



**HAL**  
open science

# Utilisation de la morphogranulométrie dans le suivi source to sink du transfert particulaire dans les bassins versants

David Viennet

► **To cite this version:**

David Viennet. Utilisation de la morphogranulométrie dans le suivi source to sink du transfert particulaire dans les bassins versants. Sciences de la Terre. Normandie Université, 2020. Français. NNT : 2020NORMR016 . tel-02966950

**HAL Id: tel-02966950**

**<https://theses.hal.science/tel-02966950>**

Submitted on 14 Oct 2020

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

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

# THÈSE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité  
SCIENCES DE L'UNIVERS

Préparée au sein de l'Université de Rouen Normandie

## Utilisation de la morphogranulométrie dans le suivi source to sink du transfert particulaire dans les bassins versants

Présentée et soutenue par  
David VIENNET

Thèse soutenue publiquement le 30/06/2020  
devant le jury composé de

Hélène CELLE-JEANTON	Professeur, Université de Franche-Comté, Besançon	Rapporteur
Valérie PLAGNES	Professeur, Sorbonne Université, Paris	Rapporteur
Olivier CERDAN	Ingénieur recherche, BRGM, Orléans	Examineur
Olivier EVRARD	Chargé de recherche, CEA, Saclay	Examineur
Nicolas MASSEI	Professeur, Université de Rouen Normandie	Examineur
Matthieu FOURNIER	Maître de Conférences, HDR, Université de Rouen Normandie	Directeur de thèse

Thèse dirigée par Matthieu FOURNIER et Jean-Paul DUPONT, laboratoire UMR CNRS 6143 Morphodynamique Continentale et Côtière



## REMERCIEMENTS

Cette thèse c'est 3 ans d'un travail où j'ai navigué entre laboratoire, terrain, et bureau. De nombreux écueils ont été surmontés, externes tel que le confinement lié au Covid-19 et l'incendie de l'usine Lubrizol, mais aussi internes, avec toutes les erreurs et errances que l'on a du corriger lors du développement méthodologique du morphogranulomètre. Enfin j'ai dû faire face à des drames personnels, comme le décès de mon directeur de Thèse et de deux de mes grands-parents. Je n'aurais pu franchir ces difficultés sans l'aide des nombreuses personnes qui ont été impliquées dans ce projet et ces remerciements leur sont dédiés.

Tout d'abord je tiens à remercier les membres du jury, les rapporteurs **Hélène Celle-Jeanton** et **Valérie Plagne**, ainsi que les examinateurs **Olivier Evrard**, **Olivier Cerdan** et **Nicolas Masseï** pour avoir accepté d'examiner mes travaux. J'ai apprécié leur rigueur et la justesse dans leur remarque, leur analyse du manuscrit et de la présentation, ainsi que la curiosité dont ils ont fait preuve, ont alimenté une discussion fructueuse et stimulante.

Ce projet de thèse a été imaginé et lancé par mes directeurs de thèse **Matthieu Fournier** et **Jean-Paul Dupont**. Le décès de ce dernier lors de l'été 2018 nous a fortement touchés et plutôt que de mentionner ce que l'on a perdu avec son départ, je retiendrai ce qu'il a apporté, durant les 2 ans où j'ai eu la chance de le côtoyer. Ses conseils, ses digressions et ses critiques ont été d'une grande valeur, tant sur la thèse que sur mon travail en tant que scientifique dans sa globalité. Il m'a poussé à être le moteur de ma propre thèse et je l'en remercie avec émotion. Matthieu a été le second moteur de la réalisation de ces travaux. Sa présence, son dynamisme, son enthousiasme et sa créativité m'ont permis de garder courage dans les périodes d'errances, où rien ne semblait fonctionner. Beaucoup reste à faire sur ce projet et à la fin de cette thèse il lui appartient d'orienter la stratégie scientifique du morphogranulomètre. Je lui souhaite beaucoup de succès et le remercie d'en avoir fait partie. Notre chemin ne s'arrête certainement pas ici.

