effet cela représente plus de 90% du flux annuel de sédiments [Syvitski et al., 2005]. On y distingue les charges de lessivages (*Washload*) qui sont des sédiments fins, en général inférieurs à 63 μm selon la classification des tailles de grains de Wentworth (1922), invariants quel que soit la distance par rapport au lit. C'est-à-dire uniformément réparties le long de la colonne d'eau. Et les suspensions près de fond ou en saltation (*suspended bed material load*), qui sont caractéristiques d'un gradient de concentration vertical, c'est-à-dire dont la quantité décroît depuis le bas vers le haut, et qui se confondent avec la charge de fond. Les matières en suspension, d'acronyme MES sont des particules fines qui se retrouvent dans la première catégorie de sédiments transportés en suspension.

Dans le cadre de cette étude, nous allons nous intéresser uniquement aux matières en suspension au-dessus des formes de fond de lit que sont les dunes et plus particulièrement aux interactions qui peuvent exister entre ces deux paramètres.

Les dunes sont souvent présentes dans les lits sableux, ce sont les formes de fond de lit les plus représentées dans les rivières, et affectent toute la dynamique fluviale et sédimentaire au-dessus [Holmes, Jr. et Garcia, 2002 ; Cardinale et al., 2014]. Les dunes subaquatiques par leur morphologie caractéristique impactent fortement la circulation hydraulique sus-jacente et par conséquent influencent le profil invariant des MES dans la colonne d'eau. En effet, les dunes agissent comme des obstacles à l'écoulement ; leur présence modifie l'écoulement en entraînant la génération de turbulences, éjectant les sédiments du lit dans la colonne d'eau sus-jacente et impactant ainsi le profil vertical de concentration des MES au-dessus du lit. Ainsi contrairement aux rivières de lits plans (sans formes de lit), au-dessus desquelles le profil vertical de concentrations des MES est connu car seulement influencé par la rugosité des grains qui la composent, les dunes subaquatiques par leur

morphologie complexe impactent le profil de concentration des MES de manière encore trop méconnue.

Afin d'étudier les interactions entre les dunes et les MES il est important de connaître les différents paramètres influant sur l'évolution de concentration des MES. Selon la recherche [Babi, 2005], la dynamique des flux sédimentaires dans les chenaux va être influencée à l'échelle plus large du bassin-versant suivants les différentes : précipitations, érodabilité du sol et des berges, topographie, densité de la couvertures végétales et activités humaines (agricultures, aménagements de navigation, carrières etc) propre à chaque bassin-versant. C'est pourquoi l'étude des matières en suspensions (MES) prend une place majeure dans les enjeux de gestions des bassins-versants. En effet les sédiments étant une composante naturelle des environnements fluviaux, leur présence et leur dynamique sont essentielles à la préservation du bon fonctionnement de ces systèmes. L'impact des pratiques humaines, sur les systèmes fluviaux, ou encore la qualité de l'environnement peuvent ainsi être évalués à l'aide de relevés de concentrations des sédiments en suspension [Martin, 2013]. A titre d'exemple, les phénomènes d'incisions et de colmatages sont des conséquences bien connues de l'impact des activités humaines sur les milieux fluviaux et sont indicateurs d'une mauvaise gestion et qualité des eaux. Mais également, et c'est l'échelle qui va nous intéresser, les MES vont être influencées à l'échelle plus petite des chenaux suivant les ; débits, vitesse d'écoulement et morphologie des dunes, présent localement. Les influences et relations entre la dynamique des matières en suspension et les paramètres précédemment cités à l'échelle des chenaux est encore un sujet trop méconnu surtout en ce qui concerne les dunes.

Ce document va ainsi s'intéresser, à l'aide d'une base de données acquise sur le terrain dans un contexte ligérien, à répondre à la question scientifique suivante :

Existe –t- il une relation entre la présence de dunes et la concentration en MES en Loire ?

Pour cela plusieurs sous-questions scientifiques ont été dégagées :

Les valeurs de MES mesurées sur le terrain sont-elles comparables à celles mesurées par l'Agence de l'Eau Loire Bretagne ?

Quelle est la quantité de MES sur la section de jaugeage à St Maturin sur Loire ?

Quelle est la proportion $Q_{\text{charge de fond}}$ et $Q_{\text{suspension}}$ sur la section ?

Existe-t-il une relation entre le débit unitaire charge de fond et le débit unitaire suspension ?

Existe-t-il un lien entre hydrologie et concentration des MES ?

Existe-t-il un lien entre les différents paramètres morphologiques des dunes et les MES ?

Existe-t-il un lien entre la dynamique dunes et concentrations des MES ?

Existe – il un lien entre la granulométrie des sédiments qui composent les dunes et les MES ?

Afin de répondre à ces questions nous allons premièrement effectuer un travail d'analyse et de traitement des données en Matériels et Méthodes, deuxièmement nous allons présenter les principaux résultats concernant les MES et l'hydrologie à l'échelle de la section, puis concernant les MES et les dunes à l'échelle des profondeurs, pour finalement discuter et comparer ces résultats avec les différentes études déjà sorties sur le sujet, en partie Discussion.

2. Matériels et Méthodes

2.1. Description du site d'étude

Le site d'étude se trouve dans le secteur de Saint Mathurin sur Loire, une petite commune, situé en région Pays de la Loire et compris dans le département Maine-et-Loire, qui est implantée sur la rive droite de la Loire (Figure 1).

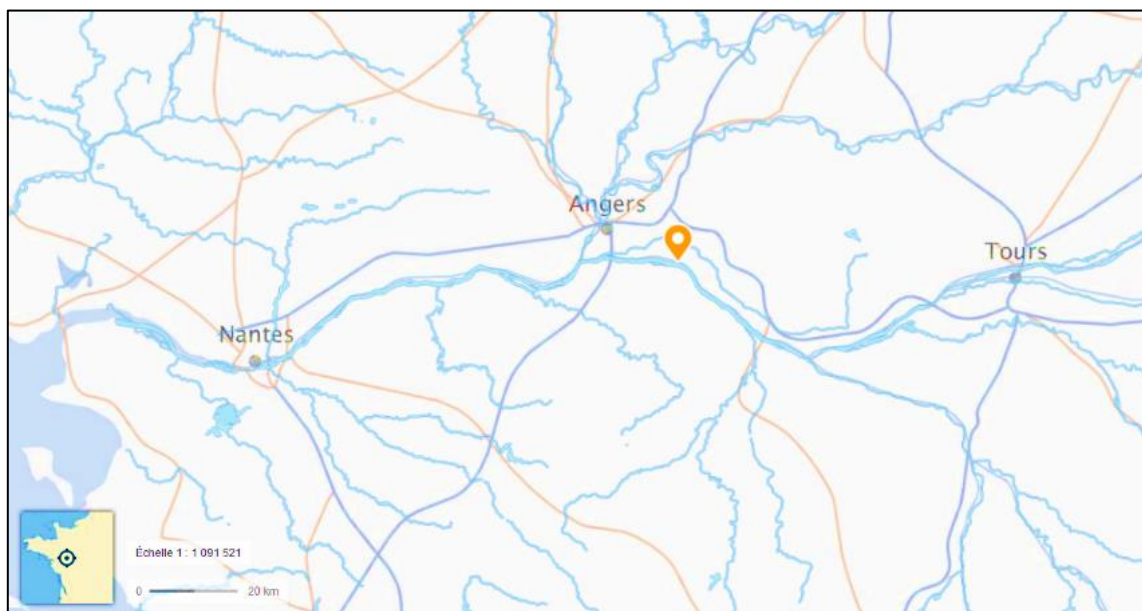


Figure 1 : Localisation du site d'étude (source : Géoportail)

Une station de mesure de l'agence de l'eau Loire Bretagne (AELB) est également présente sur le secteur d'étude (Figure 2) ce qui va permettre de comparer les données d'étude avec celles obtenues par l'AELB concernant la concentration des matières en suspension.



Figure 2 : Localisation de la station de jaugeage à St Mathurin-sur-Loire (source : Géoportail)

2.2. Présentation et Analyse des données

2.2.1. Présentation des données

Deux bases de données sont donc disponibles sur ce secteur en ce qui concerne les Matières En Suspension, la première obtenue par mesures sur le terrain et la deuxième étant les données relatives à la station de mesures de l'Agence de l'eau Loire Bretagne se trouvant sur place (source : site eau France <http://www.naiades.eaufrance.fr/>). En ce qui concerne les données obtenues par échantillonnage sur le terrain, elles comprennent les concentrations des matières en suspension mais également les flux unitaires des sédiments en suspension et en charge de fond, la granulométrie médiane des sédiments constituant le fond de lit, les vitesses longitudinales de l'écoulement, le débit et des données morphologiques concernant les dunes (longueur d'onde, hauteur, vitesse de progradation et pente de la face de dépôt).

Afin de représenter toute la variabilité de la zone d'étude sur la section étudiée l'échantillonnage des données sur le site de St Maturin a (pour chaque journée de mesure) été répétés, pour différentes profondeurs et sur plusieurs verticales le long du transect d'étude (perpendiculaire à l'écoulement) (Figure 3).

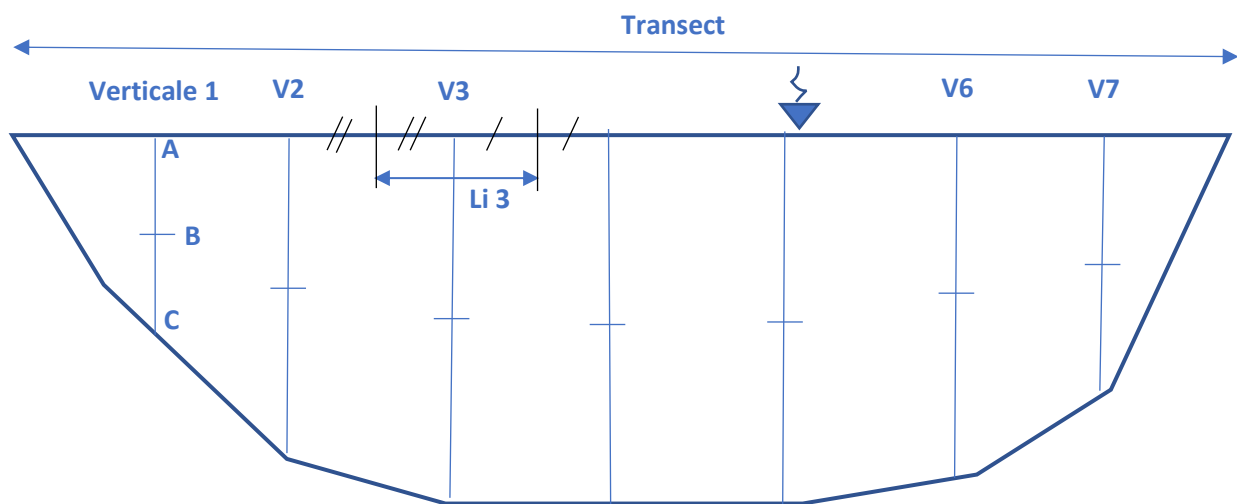






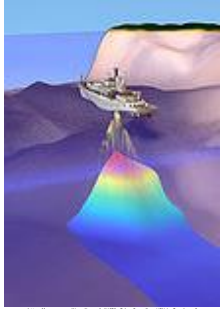
Figure 3 : Schéma de la méthode d'échantillonnage des données sur une section de la Loire (A, B et C représentent les différentes profondeurs échantillonnées et Li la largeur d'influence)

2.2.2. Analyses des données

Les données issues de l'AELB et les données d'étude, échantillonnées sur le site de St Mathurin, ont été relevées à l'aide de différentes méthodes d'échantillonnages. Tout d'abord en ce qui concerne les données d'étude plusieurs méthodes et matériels d'échantillonnage ont été utilisés en fonctions des différentes données récoltées sur le terrain. Les concentrations de MES ont été échantillonnées à l'aide de la bouteille de prélèvement Niskin qui est une méthode d'échantillonnage par piégeage, les vitesses instantanées du courant et le débit ont été échantillonnés par micro-moulinet ou courantomètre, le transport sédimentaire par charriage et la granulométrie des sédiments de fond ont été mesurés par BTMA (*Bed Load Transport Meter Arnhem*), tandis que les données relatives aux dunes ont été relevées par bathymétrie monofaisceau.

En ce qui concerne les données de concentration des MES mesurées par l'AELB, elles ont été échantillonnées de façon unitaire par jour à l'aide d'un turbidimètre (Tableau 1).

Tableau 1 : Les différents échantillonneurs utilisés *in situ*

Matériels et méthodes d'échantillonnage				
Bouteille NISKIN	Courantomètre	BTMA	Turbidimètre	Sondeur bathymétrique
				

2.3. Traitement des données

2.3.1. Mise en forme des données d'étude

Dans un souci de comparaison entre les données d'étude et celles issues de l'AELB, et afin d'obtenir tous les paramètres nécessaires à la réponse des questions scientifiques posées en introduction (Tableau 2) les données brutes échantillonnées sur le terrain ont été traitées.

Tout d'abord afin d'obtenir une concentration de MES par jour de mesures les MES ont été moyennées par profondeur puis par verticale. Ensuite dans le but d'obtenir les débits de charge de fond Q_b et les débits en suspension Q_s , le calcul suivant a été appliqué sur le flux unitaire (g/m/s).

Le flux unitaire, pour chaque verticale, est calculé directement en amont à l'aide des concentrations de sédiments échantillonnés que ce soit en suspension ou en charge de fond (Flux unitaire (g/m/s) = Concentration (g/m³) * Air d'influence (m²/s)).

$$Q_b (T/j) = \frac{(\text{Flux unitaire de fond} \times Li)}{1000000} \times 8640 \quad (1)$$

$$Q_s (T/j) = \frac{(\text{Flux unitaire en suspension} \times Li)}{1000000} \times 8640 \quad (2)$$

Finalement afin d'avoir un débit par jour représentant bien le débit total de la section échantillonnée, les débits en suspension et en charge de fond ainsi obtenu (équation (1) et (2)) ont été sommés par verticale pour chaque jour de mesures.

Pour finir les débits liquides obtenus par échantillonnage sur le terrain ont, quand il a été nécessaire, été complétés par les débits fournis par la banque hydro sur la station de Saumur (juste en amont du site d'étude).