De nombreuses personnes du laboratoire M2C à Rouen ont eu un rôle déterminant dans l'orientation du projet de thèse. Je remercie **Yoann Copard** et **Maxime Debret** pour avoir participé aux nombreuses réunions de pilotage, et offert des retours formels et informels, parfois au détour d'un poster en colloque, mais toujours pertinents et incisifs. Toute la partie sur le site de Norville doit énormément aux techniciens **Michel Simon**, **Léo Chaumillon** et **Romain Levillant**. Grace à eux j'ai pu jongler entre laboratoire et terrain et gagner un temps précieux. Le tout avec leur bonne humeur et les délicieux sandwiches de la boulangerie de Notre-Dame-de-Bondeville. Ils sont des rouages indispensables à la réalisation des travaux scientifiques du laboratoire. Mes connaissances sur le karst de Normandie et ses cavités ne seraient pas ce qu'elles sont sans **Nicolas Lecoq**, je regrette de ne pas avoir eu le temps d'analyser tous les échantillons que l'on a pu récupérer aux Petites Dalles et à Caumont.

J'ai côtoyé nombre d'autres collègues au laboratoire M2C. Depuis mon premier jour au laboratoire et ce jusqu'à mon départ, j'ai grandement apprécié l'accueil, la gentillesse et la disponibilité des chercheurs comme des techniciens et je les remercie tous. **Robert Lafite** et **Nicolas Masseï** (que je remercie donc à nouveau) en ont incarné la direction et ont su donner ce ton convivial et bienveillant qui m'a permis de m'intégrer au laboratoire avec aisance.

Une bonne dynamique entre doctorants (et assimilés...) a bien entendu contribué à cette intégration : Bien entendu **Adeline**, dont les « râleries » bienvenues m'ont décroché un peu de mon écran, **Thomas** et **Ruth**, avec qui nous sommes tous entrés d'un même pas dans nos thèses. Et aussi tous le cortège du petit train de la place Colbert avec **Pierre** en tête, **Arnaud**, **Edouard**, **Aziz**, **Manu**, **Flavie**, **Marie**, **Guillaume**, **Edward**, etc. C'est avec le sourire aux lèvres que je me rappelle tous les bons moments passés ensemble.

De nombreuses collaborations ont également jalonné le parcours de ces travaux. Le laboratoire I2M de Bordeaux avec **Guillaume Lorette** et **Roland Lastennet** et leur stagiaire **Jonathan Sabidussi** ont été parmi les premiers à passer des échantillons de terrain avec nous sur le morphogranulomètre, et à en essayer les plâtres... De ce semi-échec, des relations amicales et des échanges durables en ont émergé. Je remercie également **Olivier Evrard** et **Virginie Sellier** qui nous ont également partagé leurs échantillons et leur problématique, qui ont été clefs dans l'aboutissement de la méthodologie de l'analyse des données morphogranulométriques. J'espère que nos résultats leurs seront aussi utiles que leurs échantillons et leur site d'étude nous l'ont été. Enfin, des remerciements à **Suez Environnement** pour nous avoir fait confiance pour l'étude des origines de la turbidité au captage de Gisors.

Avant de démarrer une thèse, il y a un cheminement, personnel comme professionnel. Je remercie **Sylvain Gigeux**, **Aurélien Villeneuve** et **Philippe Landrein** de l'Andra pour m'avoir donné envie de faire de la recherche et pour leur amitié durable.

Pour finir, une thèse s'écrit aussi à la maison, et la famille, au quotidien, se retrouve impliquée. Une chance alors pour moi de bénéficier d'un soutien inconditionnel de mes parents, frère et sœur. Jusqu'aux oncles, tantes et cousins, ma grande famille que j'adore, trop nombreux pour tous les mentionner mais qui malgré la distance ont chacun montré leur intérêt et leur soutien. De même pour ma belle-famille, tout aussi impliquée et qui, au fond de moi, compte autant que ma famille. Je souhaite placer un hommage à mon grand-père **Maurice** et ma grand-mère **Louissette** que j'aime profondément, et à mamie **Marie** et papi **Casi** que j'aime tout autant. Je n'oublie pas les copains, **Pierre**, **Guillaume** et **Victor**, ça y est je suis docteur en « cailloux dans l'eau ».

Mes derniers mots vont bien entendu à **Mathilde**, qui a subi sans broncher tout le stress et les petits drames que cette thèse a pu causer comme si elle l'avait écrite elle-même et que je remercie pour sa patience, son empathie et son implication. Notre histoire a commencé avec cette thèse mais continue bien après l'arrêt de cette dernière. Pour toujours, je l'espère.

# TABLE DES MATIERES

<b>Introduction</b>	<b>8</b>
<b>I. Le suivi sédimentaire source to sink</b>	<b>10</b>
<b>A. Méthodologie du traçage sédimentaire (sediment fingerprinting)</b>	<b>10</b>
1) Approches géochimiques	10
2) Approches physiques	12
<b>B. Récents développements, application de la morphométrie dans le fingerprinting et objectifs de travail</b>	<b>15</b>
1) Appareils à flux de particule dynamique : notre proposition	17
2) Paramètres descripteurs	19
<b>C. Analyses des données sédimentaires</b>	<b>23</b>
1) Analyses de la taille	23
2) Classification et analyses statistiques des paramètres	26
<b>II. Développement d'une méthodologie d'analyse morphométrique appliquée au suivi source to sink</b>	<b>30</b>
<b>A. Introduction</b>	<b>30</b>
<b>B. Spécifications Matérielles</b>	<b>31</b>
<b>C. Lots sédimentaires</b>	<b>31</b>
1) Echantillons de sable siliceux tamisés pour la calibration de la mesure de la taille :	32
2) Echantillons cohésifs de Norville, et du Pays blanc guérandais pour l'impact du séchage, du broyage et de la centrifugation :	32
3) Echantillons de nature et préparation unique pour la calibration de la mesure de la forme :	34
<b>D. Le morphogranulomètre mesure-t-il la taille avec précision ?</b>	<b>35</b>
<b>E. Quel est l'impact des différentes préparations sur la mesure de la taille et de la forme ?</b>	<b>38</b>
1) Broyage et séchage sur des échantillons cohésifs	38
2) Ultrasons sur un échantillon cohésif	42
3) Centrifugation de sédiments en suspension	45
<b>F. Est-ce que la forme discrimine des échantillons de nature et préparation uniques ?</b>	<b>47</b>
1) Identification de la nature des échantillons	47
2) Modèle prédictif de la nature des échantillons selon ses formes	56
3) Distributions morphométriques : choix de l'indice statistique de paramètre central	58
<b>G. Est-il possible de quantifier les proportions d'un mélange ?</b>	<b>61</b>
1) Sur toutes les particules	61
2) Sur les particules supérieures à 20 µm	64
3) Prédiction et quantification des sources Argile-Sable	67
<b>H. Protocole méthodologique de mesure</b>	<b>72</b>
<b>III. Suivi source to sink d'un bassin versant contrasté : cas de Thio</b>	<b>75</b>
<b>A. Introduction</b>	<b>75</b>
1) Contexte et Problématique	75
2) Echantillonnage et préparation	77
<b>B. Capacité de la granulométrie à l'identification de l'origine sédimentaire</b>	<b>78</b>