Tableau 2 : Liste des paramètres de l'étude

Paramètres	Unité
Concentration des Matières en suspension $[C]$ MES	mg/L
Débit liquide Q	m ³ /s
Débit de charge de fond Q_b	T/j
Débit en suspension Q_s	T/j
Taille de grain médiane D_{50}	μm
Vitesse d'écoulement U	m/s
Hauteur des dunes H	m
Longueur des dunes λ	m
Steepness H/λ	
Pente dune S	
Vitesse dunes C	m/j
Profondeur P	m
Rugosité relative H/P	

2.3.2. Utilisation de tests de corrélation

Dans ce document l'existence d'une relation significative entre deux paramètres étudiés sera mathématiquement démontrée avec l'outil Excel Stat à l'aide duquel divers tests statistiques peuvent être automatiquement calculés sur la base de deux échantillons de données. Le test de corrélation que nous allons utiliser dans cette étude est le test de Spearman car c'est le test le plus adapté concernant des données quantitatives, en effet les données utilisées dans cette étude sont des variables ou paramètres mesurables en termes de quantités. De plus un seul prédicteur, généralement la concentration de MES, est utilisé. Lorsque le nombre N d'échantillons dépassera 50 le test de corrélation de Bravais-Pearson sera alors utilisé car plus adapté pour un grand nombre N d'échantillon.

Le degré de signification est posé à 5%, autrement dit le coefficient d'erreur alpha, modélisant l'erreur « rejet d'une hypothèse qui doit être acceptée », est égale à 0,05. C'est à dire que les probabilités que les différences ou similitudes entre les variables étudiées soient expliquées par une coïncidence liée à l'échantillonnage est inférieure au risque d'erreur alpha. La p-value quant à elle nous renseigne sur la validation ou le rejet de l'hypothèse « les deux paramètres étudiés sont liés significativement » en fonction de sa position concernant le coefficient d'erreur alpha. Une valeur de p-valeur inférieure au coefficient alpha renseignera l'existence d'une relation significative entre les deux variables étudiées. Pour finir la matrice de corrélation permet, elle, de renseigner la " force " de la corrélation, ou autrement dit le niveau d'influence d'une variable sur une autre. Plus elle est proche de 1 plus la corrélation est forte linéairement.

3. Résultats

3.1. Matières en suspension et autres flux

Dans cette partie nous allons présenter les principaux résultats, à l'échelle plus globale de la section, en ce qui concerne la comparaison des matières en suspension échantillonnées sur le site d'étude de St Mathurin avec les autres flux hydrauliques et sédimentaires observés.

3.1.1. Comparaisons données d'étude et données AELB

Dans un premier temps afin de valider les données d'étude récoltées sur le terrain nous allons vérifier si les concentrations des MES relevées par l'agence de l'eau Loire Bretagne sont semblables aux nôtres en termes de gamme, autrement dit s'intéresser à retrouver les principales variations de concentration de MES d'un jeu de données à l'autre. Les valeurs de concentrations ne pouvant pas être strictement les mêmes en raison de la trop grande différence entre les méthodes et matériels d'échantillonnage.

Ainsi le graphique suivant (Figure 4), présente l'évolution des concentrations des MES sur la période d'échantillonnages allant de 2016 à 2019.

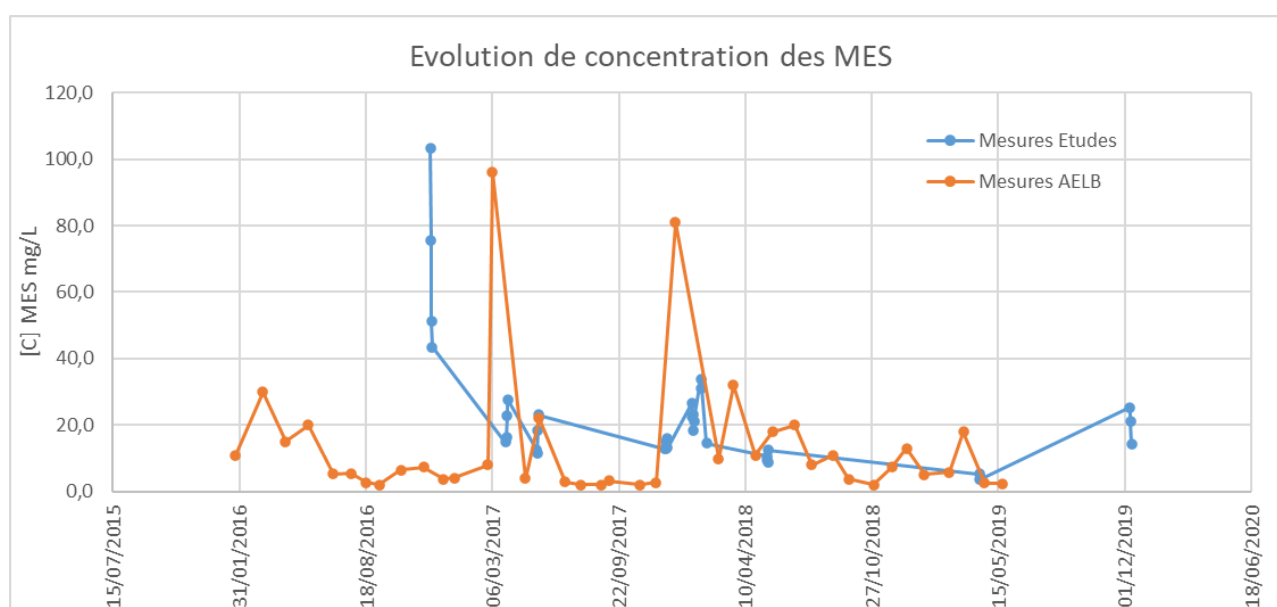


Figure 4 : Graphique de l'évolution des concentrations de MES de 2016 à 2019

On remarque tout d'abord que les principales fluctuations de concentration entre les concentrations de MES issues de l'échantillonnage terrain et les concentrations de MES issues de la station de jaugeage se retrouvent dans le temps sur la figure 4. En effet en termes de gammes on retrouve sur les deux courbes (Mesure Etude et Mesure AELB) deux principaux pics de concentration sur une période de temps identique ; Mars 2017 et Décembre 2017/Janvier 2018. A l'inverse les plus petites fluctuations des concentrations de MES mises en exergue dans les données issues de l'AELB, ne sont pas, voire très peu représentées, par les données d'étude. Cela peut s'expliquer en partie par un échantillonnage des données d'étude plus irrégulier et moins bien réparti dans le temps que celles issues de la station de mesure, ce qui a comme impact une représentation graphique globale de la variation des MES, parfois sur ou sous-estimée d'un jour d'échantillonnage à un autre très éloigné dans le temps (en ce qui concerne les Mesures issues de l'étude).

Toutefois on remarque également un important pic de concentration de MES concernant les données issues de l'étude pour les mesures réalisées dans l'année 2016, pic qui ne se perçoit pas sur la courbe des mesures de concentration issues de la station. De plus l'hydrogramme de crue de l'année 2016 (Figure 5) ne révèle pas d'important pic de crue avant ou pendant l'échantillonnage pouvant expliquer ce soudain pic de concentration.

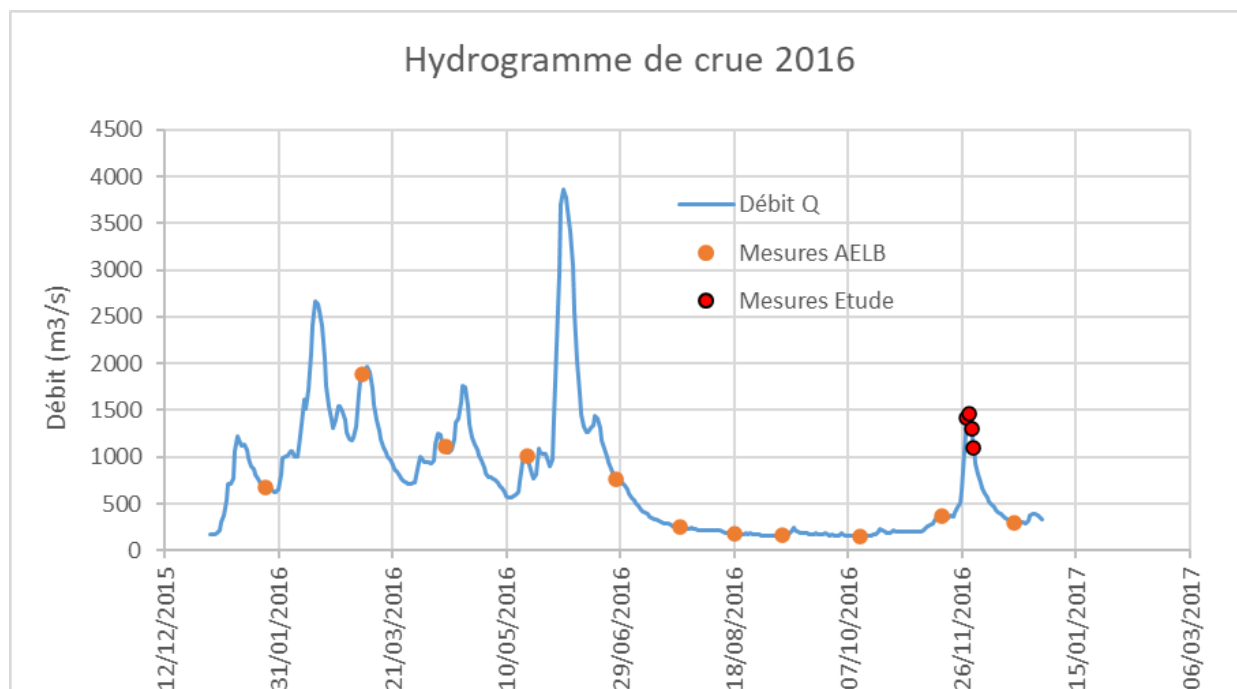


Figure 5 : Graphique de l'hydrogramme des crues de l'années 2016

Les concentrations de MES échantillonnées sur le site d'étude semblent donc être surestimées en ce qui concerne les mesures relatives à l'années 2016. Par la suite ces valeurs seront donc écartées afin de ne pas entraîner d'erreurs ou de résultats faussés dans la suite de ce document.

Des calculs statistiques ont également été réalisés sur les deux jeux de données (Tableau 3), on y retrouve aussi une relation importante indiquant là encore une similitude en termes de gammes et de variations (Figure 6). Les 8 points présents sur le graphique ci-dessous (figure6) représentent ainsi les différentes mesures statistiques effectuées sur les concentrations de MES mesurées sur le terrain et par l'AELB (Tableau 3).

Tableau 3 : Calculs statistique réalisé sur les concentrations de MES de l'étude et de l'AELB

	[C] MES AELB	[C] MES Etude
Moy	13	16
Min	2	4
Max	96	34
Med	7	15
Ecart-type	19	8
Q1	3	12
Q3	14	23
Q4	96	34

Ainsi pour finir nous pouvons raisonnablement conclure que les données mesurées sur le terrain semblent fiables car comparables en termes de gamme aux données mesurées par l'agence de l'eau Loire-Bretagne. Dans la suite de cette étude nous utiliserons donc les données mesurées sur le

terrain en excluant les mesures relatives à l'années 2016 qui semblent surestimer les concentrations de MES.

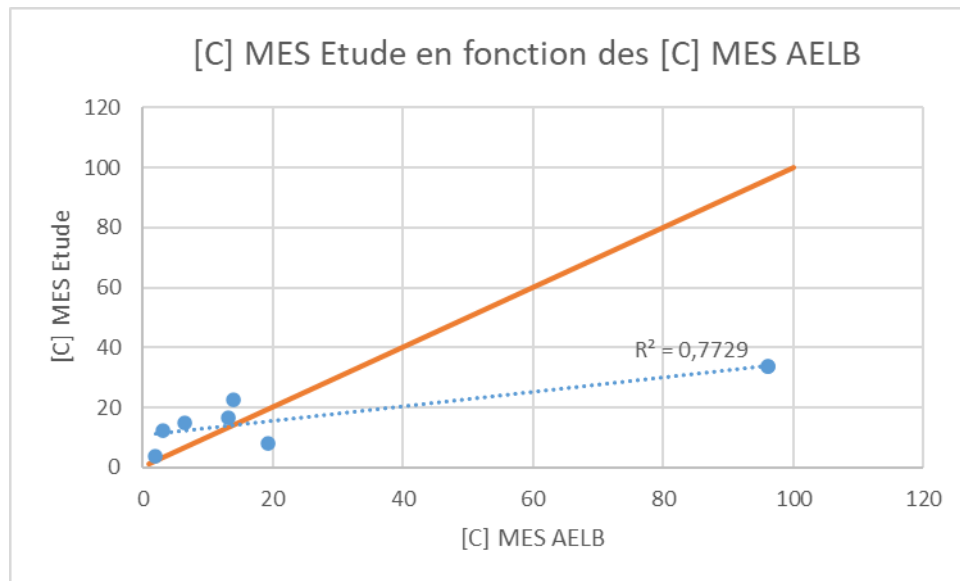


Figure 6 : Graphique des calculs statistiques concernant les concentrations de MES échantillonnées sur le terrain en fonction de celles échantillonnées sur la station de mesure

3.1.2. Analyse du flux liquide et du flux solide

On retrouve en moyenne pour chaque jour de mesure sur la période de prélèvement, un débit de sédiments en suspension égale à $Q_s = 1321 \text{ T/j}$ et un débit de sédiments transportés par charge du fond égale à $Q_b = 1349 \text{ T/j}$. Le débit en charge de fond Q_b est donc légèrement supérieure au débit en suspension en moyenne sur la période d'étude.

3.1.2.1. Débit liquide et débit en suspension

Nous allons ici nous intéresser à l'influence du débit, et plus généralement de l'hydrologie présente sur la section, sur les flux sédimentaires en suspension en place. On remarque que le débit liquide et le flux de sédiment en suspension (MES) suivent une évolution similaire dans le temps, ces deux paramètres semblent donc étroitement liés (Figure 7). Afin de vérifier l'existence possible d'une corrélation entre le débit et le flux de sédiment en suspension un test statistique de Spearman est réalisé (Tableau 4).

Le test de Spearman confirme bien qu'il existe une corrélation positive significative entre le débit liquide et le flux des MES ($P\text{-value} < 0,005$), de plus d'après la matrice de corrélation le niveau de corrélation entre ces deux paramètres est très fort.

Tableau 4 : Test statistique de corrélation entre le débit liquide et le débit en suspension

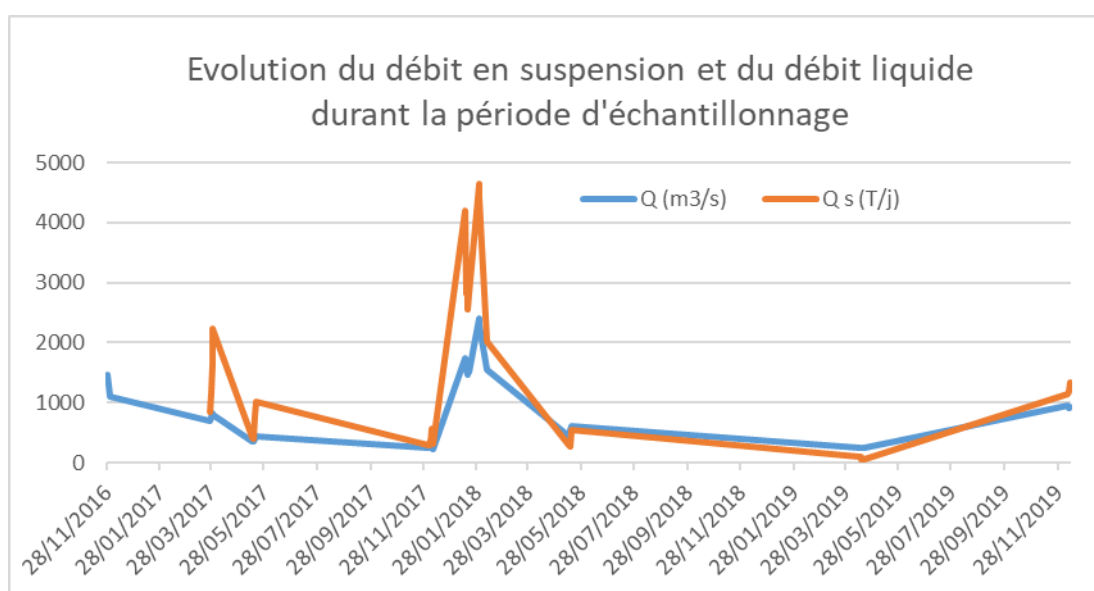
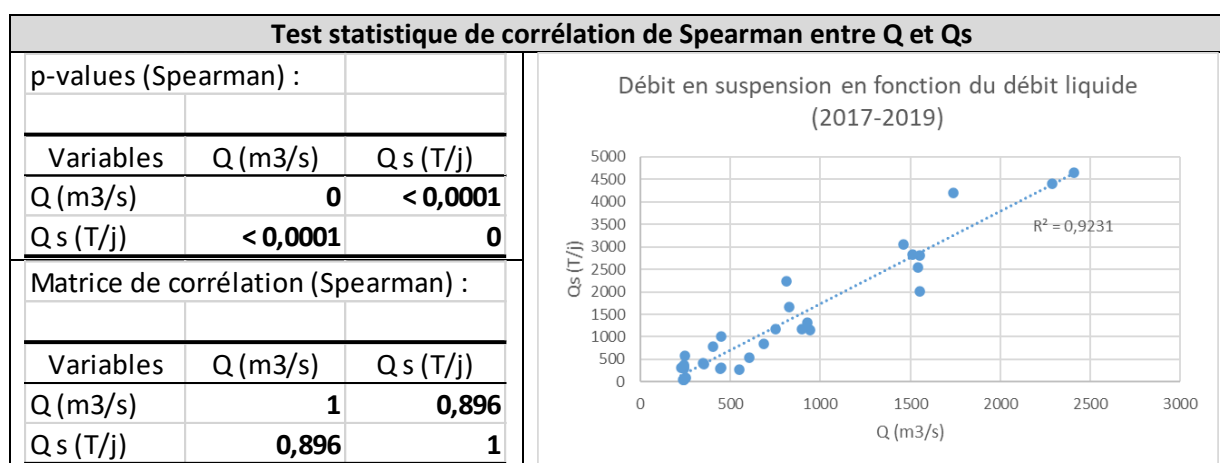


Figure 7 : Graphique représentant l'évolution des flux liquides et en suspension sur la période d'étude

3.1.2.2. Débit liquide et débit en charge de fond

Nous allons maintenant nous intéresser à l'influence du débit - et plus généralement de l'hydrologie présente sur la section - sur les flux sédimentaires transportés par charriage sur le fond du lit. On remarque également que le débit liquide et le flux de sédiments en charge de fond (*bedload*) suivent une évolution similaire dans le temps, ces deux paramètres semblent donc étroitement liés (Figure 8). Afin de vérifier l'existence possible d'une corrélation entre le débit et le flux de sédiment en suspension un test statistique de Spearman est réalisé (Tableau 5).

Le test de Spearman confirme bien qu'il existe une corrélation positive significative entre le débit liquide et le flux des sédiments transporté par charriage sur le fond du lit ($P\text{-value} < 0,005$), de plus d'après la matrice de corrélation le niveau de corrélation entre ces deux paramètres est très fort. Cependant la corrélation est plus faible en ce qui concerne le débit *bedload* comparé au débit en suspension, comme le révèle la matrice de corrélation.

Tableau 5 : Test statistique de corrélation entre le débit liquide et le débit en charge de fond

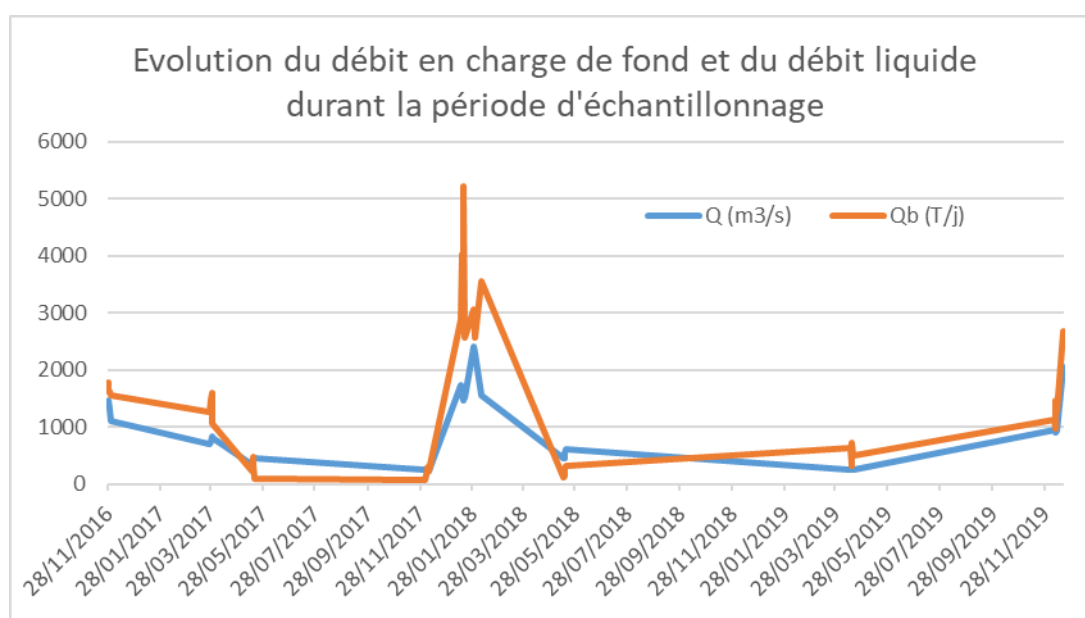
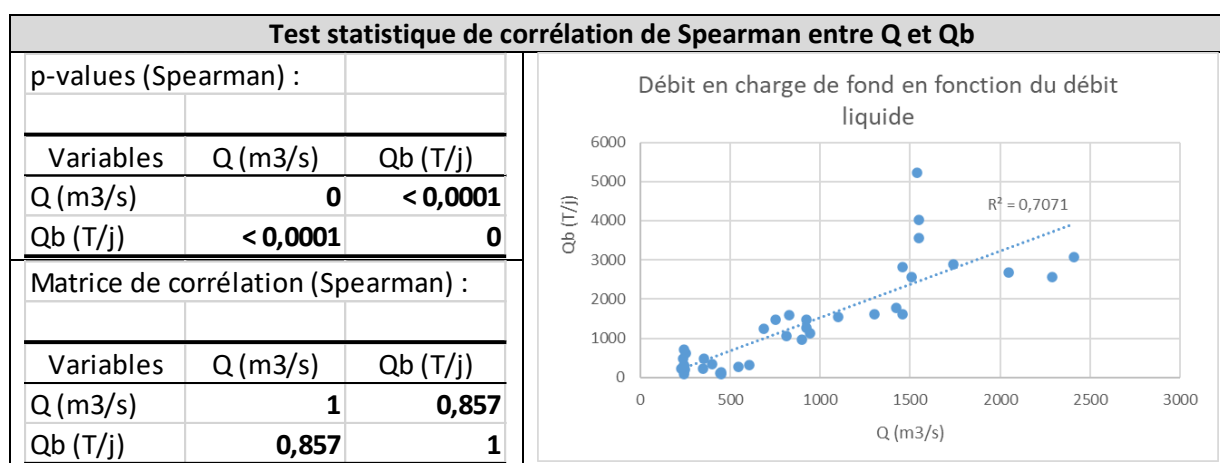


Figure 8 : Graphique représentant l'évolution des flux liquides et en charge de fond sur la période d'étude

Ainsi les flux sédimentaires sur la section d'étude sont donc largement influencés (à l'échelle de la section totale) par l'hydrologie en place. De plus il semble que concernant le débit solide total, ce soit le flux de sédiments en suspension le paramètre le plus fortement corrélé au débit liquide.

3.1.2.3. Débit unitaire en suspension et débit unitaire en charge de fond

Le débit solide unitaire représente ici les valeurs des flux en suspension et en charge de fond par verticale de mesure (pas intégré sur toute la section). Travailler ici en termes de débit unitaire et non débit total sur la section (par jour de mesure) permet un plus grand nombre d'échantillonnages et donc une précision plus importante dans le travail de comparaison entre le débit en suspension et le débit *bedload* abordé dans cette partie. Nous allons ici s'intéresser à savoir s'il existe une relation significative entre le débit *bedload* et le débit en suspension, pour cela un test statistique de corrélation a été réalisé (Tableau 6).

Un test de pearson ($n > 50$) permet de nous renseigner sur le degré de corrélation entre ces deux variables. La valeur du P-value ($< 0,05$) nous indique qu'il existe bien une corrélation significative entre

le flux de sédiments en suspension et celui transporté en charge sur le fond. Cependant la matrice de corrélation révèle que ces deux variables sont faiblement corrélées.

Tableau 6 : Test statistique de corrélation entre le débit liquide et le débit en charge de fond

Test statistique de corrélation de Bravais-Pearson entre Qs et Qb			
p-values (Pearson) :			
Variables	Qs (T/j)	Qb (T/j)	
Qs (T/j)	0	< 0,0001	
Qb (T/j)	< 0,0001	0	
Matrice de corrélation (Pearson) :			
Variables	Qs (T/j)	Qb (T/j)	
Qs (T/j)	1	0,449	
Qb (T/j)	0,449	1	

Débit bedload Qb en fonction du débit en suspension Qs

Le ratio débit en charge de fond sur débit en suspension (en pourcentage) a également été calculé sur chaque verticale puis à l'échelle d'une journée de mesure, sur chaque transect (Annexe 1). Il permet de rendre compte le pourcentage de débit solide présent par rapport au débit liquide (ainsi un ratio Q_b/Q_s égale à 100 révèle un débit solide aussi important que le flux en suspension dans le transport sédimentaire total). Sur un fleuve comme la Loire ; assez peu anthropisé, végétalisé, large et avec une faible pente (pas cours d'eau de montagne) le flux de sédiments en suspension devrait dominer le transport sédimentaire total. Cependant l'analyse du ratio Q_b/Q_s , des données relevées sur le site de Saint Mathurin-sur-Loire, révèle sur de nombreux transects une dominance du flux sédimentaire de fond avec un ratio Q_b/Q_s allant jusqu'à 1200% sur certaines dates de mesure. De plus une moyenne du ratio Q_b/Q_s réalisé à l'échelle des transects révèle un ratio moyen égal à 185, ce qui démontre, en moyenne, une dominance du flux sédimentaire de fond sur le flux en suspension durant l'intervalle d'étude. On remarque que tous les cas où le débit solide est supérieur au flux de sédiments en suspension (ratio > 100) se trouvent en décrue (dans l'hydrogramme), après un important pic de crue.

3.1.2.4. Hydrologie et matières en suspension

Comme vu ci-dessus le débit influence l'évolution du flux de MES (Tableau 4). Toutefois les différentes phases de crues sont également importantes dans l'évolution de la concentration des MES. Les différentes phases de crues (pic de crue, montée de crue, descente de crue et étiage) ont été identifiées par journées de mesures à l'aide de l'hydrogrammes des crues (Figure 9). En effet la position des points de mesure sur le graphique de l'hydrogramme de crue (Figure 9) permet de déterminer la phase hydrologique ou phase de crue au moment de la journée d'échantillonnage.

On remarque (figure 10) une corrélation linéaire importante entre la concentration des MES et le débit. Toutefois les différentes gammes de débit ne sont pas les seuls paramètres qui vont influencer les variations de concentration des MES. En effet on remarque (Figure 10) que pour un débit équivalent des écarts importants de la concentration des MES (cercle rouge) sont observés. Cet écart est dû à la présence de différentes 'strates' superposées de phases de crues. Les différentes phases de crues jouent donc également un rôle dans l'évolution et la dynamique du transport des MES. La position des différentes phases de crues sur le graphique (Figure 10) révèle une hystérésis de type *clockwise* sur la zone d'étude.