<b>C.</b>	<b>Apport de la morphogranulométrie à l'identification de l'origine sédimentaire</b>	<b>82</b>
1)	Distributions de fréquence	82
2)	Etude sur les médianes	86
3)	Facteurs combinés et modèle de mélange	92
<b>D.</b>	<b>Synthèse</b>	<b>97</b>
<b>IV.</b>	<b><i>Suivi source to sink surface-souterrain du transfert particulaire en contexte karstique : application au site de Norville</i></b>	<b>98</b>
<b>A.</b>	<b>Contexte et enjeux</b>	<b>98</b>
<b>B.</b>	<b>Analyse spatio-temporelle des sources sédimentaires du bassin versant</b>	<b>102</b>
1)	Discrimination des sources sédimentaires du bassin versant	102
2)	Source fingerprinting des matières en suspension	108
<b>C.</b>	<b>Analyse d'Archive sédimentaire : Carotte des sédiments de la source</b>	<b>122</b>
1)	Méthodologie	122
2)	Capacité de la granulométrie à identifier l'origine sédimentaire	123
3)	Apport de la morphogranulométrie à l'identification de l'origine sédimentaire	126
<b>D.</b>	<b>Etude des apports sédimentaires durant des évènements extrêmes</b>	<b>134</b>
1)	Simulation d'une crue par injection d'eau	134
2)	Suivi d'une crue hivernale	143
<b>E.</b>	<b>Synthèse de toutes les analyses morphogranulométriques du site</b>	<b>162</b>
<b>V.</b>	<b><i>Utilisation de la morphométrie pour l'identification de l'origine sédimentaire de la turbidité dans un forage d'alimentation en eau potable (exemple de la ville de Gisors)</i></b>	<b>165</b>
<b>A.</b>	<b>Contexte</b>	<b>165</b>
1)	Problématique	165
2)	Hydrodynamisme et échantillonnage	168
<b>B.</b>	<b>Utilisation de la granulométrie laser pour l'identification des populations sédimentaires</b>	<b>169</b>
<b>C.</b>	<b>Identification des différentes population par observation au Microscope Electronique à Balayage (MEB)</b>	<b>169</b>
<b>D.</b>	<b>Utilisation de la morphométrie pour l'identification des sources sédimentaire</b>	<b>170</b>
1)	Analyses des variations morphogranulométriques	170
2)	Analyses des sources sédimentaires	171
3)	Modèle des sources sédimentaires et prédiction	175
<b>E.</b>	<b>Synthèse de l'analyse des sédiments au forage d'alimentation en eau potable de la ville de Gisors</b>	<b>177</b>
	<b>Conclusion générale</b>	<b>179</b>
	<b>Références</b>	<b>182</b>
	<b>Table des illustrations</b>	<b>191</b>
	<b>Table des tableaux</b>	<b>198</b>
	<b>Annexe 1 : Résultats des tests d'indépendance de Kruskal-Wallis</b>	<b>201</b>
	<b>Annexe 2 : Résultats des tests de colinéarité</b>	<b>207</b>
	<b>Annexe 3 : Protocole d'utilisation du morphogranulomètre</b>	<b>208</b>



# A new methodological approach using grain shape as a tool for sediment source to sink transfer studies in watersheds

**Keywords:** morphometry, grain shape, grain size, source to sink, sediment fingerprinting, karst aquifer, hydrology, hydrogeology, suspended particles

## *Abstract:*

Source to sink is one of the main concepts in Earth Sciences for a better knowledge of hydrosystems dynamics. Regarding this issue, one challenge consists in the characterization by in-situ measurements of the sources of suspended sediment, or sediment source fingerprinting. Few methods can fully cover such requirements and among them, the methodology using the grain shape deserves to be developed.

Indeed, morphometry of particles is widely used in sedimentology to identify different sedimentary stocks, source-to-sink transport and sedimentation mechanisms. Currently, most grain shape analyses are carried out with a scanning electron microscope coupled to image analysis to measure various size and shape descriptors on particles like elongation, circularity, bluntness or fractal dimension. However, complexity and time of analysis are the main limitations of this technique for a long-term monitoring of SPM transfers.

Here we present an experimental morphometric approach using a morphogranulometer (a CCD camera coupled to a peristaltic pump). The camera takes pictures while the sample is circulating through a flow cell, leading to the analysis of numerous particles in a short time. The image analysis provides size and shape information discriminating various particles stocks by statistical analyses.