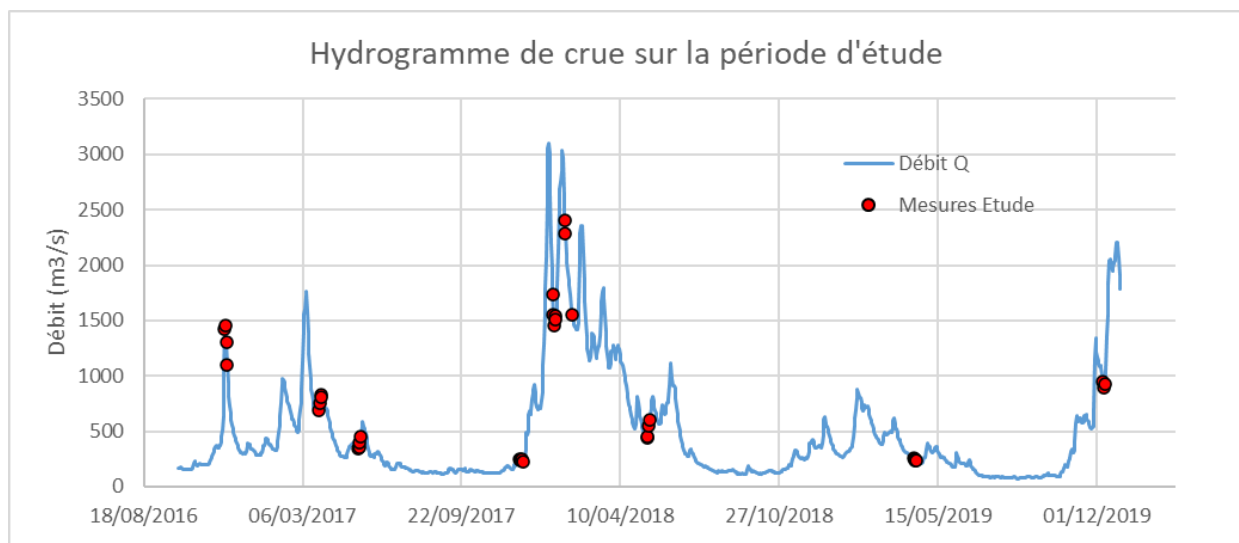


Figure 9 : Graphique représentant l'hydrogramme des crues sur la période d'études (les points rouges représentent les journées d'échantillonnage)

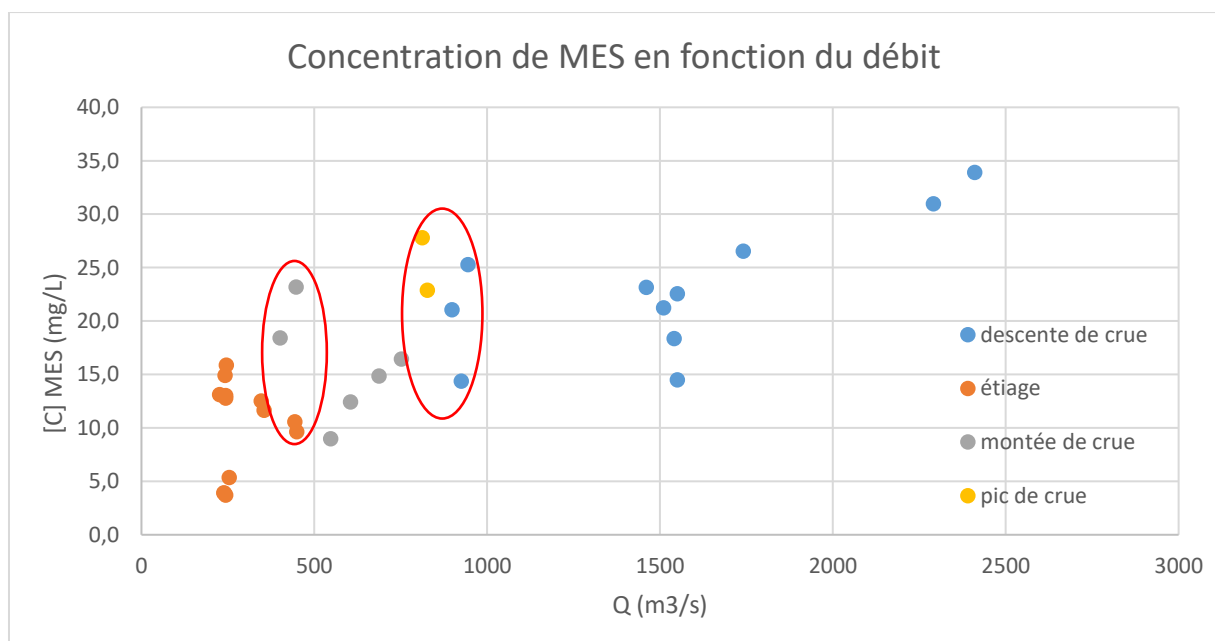


Figure 10 : Graphique de la concentration des MES en fonction du débit et des différentes phases de crues

La vitesse de l'écoulement est également un paramètre important concernant l'hydrologie en place sur la section d'étude, nous allons donc nous intéresser à l'influence de la vitesse d'écoulement U sur la concentration de MES (à l'échelle de la section). On remarque que la concentration des MES et la vitesse d'écoulement suivent une évolution similaire dans le temps, ces deux paramètres semblent donc étroitement liés (Figure 8). Afin de vérifier l'existence possible d'une corrélation entre le débit et le flux de sédiments en suspension un test statistique de Spearman est réalisé (Tableau 5).

Le test de Spearman confirme bien qu'il existe une corrélation positive significative entre le débit liquide et le flux des sédiments transportés par charriage sur le fond du lit ($P\text{-value} < 0,005$), de plus d'après la matrice de corrélation le niveau de corrélation entre ces deux paramètres est assez fort.

Tableau 7 : Test statistique de corrélation entre la concentration des MES et la vitesse longitudinale de l'écoulement

Test statistique de corrélation de Spearman entre [C] MES et U		
p-values (Spearman) :		
Variables	[C] MES mg/L	Vitesse m/s
[C] MES mg/L	0	< 0,0001
Vitesse m/s	< 0,0001	0
Matrice de corrélation (Spearman) :		
Variables	[C] MES mg/L	Vitesse m/s
[C] MES mg/L	1	0,679
Vitesse m/s	0,679	1

Concentration des matières en suspension en fonction de la vitesse d'écoulement

R² = 0,4412

3.1.3. Profil de distribution verticale des matières en suspension

D'après la littérature le profil de concentration verticale de la concentration des MES dans la colonne d'eau au-dessus des dunes est dans la plupart des cas observé avec une importante concentration de MES proche du fond (pic de concentration) qui va ensuite décroître jusqu'à une valeur seuil, du fond vers la surface. Un travail de quantification sur les données concernant les MES unitaire a été alors effectué afin de vérifier si les MES proches du fond sont bien majoritairement plus importantes en termes de concentration que les MES en surface ou à profondeur médiane (en effet la concentration de MES est plus importantes proche du fond d'après la littérature). Ce travail de quantification a été réalisé dans le but de vérifier la justesse de nos données concernant l'échantillonnages des matières en suspension.

Pour chaque verticale de mesure la différence entre les concentrations de MES échantillonnées à hauteur médiane et proche du fond (C-B), puis la différence entre les concentrations de MES échantillonnées à la surface et proche du fond (C-A), a été réalisée. Obtenir une valeur négative sur une de ces deux différences souligne une concentration plus importante de MES sur les profondeurs (A) ou (B) par rapport à (C), et donc un écart par rapport aux situations normalement observées (d'après la littérature). D'après les moyennes effectuées sur ces deux différences la majorité des verticales présentent plus de valeurs positives et donc de situation/verticale où la concentration de MES près du fond est plus importante que la concentration de MES ; en surface ou au milieu de la colonne d'eau (car moyenne positive) (Annexe 2).

Différentes situations (par verticale) ont ensuite été dégagées et quantifiées (Tableau 8). On remarque que la majorité des données récoltées sur le terrain (47%) présente une situation « normale » d'après la littérature, c'est-à-dire une concentration plus importante de MES proche du fond. Toutefois 24% des verticales présente également la situation suivante : la concentration de MES est minimum proche du fond, qui est la situation opposée à ce qui devrait être normalement le cas dans les rivières sableuses (Figure 11).

Tableau 8 : Présentation des différentes situations de distribution de concentration des MES par verticale suivie de leur pourcentage d'apparition respectif dans les données d'étude

			Quantification	%
(++)		: situation "théoriquement normale"	44	47,3
(+)		:majorité MES en surface	10	10,8
(-)		: Majorité MES profondeur médiane	17	18,3
(--)		: MES minimum proche du fond	22	23,7
		Totale	93	

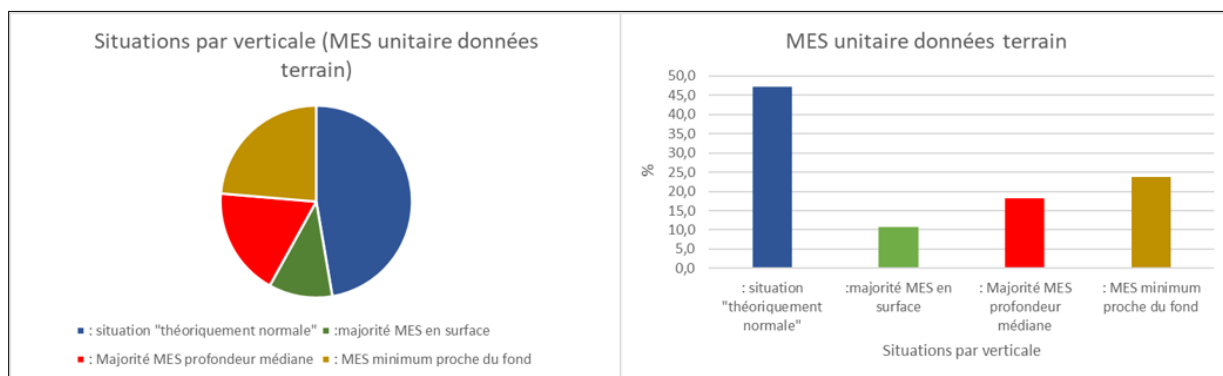


Figure 11 : Graphique représentant la proportion de chaque situation sur l'ensemble des verticales échantillonnées

3.2. Matières en suspension et dunes

3.2.1. Matières en suspension et dunes à l'échelle de la colonne d'eau

3.2.1.1. Influence de l'hydrologie sur les MES

Les flux de transport sédimentaire et plus précisément la concentration des MES sont des paramètres largement influencés par l'hydrologie en place (débit et phases de crue/hystérésis) à l'échelle de la section (par jour de mesures). Cependant on remarque qu'à l'échelle plus restreinte des verticales, autrement dit concernant l'évolution des MES dans la colonne d'eau (du fond du lit à la surface), la corrélation entre la concentration des MES et le débit (Figure 12) ou la vitesse d'écoulement (Figure 13), est moins évidente comme on peut l'observer graphiquement ou à l'aide du coefficient de détermination R^2 .

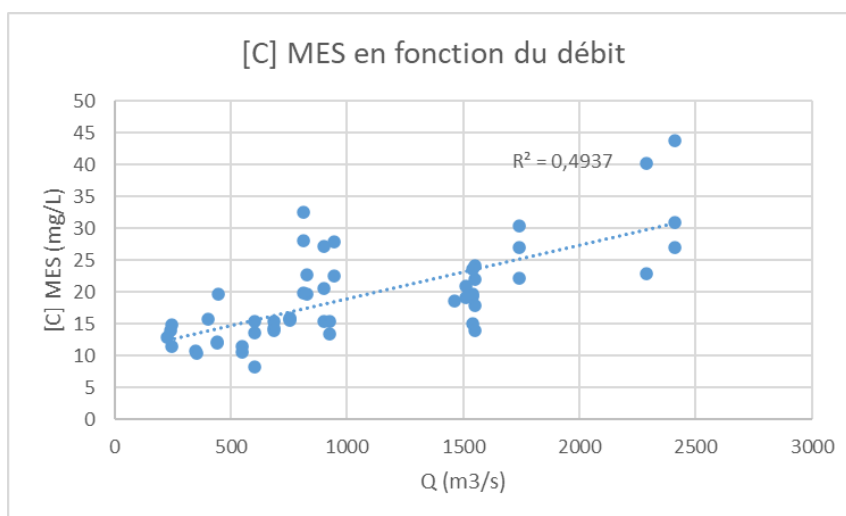


Figure 12 : Graphique de la concentration des MES en fonction du débit à l'échelle de la colonne d'eau au-dessus du lit

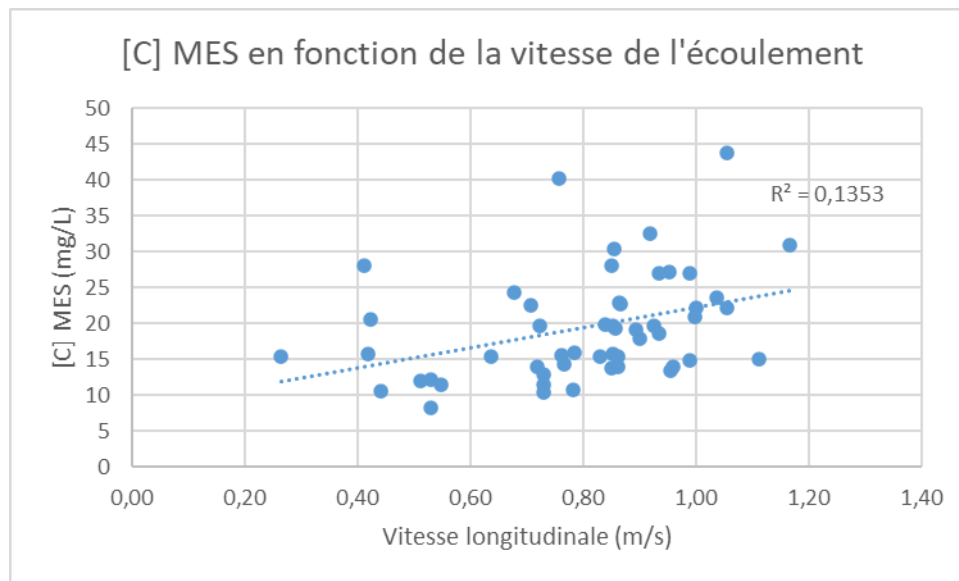


Figure 12 : Graphique de la concentration des MES en fonction de la vitesse d'écoulement à l'échelle de la colonne d'eau au-dessus du lit

Ces résultats laissent à penser que l'hydrologie en place sur la section n'est pas la seule variable influençant la variation de la concentration des MES dans le temps et dans l'espace et que d'autres paramètres, liés cette fois à la forme du lit (dunes), influencent également la dynamique des MES dans la colonne d'eau au-dessus du lit.

3.2.1.2. *Influence de la morphologie des dunes sur les MES*

Dans cette partie nous allons étudier l'influence de la morphologie des dunes présentes sur le fond du lit de la Loire, sur les matières en suspension sus-jacentes, à l'échelle de la colonne d'eau (verticale). En effet en présence de dunes, dans les fonds de lit des rivières sableuses, l'écoulement au-dessus de celles-ci se retrouve modifié ce qui a par conséquent un impact sur la dynamique sédimentaire transportée par suspension (qui comme vu au-dessus varie en fonction de l'écoulement ou débit). Les dunes ont donc un rôle important dans l'évolution de la concentration des MES.

Afin de vérifier l'influence des dunes sur le profil de concentration verticale des MES sus-jacentes plusieurs tests statistiques de Spearman ont été réalisés (Tableau 8/9/10/11).

Tableau 8 : Test statistique de corrélation entre la concentration des MES et la longueur d'onde des dunes

Test statistique de corrélation de Spearman entre λ et [C] MES		
p-values (Spearman) :		
Variables	Longueur d'onde (m)	[C] MES Moy
Longueur d'onde (m)	0	< 0,0001
[C] MES Moy	< 0,0001	0
Matrice de corrélation (Spearman) :		
Variables	Longueur d'onde (m)	[C] MES Moy
Longueur d'onde (m)	1	0,565
[C] MES Moy	0,565	1

[C] MES en fonction de la longueur d'onde

Tableau 9 : Test statistique de corrélation entre la concentration des MES et la hauteur des dunes

Test statistique de corrélation de Spearman entre H et [C] MES		
p-values (Spearman) :		
Variables	Hauteur (m)	[C] MES Moy
Hauteur (m)	0	< 0,0001
[C] MES Moy	< 0,0001	0
Matrice de corrélation (Spearman) :		
Variables	Hauteur (m)	[C] MES Moy
Hauteur (m)	1	0,584
[C] MES Moy	0,584	1

[C] MES en fonction de la hauteur

Tableau 10 : Test statistique de corrélation entre la concentration des MES et la rugosité relative (Hauteur/Profondeur)

Test statistique de corrélation de Spearman entre la rugosité relative et [C] MES		
p-values (Spearman) :		
Variables	Rugosité relative	[C] MES Moy
Rugosité relative	0	0,401
[C] MES Moy	0,401	0
Matrice de corrélation (Spearman) :		
Variables	Rugosité relative	[C] MES Moy
Rugosité relative	1	0,119
[C] MES Moy	0,119	1

[C] MES en fonction de la rugosité relative

Tableau 11 : Test statistique de corrélation entre la concentration des MES et la pente de la face de progradation des dunes

Test statistique de corrélation de Spearman entre S et [C] MES		
p-values (Spearman) :		
Variables	pente lee side	[C] MES Moy
pente lee side	0	0,004
[C] MES Moy	0,004	0
Matrice de corrélation (Spearman) :		
Variables	pente lee side	[C] MES Moy
pente lee side	1	0,399
[C] MES Moy	0,399	1

[C] MES en fonction de la pente de face de dépôt

On remarque que à l'échelle des verticales (sommes des concentrations de MES sur une verticale de mesure) la concentration de MES est liée significativement aux différents paramètres morphologiques qui composent les dunes (longueur d'onde, hauteur et pente). On observe notamment que concernant la hauteur et la longueur d'onde des dunes, le niveau de corrélation avec la concentration des MES est plus important que chez les autres paramètres étudiés (Tableau 8 et 9

A l'inverse la rugosité relative semble finalement ne pas être un paramètre important dans l'évolution de la concentration des MES dans la colonne d'eau au-dessus des dunes. En effet d'après le test de corrélation de Spearman la rugosité relative n'est pas liée significativement à la concentration des MES.

3.2.1.3. Influence de la dynamique des dunes sur les MES

La dynamique des dunes, c'est-à-dire la vitesse de progradation de celles-ci, est liée significativement aux concentrations des MES à l'échelle des verticales de mesure d'après le test de corrélation statistique de Spearman. Cette forte corrélation entre la dynamique des dunes est à mettre en relation avec l'importante influence, en amont, du débit sur la vitesse de progradation (Figure 13). La vitesse longitudinale de l'écoulement semble être, contrairement au débit, moins adapté à démontrer la relation importante qui existe entre la dynamique des dunes et la concentration des MES (Figure 14).

Tableau 12 : Test statistique de corrélation entre la concentration des MES et la vitesse de progradation des dunes

Test statistique de corrélation de Spearman entre la vitesse de progradation C des dunes et [C] MES		
p-values (Spearman) :		
Variables	C moy (m/j)	[C] MES Moy
Celerité moyenne (m/j)	0	< 0,0001
[C] MES Moy	< 0,0001	0
Matrice de corrélation (Spearman) :		
Variables	C moy (m/j)	[C] MES Moy
Celerité moyenne (m/j)	1	0,544
[C] MES Moy	0,544	1

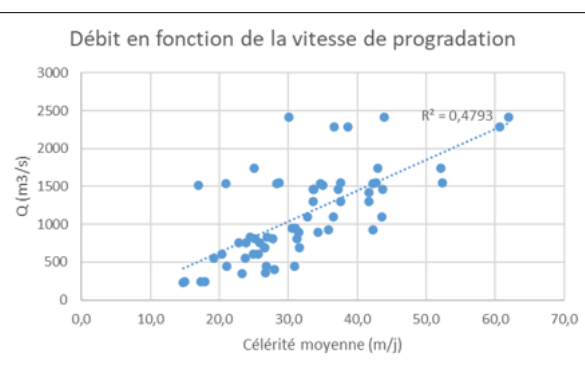
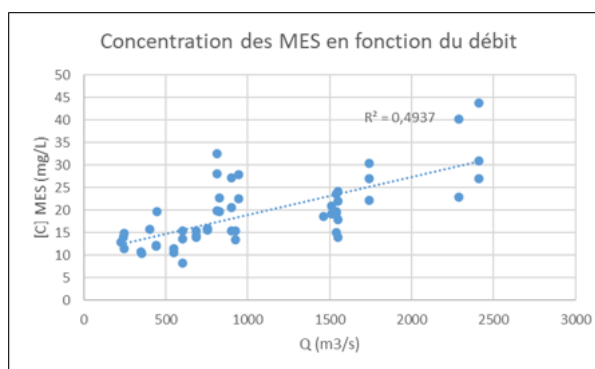
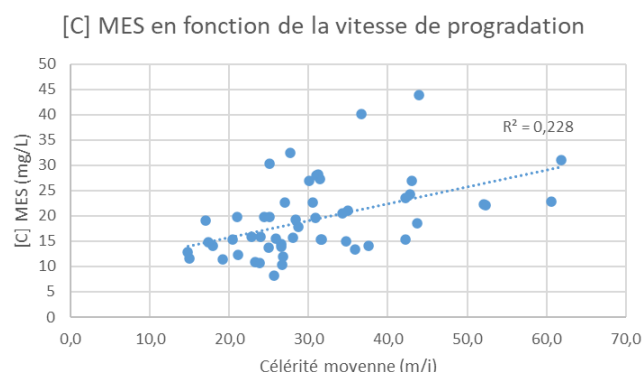


Figure 13 : Graphiques représentant l'influence du débit sur la concentration des MES et sur la vitesse de propagation des dunes à l'échelle de la colonne d'eau

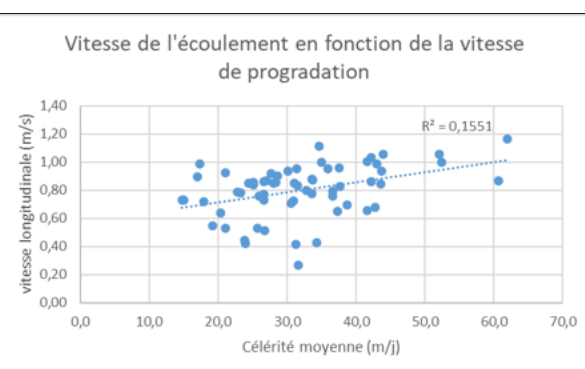
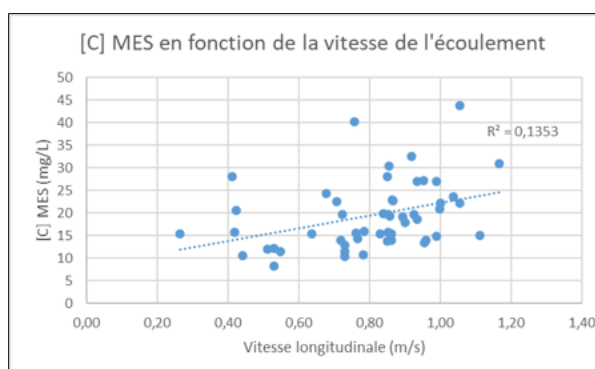


Figure 14 : Graphiques représentant l'influence de la vitesse d'écoulement sur la concentration des MES et sur la vitesse de propagation des dunes à l'échelle de la colonne d'eau

3.2.2. Matières en suspension et dunes à l'échelle des profondeurs

Nous allons maintenant étudier la variation des matières en suspension à l'échelle des différentes profondeurs A (surface), B (profondeur médiane) et C (fond) de la colonne d'eau (verticale),

afin de vérifier l'hypothèse suivante : les concentrations de MES en suspension sont surtout impactées immédiatement au-dessus des dunes, c'est-à-dire proche du fond où les variations de l'écoulement provoquées par la morphologie caractéristique des dunes sont importantes. Pour ce faire un test statistique de corrélation de Spearman a été utilisé sur les différents paramètres ou variables étudiées au regard des concentrations de MES.

3.2.2.1. Influence de l'hydrologie sur les MES

L'influence de la vitesse d'écoulement sur les différentes profondeurs A, B et C ne révèle (Figure 15) aucune relation significative importante contrairement au débit qui d'après les résultats du test de Spearman se révèle être lié significativement aux concentrations de MES quels que soient les niveaux de profondeur (Tableau 13).

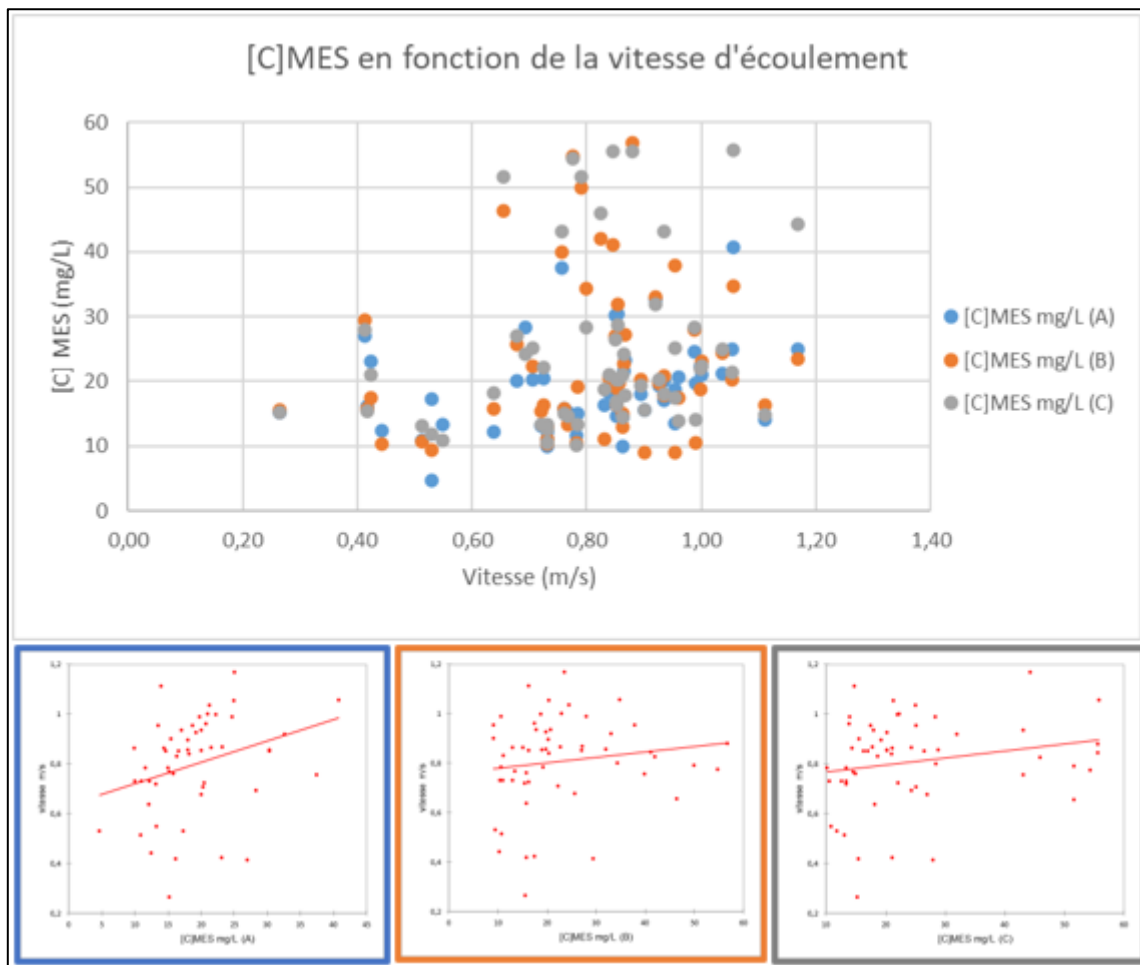
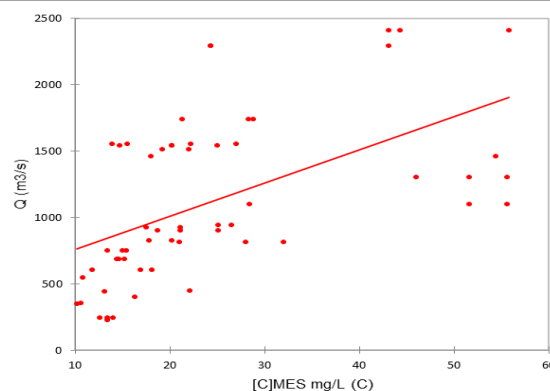
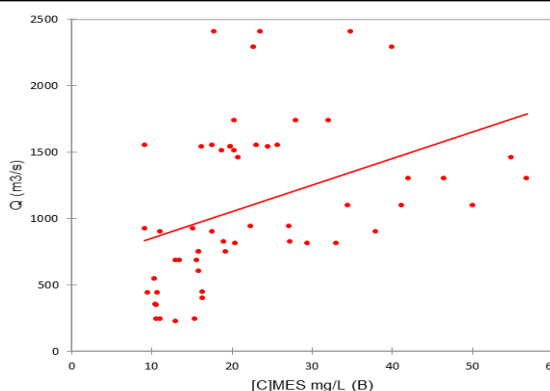
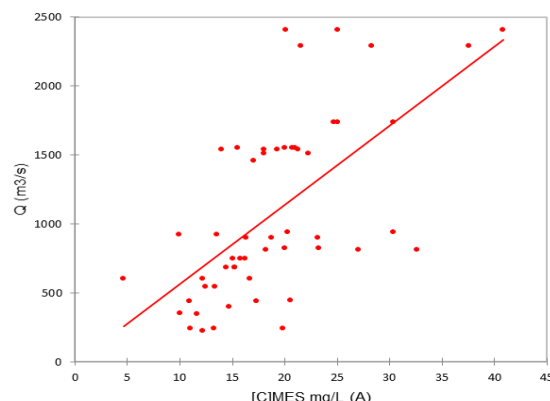


Figure 15 : Graphique de l'influence de la vitesse d'écoulement sur la concentration des MES à différentes profondeurs

Tableau 13 : Test statistique de corrélation entre le débit et la concentration de MES

Test de corrélation de Spearman entre Q et [C] MES			
A	p-values (Spearman) :		
	Variables	Q (m3/s)	[C]MES mg/L (A)
	Q (m3/s)	0	< 0,0001
	[C]MES mg/L (A)	< 0,0001	0
	Matrice de corrélation (Spearman) :		
B	Variables	Q (m3/s)	[C]MES mg/L (B)
	Q (m3/s)	0	< 0,0001
	[C]MES mg/L (B)	< 0,0001	0
	Matrice de corrélation (Spearman) :		
	Variables	Q (m3/s)	[C]MES mg/L (B)
	Q (m3/s)	1	0,565
C	Variables	Q (m3/s)	[C]MES mg/L (C)
	Q (m3/s)	0	< 0,0001
	[C]MES mg/L (C)	< 0,0001	0
	Matrice de corrélation (Spearman) :		
	Variables	Q (m3/s)	[C]MES mg/L (C)
	Q (m3/s)	1	0,660



3.2.2.2. Influence de la morphologie et dynamique des dunes sur les MES

Les résultats des tests de corrélations sur les divers paramètres morphologiques révèlent les principaux résultats présentés ci-dessous. Le *Steepness* des dunes, rapport de la hauteur sur la longueur d'onde des dunes, est corrélé plus fortement aux concentrations des matières en suspension au niveau des profondeurs ; médiane (B) et fond du lit (C) (Tableau 15). De même la vitesse de progradation des dunes se révèle être beaucoup plus fortement corrélée à la concentration des MES échantillonnées sur le fond, en comparaison aux MES échantillonnées à profondeur médiane ou en surface (Tableau 14). Ce sont donc immédiatement au-dessus des dunes que les MES sont les plus impactées par la vitesse des dunes.

Tableau 14 : Test statistique de corrélation entre la vitesse des dunes et la concentration de MES

Test de corrélation de Spearman entre vitesse de progradation des dunes et [C] MES			
A	p-values (Spearman) :		
	Variables	ité moyenne	[C]MES mg/L (A)
	Celerité moyenne (m/j)	0	0,0001
	[C]MES mg/L (A)	0,0001	0
	Matrice de corrélation (Spearman) :		
B	Variables	C moy (m/j)	[C]MES mg/L (B)
	Celerité moyenne (m/j)	0	< 0,0001
	[C]MES mg/L (B)	< 0,0001	0
	Matrice de corrélation (Spearman) :		
	Variables	C moy (m/j)	[C]MES mg/L (B)
	Celerité moyenne (m/j)	1	0,520
C	[C]MES mg/L (B)	0,520	1
	p-values (Spearman) :		
	Variables	C moy (m/j)	[C]MES mg/L (C)
	Celerité moyenne (m/j)	0	< 0,0001
	[C]MES mg/L (C)	< 0,0001	0
	Matrice de corrélation (Spearman) :		
	Variables	C moy (m/j)	[C]MES mg/L (C)
	Celerité moyenne (m/j)	1	0,623
	[C]MES mg/L (C)	0,623	1
	p-values (Spearman) :		
	Variables	C moy (m/j)	[C]MES mg/L (C)
	Celerité moyenne (m/j)	0	< 0,0001
	[C]MES mg/L (C)	< 0,0001	0
	Matrice de corrélation (Spearman) :		
	Variables	C moy (m/j)	[C]MES mg/L (C)
	Celerité moyenne (m/j)	1	0,623
	[C]MES mg/L (C)	0,623	1

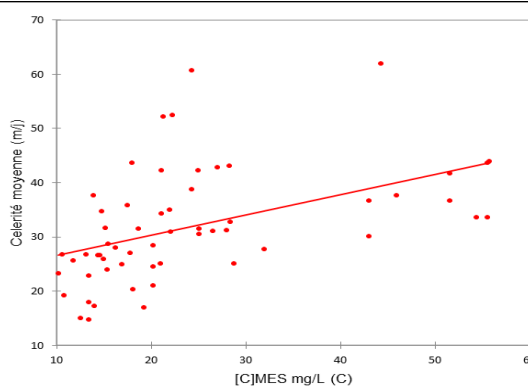
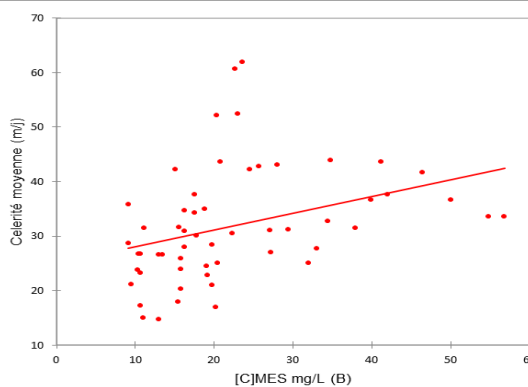
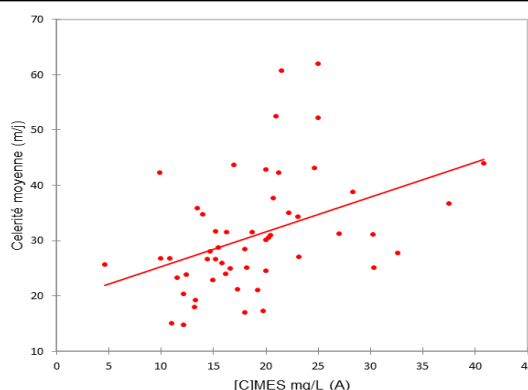
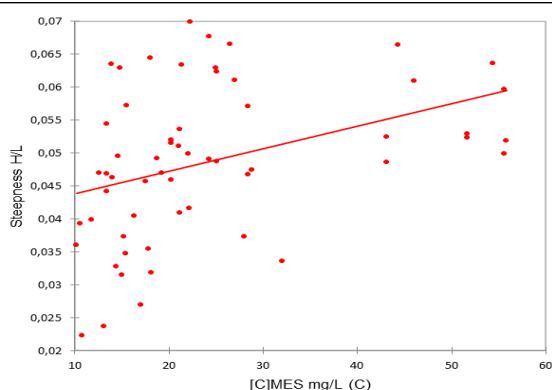
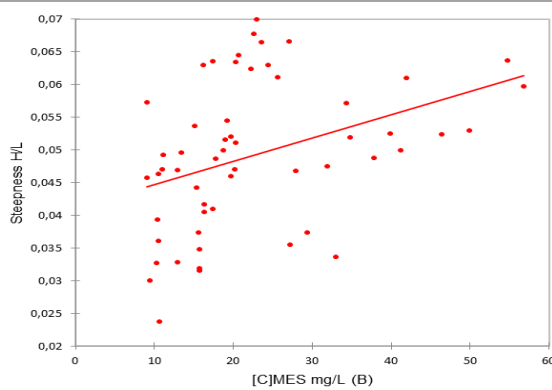
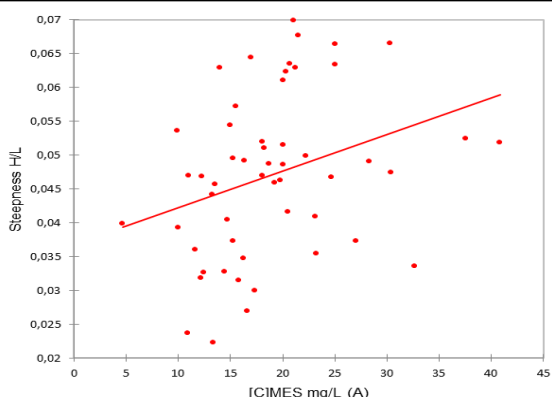


Tableau 15 : Test statistique de corrélation entre le rapport hauteur sur profondeur et la concentration de MES

Test de corrélation de Spearman entre <i>Steepness</i> et [C] MES			
A	p-values (Spearman) :		
	Variables	Steepness H/L	[C]MES mg/L (A)
	Steepness H/L	0	0,003
	[C]MES mg/L (A)	0,003	0
	Matrice de corrélation (Spearman) :		
B	Variables	Steepness H/L	[C]MES mg/L (B)
	Steepness H/L	0	0,00017
	[C]MES mg/L (B)	0,00017	0
	Matrice de corrélation (Spearman) :		
	Variables	Steepness H/L	[C]MES mg/L (B)
	Steepness H/L	1	0,487
C	[C]MES mg/L (B)	0,487	1
	p-values (Spearman) :		
	Variables	Steepness H/L	[C]MES mg/L (C)
	Steepness H/L	0	0,0002
	[C]MES mg/L (C)	0,0002	0
	Matrice de corrélation (Spearman) :		
	Variables	Steepness H/L	[C]MES mg/L (C)
	Steepness H/L	1	0,472
	[C]MES mg/L (C)	0,472	1
	p-values (Spearman) :		



3.2.2.3. Influence de la granulométrie constituant les dunes sur les MES

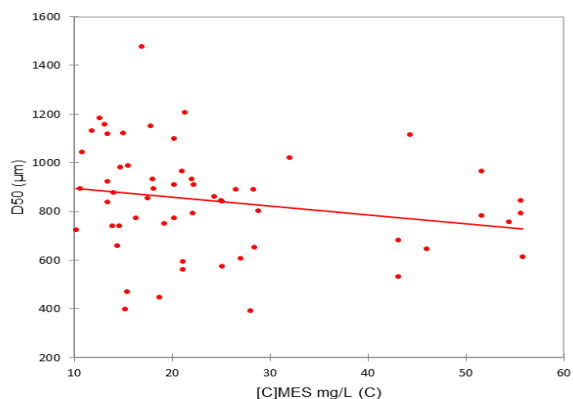
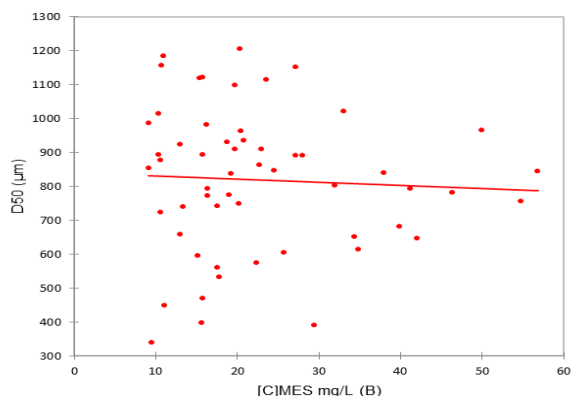
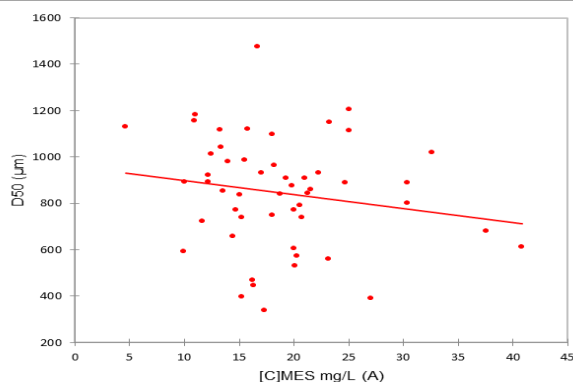
La granulométrie qui compose les dunes s'est révélée, précédemment à l'échelle des verticales (somme des MES sur la verticale), être un paramètre n'influant pas la variation de concentration des MES. Néanmoins l'étude de la granulométrie des dunes à l'échelle des différentes profondeurs qui compose la colonne d'eau au-dessus des dunes a révélé, à l'aide de la réalisation du test de corrélation de Spearman, la présence d'une faible corrélation inverse (négative) entre la taille des grains qui

composent la dune et la concentration des MES proche du fond (profondeur C). En ce qui concerne les autres profondeurs le test de Spearman ne révèle aucune relation significative.

Afin d'étudier la variation de la granulométrie des dunes en fonction de la concentration des MES, la taille de grain médiane D50 a été utilisée.

Tableau 16 : Test statistique de corrélation entre la granulométrie qui compose les dunes et la concentration des MES

Test de corrélation de Spearman entre granulométrie des dunes et [C] MES			
A	p-values (Spearman) :		
	Variables	D50 (μm)	[C]MES mg/L (A)
	D50 (μm)	0	0,216
	[C]MES mg/L (A)	0,216	0
	Matrice de corrélation (Spearman) :		
B	Variables	D50 (μm)	[C]MES mg/L (B)
	D50 (μm)	0	0,582
	[C]MES mg/L (B)	0,582	0
	Matrice de corrélation (Spearman) :		
	Variables	D50 (μm)	[C]MES mg/L (B)
	D50 (μm)	1	-0,075
C	[C]MES mg/L (B)	-0,075	1
	p-values (Spearman) :		
	Variables	D50 (μm)	[C]MES mg/L (C)
	D50 (μm)	0	0,026
	[C]MES mg/L (C)	0,026	0
	Matrice de corrélation (Spearman) :		
	Variables	D50 (μm)	[C]MES mg/L (C)
	D50 (μm)	1	-0,296
	[C]MES mg/L (C)	-0,296	1
	p-values (Spearman) :		
	Variables	D50 (μm)	[C]MES mg/L (C)
	D50 (μm)	0	0,026
	[C]MES mg/L (C)	0,026	0
	Matrice de corrélation (Spearman) :		
	Variables	D50 (μm)	[C]MES mg/L (C)
	D50 (μm)	1	-0,296
	[C]MES mg/L (C)	-0,296	1



4. Discussion

4.1. Les matières en suspension en comparaison avec les autres flux

Nous constatons tout d'abord en ce qui concerne le flux solide total transporté sur la station durant la période d'étude, que le débit *beadload* (en charge de fond) est légèrement plus important

(en moyenne) que le débit en suspension, en termes de quantités. En effet la moyenne des flux sédimentaires en suspension et en charge de fond calculé sur la période d'étude ainsi que le calcul du ratio Q_b/Q_s confirme tout deux ce résultat. Cependant il est important de noter que le débit en charge de fond par son importante complexité d'échantillonnage, en termes de précisions, sur le terrain comprend une part du transport sédimentaire en suspension près du fond. Zone qui de surcroît est la profondeur où les sédiments transportés par suspension sont les plus représentés, du fait du pic de concentrations élevées des MES près du fond d'après la littérature [Villard et Kostaschuk, 1998 ; Venditti et Bennett, 2000 ; Cellino et Graf, 2000 ; Wren et al., 2005 ; Wren et al., 2007 ; Naqshband et Hoitink, 2020]. La recherche confirme également [Babi, 2005] une plus grande place du flux sédimentaire de fond (dans le flux sédimentaire total) dans les rivières d'Europe comparées aux rivières équatoriales, où est observée une dominance des sédiments en suspension dans la dynamique sédimentaire. De plus d'après la thèse menée par [Minaudo et al., 2015] une diminution de la concentration des MES est observée depuis 1970 en raison de l'activité humaine. Ce qui peut donc expliquer la légère dominance des sédiments transportés en charge de fond sur la Loire, qui est un fleuve assez végétalisé avec une faible pente et où en temps normal le transport en suspension devrait donc dominer le transport solide total.

Pour finir [Claude et al., 2015] confirme les résultats de cette étude concernant les mesures de flux sédimentaire en suspension et en charge de fond. En effet un débit en suspension et en charge de fond d'environ 500 000 (T/ans) pour un module de 493 m³/s sur la période d'étude semble être un résultat cohérent en ordre de grandeur d'après les résultats retrouvés chez l'étude réalisée par [Claude et al., 2015] qui se place également dans un contexte ligérien.

Ensuite nous allons nous intéresser à la faible corrélation observée entre le débit en suspension et le débit en charge de fond à l'échelle de la section (Tableau 6). En effet l'évolution de ces deux paramètres dépendent fortement de l'hydrologie en place (débit liquide). Ils sont donc indirectement corrélés. Cependant leur faible niveau de corrélation laisse à penser que d'autres paramètres propres à chacun influencent également leur variation. En effet d'après [Sadeghi et Kheirfam, 2015] le flux de sédiments en suspension est influencé davantage par les précipitations, l'érodabilité du sol et des berges, la topographie et la densité de la couverture végétale propre à chaque bassin-versant. Tandis que le flux de sédiments en charge de fond est influencé principalement par le débit et la pente. Les activités humaines prennent également une place importante dans la dynamique sédimentaire de fond et en suspension dans les rivières. Les sédiments transportés en suspension et les processus entraînant la mobilisation des sédiments sont de plus en plus influencés par les activités humaines, telles que l'agriculture, l'industrie, les mines de charbon et la construction de bâtiments (extraction de sédiments ect.) ; ce qui peut entraîner des réponses morphologiques de la rivière avec notamment des phénomènes d'incisions comme on peut en observer sur la Loire (extraction de sédiments, aménagements pour la navigation, etc...) ou des phénomène de colmatage (dépôt massif de sédiments fins, agriculture).

4.2. Influence entre les formes de lit et les MES

Tout d'abord à l'échelle de la colonne d'eau (somme des MES sur les verticales de mesures), les différents résultats présentés ci-dessus révèlent que les paramètres morphologiques des dunes, et plus particulièrement la hauteur et la longueur d'onde sont des paramètres importants qui impactent fortement l'évolution des MES dans la colonne d'eau sus-jacente. Ainsi le *Steepness* des dunes, c'est-à-dire le rapport entre la hauteur et la longueur d'onde (permet de classer les différents types de dunes : asymétrique et symétrique) est donc un rapport important qui va jouer un rôle dans l'évolution de la concentration des MES. Les matières en suspension au-dessus des dunes vont donc évoluer différemment en fonction des différents types (morphologiques) de dunes rencontrés. La pente est

également un paramètre important car elle va influencer la mise en place de la zone de recirculation dans le creux de la dune ce qui d'après la littérature permet le renvoi des sédiments fins qui composent la dune dans l'écoulement sus-jacent.

En ce qui concerne la dynamique des dunes et la concentration des MES, les résultats démontrent qu'il existe bien une corrélation positive significative assez forte entre la concentration des MES et la vitesse de progradation des dunes. Ce résultat s'explique par la forte corrélation qui existe entre le débit et la concentration des MES. En effet le débit étant fortement corrélé à la vitesse des dunes il n'est pas étonnant que celle-ci soit donc indirectement liée significativement à la concentration des MES.

La rugosité relative, autrement dit le rapport entre la hauteur des dunes et la colonne d'eau ne semble quant à elle pas liée significativement à la concentration de MES. Ce résultat peut être néanmoins nuancé par la très faible variation de la rugosité relative sur la période d'échantillonnage, ce qui ne permet pas vraiment d'apprécier les impacts que cela peut avoir sur la concentration des MES.

Ensuite à l'échelle des différentes profondeurs d'échantillonnage des MES, A (surface), B (profondeur médiane) et C (fond), les résultats démontrent effectivement dans la plupart des cas une corrélation plus importante au niveau des MES présentes proche du fond (profondeur C). L'analyse des concentrations de matières en suspension à cette échelle permet également de mettre en lumière certaines relations observées non significatives à plus grande échelle. C'est le cas de la granulométrie qui compose les dunes, ce paramètre bien qu'observé comme non corrélé à la concentration des MES à l'échelle des verticales se révèle être faiblement inversement corrélé aux matières en suspension proche du fond seulement. Ce résultat illustre la recirculation des sédiments fins qui composent la dune dans l'écoulement directement au-dessus (profondeur C seulement), qui a lieu dans le creux des dunes (dû aux turbulences et écoulements, caractéristique de la présence des dunes).

5. Conclusion

Cette étude menée sur les relations entre la présence de dunes dans les fonds de lit sableux et la concentration des matières en suspension sur la Loire, et plus précisément sur le site de St Mathurin sur Loire, a permis d'exposer plusieurs résultats importants.

Premièrement les matières en suspensions sont fortement corrélées, à grande échelle (bassin-versant ou section totale d'étude), à l'hydrologie en place. Cela comprend les précipitations (hystérésis), le débit et la vitesse longitudinale de l'écoulement.

Deuxièmement à plus petites échelles la complexité des interactions entre les matières en suspension et l'hydrologie en place augmente avec la présence de dunes sur le fond du lit, ce qui va également influencer fortement le profil de concentration des MES dans la colonne d'eau sus-jacente. En particulier le *Steepness* des dunes (rapport de la hauteur des dunes sur la longueur d'onde) est un paramètre important. En effet la hauteur et la longueur d'onde des dunes sont deux paramètres morphologiques fortement corrélés à la concentration des MES dans la colonne d'eau. De plus les résultats révèlent une corrélation plus importante des paramètres morphologiques des dunes avec les MES proche du fond, dans la plupart des cas. L'impact des dunes se fait donc ressentir à l'échelle de la colonne d'eau et plus précisément sur les matières en suspension présente dans la moitié inférieure de la colonne d'eau.

Pour finir les résultats de l'étude démontrent qu'en dehors des paramètres morphologiques des dunes, la dynamique des dunes (vitesse de progradation) et la granulométrie qui les compose vont également, à différentes échelles être corrélés à la concentration de MES.

Les résultats de cette étude sont en accord avec les hypothèses et les principaux résultats dégagés du PFE (étude bibliographie) à savoir : la présence, en général, d'un gradient de concentration des MES (du fond vers la surface) ; pas de corrélation étroite entre la vitesse longitudinale et la concentration des MES au-dessus des dunes et la présence d'une corrélation importante entre les paramètres morphologiques des dunes (hauteur, longueur d'onde et pente de la face de dépôt) et les MES, à l'échelle de la colonne d'eau. A l'inverse la rugosité relative semble n'être pas corrélée aux concentrations de MES, contrairement aux hypothèses effectuées dans le PFE.

Pour finir Il serait intéressant par la suite, en vue d'une étude plus poussée sur le sujet, d'avoir la vitesse de cisaillement qui d'après la recherche est un paramètre important dans la prédiction des profils de concentration des MES dans la colonne d'eau. Un travail sur la rugosité relative comprenant davantage d'échantillonnages pourrait également être effectué afin de déterminer si ce paramètre n'intervient réellement pas dans l'évolution des concentrations des MES.

ANNEXE

Annexe 1 : Tableau calcul ratio Qb/Qs

Date	Verticale	Qs (T/j)	Qb (T/j)	Qb/Qs (%)	Somme Qb/Qs
28/11/2016 V1		2903	576	20	20
28/11/2016 V3		2111	181	9	
28/11/2016 V4		4021	1026	26	
29/11/2016 V1		2174	276	13	18
29/11/2016 V2		1806	75	4	
29/11/2016 V3		1581	211	13	
29/11/2016 V4		3663	1053	29	
30/11/2016 V1		1104	101	9	32
30/11/2016 V2		1006	143	14	
30/11/2016 V3		995	267	27	
30/11/2016 V4		1928	1111	58	
01/12/2016 V1		1125	516	46	45
01/12/2016 V3		665	295	44	
01/12/2016 V4		1483	655	44	
27/03/2017 V1		198	370	187	147
27/03/2017 V2		81	4	5	
27/03/2017 V3		170	216	127	
27/03/2017 V4		400	660	165	
28/03/2017 V1		295	652	221	127
28/03/2017 V2		137	8	6	
28/03/2017 V3		223	154	69	
28/03/2017 V4		513	668	130	
29/03/2017 V1		416	568	137	97
29/03/2017 V2		154	10	6	
29/03/2017 V3		278	167	60	
29/03/2017 V4		809	856	106	
30/03/2017 V1		644	511	79	47
30/03/2017 V2		241	10	4	
30/03/2017 V3		365	48	13	
30/03/2017 V4		989	484	49	
15/05/2017 V1		88	110	125	55
15/05/2017 V3		62	52	84	
15/05/2017 V4		272	71	26	
16/05/2017 V1		103	271	264	118
16/05/2017 V3		68	105	154	
16/05/2017 V4		232	100	43	
17/05/2017 V1		161	252	157	
17/05/2017 V3		141	58	41	42
17/05/2017 V4		484	21	4	
18/05/2017 V1		303	86	28	9
18/05/2017 V3		206	1	1	
18/05/2017 V4		504	8	2	
04/12/2017 V1		97	78	80	27
04/12/2017 V3		48	0	0	
04/12/2017 V4		147	0	0	
05/12/2017 V1		152	152	100	
05/12/2017 V3		52	0	1	41
05/12/2017 V4		168	0	0	
06/12/2017 V1		134	288	215	87
06/12/2017 V3		37	0	0	
06/12/2017 V4		161	1	0	
07/12/2017 V1		254	185	73	
07/12/2017 V3		49	10	20	36
07/12/2017 V4		272	13	5	
08/12/2017 V1		134	222	166	72
08/12/2017 V3		36	1	3	
08/12/2017 V4		139	0	0	

15/01/2018 V1	1128	751	67	69
15/01/2018 V2	944	1299	138	
15/01/2018 V4	2125	830	39	
16/01/2018 V1	975	2313	237	143
16/01/2018 V2	566	1229	217	
16/01/2018 V4	1269	482	38	
17/01/2018 V1	692	1966	284	93
17/01/2018 V2	528	309	58	
17/01/2018 V3	400	190	48	
17/01/2018 V4	1434	364	25	
18/01/2018 V1	659	3908	593	205
18/01/2018 V2	421	338	80	
18/01/2018 V3	330	401	122	
18/01/2018 V4	1138	573	50	
19/01/2018 V1	831	911	110	91
19/01/2018 V2	649	987	152	
19/01/2018 V4	1340	673	50	
30/01/2018 V1	1648	1861	113	91
30/01/2018 V2	985	895	91	
30/01/2018 V4	2017	314	16	
31/01/2018 V1	1104	1396	127	58
31/01/2018 V2	365	480	132	
31/01/2018 V4	2944	689	23	
08/02/2018 V1	558	2896	520	176
08/02/2018 V2	429	96	22	
08/02/2018 V3	179	54	30	
08/02/2018 V4	854	507	59	
14/05/2018 V1	170	80	47	28
14/05/2018 V3	43	1	3	
14/05/2018 V4	79	0	1	
15/05/2018 V1	186	78	42	39
15/05/2018 V2	70	48	69	
15/05/2018 V3	21	0	1	
15/05/2018 V4	46	1	2	
16/05/2018 V1	84	249	296	104
16/05/2018 V2	150	25	16	
16/05/2018 V3	33	3	10	
17/05/2018 V1	306	212	69	59
17/05/2018 V2	174	64	37	
17/05/2018 V3	61	42	69	
15/04/2019 V1	64	164	257	684
15/04/2019 V5	8	11	150	
15/04/2019 V6	20	451	2211	
16/04/2019 V1	33	68	207	644
16/04/2019 V5	4	0	1	
16/04/2019 V6	12	246	2125	
17/04/2019 V1	39	258	659	1240
17/04/2019 V5	7	9	123	
17/04/2019 V6	11	454	3953	
18/04/2019 V1	30	134	449	1012
18/04/2019 V5	7	0	6	
18/04/2019 V6	12	357	3092	
09/12/2019 V2	648	464	72	97
09/12/2019 V6	505	659	131	
10/12/2019 V1	369	69	19	
10/12/2019 V4	419	554	132	82
10/12/2019 V5	390	346	89	
12/12/2019 V1	778	389	50	
12/12/2019 V4	549	882	161	96

Annexe 2 : Tableau de données concernant la distribution verticale des MES

Date	Verticale	Profondeur	[CMES mg/L]	Difference [C] (C-B)	Difference [C] (C-A)	Situation
28/11/2016 V1	B	57				
28/11/2016 V1	C	87,2	5,2			
28/11/2016 V3	B	106,4				
28/11/2016 V3	C	97,2	-9,2			
28/11/2016 V4	B	124				
28/11/2016 V4	C	121,6	-0,4			
29/11/2016 V1	B	54,8				
29/11/2016 V1	C	54,4	-0,4			
29/11/2016 V2	B	76				
29/11/2016 V2	C	74,4	-1,6			
29/11/2016 V3	B	94				
29/11/2016 V3	C	80,4	-13,6			
29/11/2016 V4	B	91,2				
29/11/2016 V4	C	88	-3,2			
30/11/2016 V1	B	42				
30/11/2016 V1	C	46,4	4			
30/11/2016 V2	B	56,8				
30/11/2016 V2	C	51,6	-5,2			
30/11/2016 V3	B	56,8				
30/11/2016 V3	C	51,6	-5,2			
30/11/2016 V4	B	56,8				
30/11/2016 V4	C	51,6	-5,2			
01/12/2016 V1	B	34,4				
01/12/2016 V1	C	28,4	-6			
01/12/2016 V3	B	41,2				
01/12/2016 V3	C	55,6	14,4			
01/12/2016 V4	B	50				
01/12/2016 V4	C	54,6	4,6			
27/03/2017 V1	A	15,2				
27/03/2017 V1	B	14,4				
27/03/2017 V1	C	14,6	1,2	-0,6		
27/03/2017 V2	A	15,2				
27/03/2017 V2	B	15,6				
27/03/2017 V2	C	15,2	-0,4	2,84217E-14		
27/03/2017 V3	A	15,2				
27/03/2017 V3	B	16,8				
27/03/2017 V3	C	15,2	-1,6	2,84217E-14		
27/03/2017 V4	A	14,4				
27/03/2017 V4	B	13				
27/03/2017 V4	C	14,4	1,4	0		
28/03/2017 V1	A	15				
28/03/2017 V1	B	19,2				
28/03/2017 V1	C	13,4	-5,8	-1,6		
28/03/2017 V2	A	16,2				
28/03/2017 V2	B	13,8				
28/03/2017 V2	C	14,4	0,6	-0,8		
28/03/2017 V3	A	19,4				
28/03/2017 V3	B	17,4				
28/03/2017 V3	C	19	1,6	-0,4		
28/03/2017 V4	A	15,8				
28/03/2017 V4	B	15,8				
28/03/2017 V4	C	15	-0,8	-0,8		
29/03/2017 V1	A	20				
29/03/2017 V1	B	19				
29/03/2017 V1	C	20,2	1,2	0,2		
29/03/2017 V2	A	21,6				
29/03/2017 V2	B	24,6				
29/03/2017 V2	C	24	-0,6	-1,6		
29/03/2017 V3	A	24				
29/03/2017 V3	B	25,6				
29/03/2017 V3	C	23,4	-2,2	-0,6		
29/03/2017 V4	A	27,2				
29/03/2017 V4	B	27,2				
29/03/2017 V4	C	17,8	-9,4	-5,4		
30/03/2017 V1	A	18,2				
30/03/2017 V1	B	20,4				
30/03/2017 V1	C	21	0,6	2,8		
30/03/2017 V2	A	27				
30/03/2017 V2	B	29,4				
30/03/2017 V2	C	28	-1,4	1		
30/03/2017 V3	A	30				
30/03/2017 V3	B	30,8				
30/03/2017 V3	C	31,2	0,4	1,2		
30/03/2017 V4	A	31,6				
30/03/2017 V4	B	33				
30/03/2017 V4	C	32	-1	-0,6		
15/05/2017 V1	A	11,6				
15/05/2017 V1	B	10,8				
15/05/2017 V1	C	10,2	-0,4	-1,4		
15/05/2017 V2	A	10				
15/05/2017 V2	B	14,2				
15/05/2017 V2	C	11,8	-2,4	1,8		
15/05/2017 V3	A	13,6				
15/05/2017 V3	B	14,4				
15/05/2017 V3	C	16,2	1,8	2,6		
16/05/2017 V1	A	10				
16/05/2017 V1	B	10,4				
16/05/2017 V1	C	10,6	0,2	0,6		
16/05/2017 V2	A	11				
16/05/2017 V2	B	10,8				
16/05/2017 V2	C	11	0,2	0		
16/05/2017 V3	A	12				
16/05/2017 V3	B	14,2				
16/05/2017 V3	C	14,9	0,7	2,9		
17/05/2017 V1	A	14,7				
17/05/2017 V1	B	16,3				
17/05/2017 V1	C	16,3	0	1,6		
17/05/2017 V2	A	17,4				
17/05/2017 V2	B	18,1				
17/05/2017 V2	C	20,2	2,2	2,9		
17/05/2017 V3	A	21,5				
17/05/2017 V3	B	21,8				
17/05/2017 V3	C	19,5	-2,3	-2		
18/05/2017 V1	A	20,5				
18/05/2017 V1	B	22,1				
18/05/2017 V1	C	22,1	5,8	1,6		
18/05/2017 V2	A	23,6				
18/05/2017 V2	B	23,4				
18/05/2017 V2	C	26,3				
18/05/2017 V3	A	27,8				
18/05/2017 V3	B	27,8	1,5	4,4		
18/05/2017 V4	A	22,9				
18/05/2017 V4	B	24,8				
18/05/2017 V4	C	23,4	-1,4	0,5		
04/12/2017 V1	A	9,7				
04/12/2017 V1	B	8,4				
04/12/2017 V1	C	9,3	0,9	-0,4		
04/12/2017 V3	A	15,8734286				
04/12/2017 V3	B	15,42857143				
04/12/2017 V3	C	18,42857143		3,571428571		
04/12/2017 V4	A	10,6				
04/12/2017 V4	B	12,42857143		3,4		
04/12/2017 V4	C	14				
05/12/2017 V1	A	13,2				
05/12/2017 V1	B	15,4				
05/12/2017 V1	C	11,4	-2	0,2		
05/12/2017 V2	A	16				
05/12/2017 V2	B	15,4				
05/12/2017 V2	C	12,2	-5,8	-3,8		
05/12/2017 V3	A	16,8				
05/12/2017 V3	B	16,8				
05/12/2017 V3	C	19,87342857		9,742857143	3	
06/12/2017 V1	A	11				
06/12/2017 V1	B	11				
06/12/2017 V1	C	12,6	1,6	1,6		
06/12/2017 V2	A	13,4				
06/12/2017 V2	B	14				
06/12/2017 V2	C	17,2	3,2	3,0		
06/12/2017 V3	A	12,6				
06/12/2017 V3	B	13,2				
06/12/2017 V3	C	12,2	-1	-0,4		
07/12/2017 V1	A	19,8				
07/12/2017 V1	B	10,6				
07/12/2017 V1	C	14	3,4	-5,8		
07/12/2017 V3	A	15,4				
07/12/2017 V3	B	16,4				
07/12/2017 V3	C	18	-0,4	2,6		
07/12/2017 V4	A	16,8				
07/12/2017 V4	B	16,8				
07/12/2017 V4	C	13	-3,8	-3,8		
08/12/2017 V1	A	12,2				
08/12/2017 V1	B	13				
08/12/2017 V1	C	13,4	0,4	1,2		
08/12/2017 V3	A	13,8				
08/12/2017 V3	B	14		0,2		
08/12/2017 V4	A	11,4				
08/12/2017 V4	B	11,4				
08/12/2017 V4	C	14,8	3,2	3,4		
15/01/2018 V1	A	25				
15/01/2018 V1	B	20,33333333				
15/01/2018 V1	C	21,33333333	1	-3,666666667		
15/01/2018 V2	A	24				
15/01/2018 V2	B	26				
15/01/2018 V2	C	26,33333333	0,333333333	3,666666667		
15/01/2018 V4	A	30,33333333				
15/01/2018 V4	B	21				
15/01/2018 V4	C	28,8	-3,2	-1,533333333		
16/01/2018 V1	A	21				
16/01/2018 V1	B	21,5				
16/01/2018 V1	C	22,25	-0,75	1,25		
16/01/2018 V2	A	25				
16/01/2018 V2	B	20,4				
16/01/2018 V2	C	23,66666667	3,266666667	3,666666667		
16/01/2018 V4	A	30				
16/01/2018 V4	B	25,66666667				
16/01/2018 V4	C	27	1,333333333	7		
17/01/2018 V1	A	17				
17/01/2018 V1	B	20,75				
17/01/2018 V1	C	18	-2,75	1		
17/01/2018 V2	A	27,25				
17/01/2018 V2	B	24,5				
17/01/2018 V2	C	17,25	-7,25	-10		
17/01/2018 V3	A	24,75				
17/01/2018 V3	B	24,25				
17/01/2018 V3	C	27,25	3	2,5		
17/01/2018 V4	A	26,25				
17/01/2018 V4	B	27,25				
17/01/2018 V4	C	23,25	-4	-3		
18/01/2018 V1	A	14				
18/01/2018 V1	B	16,25				
18/01/2018 V1	C	14,75	-1,5	0,75		
18/01/2018 V2	A	18				
18/01/2018 V2	B	15,75				
18/01/2018 V2	C	20,25	0,5	2,25		
18/01/2018 V3	A	20				
18/01/2018 V3	B	13,5				
18/01/2018 V3	C	24,75	11,25	4,75		
18/01/2018 V4	A	18,25				
18/01/2018 V4	B	19,75				
18/01/2018 V4	C	20,25	0,5	1		
18/01/2018 V5	A	21,25				
18/01/2018 V5	B	24,5				
18/01/2018 V5	C	20,5	0,5	3,75		
18/01/2018 V2	A	22,25				
18/01/2018 V2	B	22,75				
18/01/2018 V2	C	22	3,25	-0,25		
19/01/2018 V4	A	18				
19/01/2018 V4	B	20,25				
19/01/2018 V4	C	19,25	-1	1,25		
20/01/2018 V1	A	25,05				
20/01/2018 V1	B	21,55				
20/01/2018 V1	C	44,3	20,75	19,25		
20/01/2018 V2	A	40,8				
20/01/2018 V2	B	34,4				
20/01/2018 V2	C	55,8	21	15		
20/01/2018 V4	A	20,8				
20/01/2018 V4	B	17,8				
20/01/2018 V4	C	43,1	25,3	23,05		
31/01/2018 V1	A	22,7				
31/01/2018 V1	B	22,7				
31/01/2018 V1	C	24,3	1,6	2,8		
31/01/2018 V2	A	32,1				
31/01/2018 V2	B	24,7	-7,8	-4		
31/0						

Bibliographie :

- Babi, Zygmunt. 2005. « The Relationship between Suspended and Bed Load Transport in River Channels ». : 7.
- Cardinale, Marco, Henrik Hargitai, et Kathryn E. Fitzsimmons. 2014. « Dune ». In *Encyclopedia of Planetary Landforms*, New York, NY: Springer New York, 1 18.
- Cellino, M., et W.H. Graf. 2000. « Experiments on Suspension Flow in Open Channels with Bed Forms ». *Journal of Hydraulic Research* 38(4): 289-98.
- Holmes, Jr., Robert R., et Marcelo H. Garcia. 2002. « Velocity and Sediment Concentration Measurements over Bedforms in Sand-Bed Rivers ». In *Hydraulic Measurements and Experimental Methods 2002*, Estes Park, Colorado, United States: American Society of Civil Engineers, 1-9.
- Martin, Bečvář. 2013. « Sediment Load and Suspended Sediment Concentration Prediction ». *Soil and Water Research* 1(No. 1): 23-31.
- Minaudo, Camille. 2015 « Analyse et modélisation de l'eutrophisation de la Loire ». : 263.
- Naqshband, S., et A. J. F. Hoitink. 2020. « Scale-Dependent Evanescence of River Dunes During Discharge Extremes ». *Geophysical Research Letters* 47(6): e2019GL085902.
- Rodrigues s., Le Hir, P., Moatar F, CLAUDE, n. 2016. Transferts de particules dans le continuum fluvio-estuarien in « La Loire fluviale et estuarienne: un milieu en évolution ». Florentina Moatar, Nadia Dupont, coord., 320 p. Collection Synthèses - Edition Quae, pp. 85-111.
- Sadeghi, Seyed Hamidreza, et Hossein Kheirfam. 2015. « Temporal Variation of Bed Load to Suspended Load Ratio in Kojour River, Iran: Water ». *CLEAN - Soil, Air, Water* 43(10): 1366-74.
- Syvitski, James P. M., Albert J. Kettner, Anna Correggiari, et Bruce W. Nelson. 2005. « Distributary Channels and Their Impact on Sediment Dispersal ». *Marine Geology* 222-223: 75-94.
- Venditti, Jeremy G., et Sean J. Bennett. 2000. « Spectral Analysis of Turbulent Flow and Suspended Sediment Transport over Fixed Dunes ». *Journal of Geophysical Research: Oceans* 105(C9): 22035-47.
- Villard, Paul, et Ray Kostaschuk. 1998. « The Relation between Shear Velocity and Suspended Sediment Concentration over Dunes: Fraser Estuary, Canada ». *Marine Geology* 148(1-2): 71-81.
- Wren, D. G., S. J. Bennett, B. D. Barkdoll, et R. A. Kuhnle. 2005. « Variability in Suspended-Sediment Concentration over Mobile Sand Beds ». *Journal of Hydraulic Engineering* 131(8): 733-36.
- Wren, D. G., R. A. Kuhnle, et C. G. Wilson. 2007. « Measurements of the Relationship between Turbulence and Sediment in Suspension over Mobile Sand Dunes in a Laboratory Flume ». *Journal of Geophysical Research* 112(F3): F03009.



Relations entre la présence de dunes et la concentration des Matières en Suspension

Résumé :

Les dunes subaquatiques souvent présentes dans les rivières sableuses modifient l'hydrologie sus-jacente et impactent le flux de transport sédimentaire en suspension. En particulier, la morphologie spécifique des dunes impacte les matières en suspension (MES) qui sont, en l'absence des dunes, observées de distribution invariante dans la colonne d'eau. La présence de dunes est donc un paramètre majeur à prendre en compte concernant l'évolution quantitative des matières en suspension. Ce document a pour but, à l'aide d'un important travail d'échantillonnage (réparti sur trois ans) sur la Loire au niveau du site de Saint Mathurin-sur-Loire, de souligner les relations présentes entre les dunes et les sédiments en suspension afin de s'intéresser de plus près aux fonctionnements des interactions complexes qui existent entre la morphologie des dunes, la dynamique hydrologique et la dynamique sédimentaire. Les principaux résultats observés confirment la littérature sur le sujet ; c'est-à-dire des MES généralement plus importantes près du fond, une relation importante entre les paramètres morphologiques des dunes et les sédiments en suspension près du fond et un impact important de l'hydrologie à grande échelle sur les matières en suspension.

Mots Clés : *Matières en suspension, débit liquide, débit solide, dunes, morphologie, hydrologie*

Tuteur académique :

Stéphane Rodrigues