The aim of this thesis is (1) to calibrate the device and understand how the size and shape data can discriminate pure sediment samples; (2) use those results to evaluate the contribution of contrasted sedimentary sources in a mix; (3) to establish a measurement and data analysis protocol; and (4) use those protocol and methodology for several case studies of sediment transfers in various hydrosystems.

The first case study presented concern the watershed of the Thio river, on which there is mining activity. A sediment fingerprinting study using size and shape characterization was carried on. The sediment sources of the different tributaries of the Thio river were analyzed as sources and the sediments of the main river itself were used as mixes of these sources. A model of the contributions of the sources in the mixes was achieved and its results show great coherence. It brings information on the transfers of the sediments between the different tributaries and the Thio river which will be later combined to other studies using different fingerprinting methods to evaluate the impact of the mining activity in these transfers.

The second study focus on the karstic watershed of the Hannetot spring. Measurements were carried out on various field samples, from suspended sediments to core samples. Several experiments allowed to identify the varying contributions of different sediment sources through time. Several proxies were identified, seasonal and meteorological, as controlling factor for these variations.

The last study is also a fingerprinting study of a karstic system. Its aim is to evaluate the origin of sediment sampled during turbidity peaks in the drinking water well of the town of Gisors. The source contribution model identified several potential sources of sediments and shows the increased contributions of certain sources during the flood period.

All those studies shows that size and shape measured with the morphogranulometer are a good tracer for fingerprinting studies. They also demonstrate that this technique performs better in combination to other methods and brings the need to carry more studies combining morphogranulometry with several other fingerprinting techniques.

**Mots clefs : morphométrie, forme des particules, granulométrie, source to sink, traçage sédimentaire, aquifère karstique, hydrologie, hydrogéologie, matière en suspension**

*Résumé :*

De nos jours, la compréhension des transferts de particules sédimentaires (Source to Sink) est un enjeu clef des géosciences. Un des challenges dans ce domaine est la caractérisation de l'origine et des processus de transfert des particules. L'utilisation de la morphométrie (la mesure de la forme d'une particule) est une méthodologie pouvant apporter des réponses à ces questions.

La morphométrie des particules est utilisée en sédimentologie pour identifier les différents stocks sédimentaires, les transferts et les mécanismes de sédimentation. Actuellement, beaucoup d'analyses morphométriques sont généralement réalisées avec un Microscope Électronique à Balayage (MEB) couplé à une analyse d'image. Cette dernière consiste en un programme informatique qui distingue les particules de leur arrière-plan et calcule leur forme suivant différents paramètres tel que l'élongation, la circularité ou la convexité. Cette méthode complexe demande beaucoup de temps.

Une nouvelle méthodologie est présentée dans cette thèse utilisant l'approche morphométrique grâce à un appareil de mesure en continue à flux dynamique (caméra couplée à une pompe péristaltique). Ce dernier consiste à prendre des images alors qu'un échantillon d'eau circule à travers une fenêtre d'écoulement, permettant à l'utilisateur d'analyser de grandes quantités de particules en un temps réduit. Des analyses statistiques sont réalisées sur les paramètres de forme, calculés au préalable par analyse d'image, afin de discriminer les différents stocks de particules.

La problématique de ces travaux de thèse est de savoir si la morphométrie peut constituer un proxy du transfert particulaire dans les bassins versants. Pour cela, une approche en 4 étapes a été entreprise afin de (1) vérifier si les données de taille et de forme peuvent discriminer des échantillons de sédiments ; (2) utiliser ces résultats pour évaluer la contribution de sources sédimentaires dans des mélanges expérimentaux contrôlés ; (3) établir un protocole de mesure et de traitement automatisé des données sédimentaires ; et (4) appliquer cela à plusieurs hydrosystèmes.

La première étude est réalisée sur le bassin versant du fleuve Thio, sur lequel une activité minière est présente. Des mesures de taille et de forme ont été effectuées sur des sédiments de laisses de crue afin d'estimer la part de cette activité minière dans les stocks sédimentaires du fleuve et de ses affluents. Un modèle de contribution des sources (les affluents) dans les mélanges (le fleuve) a été établi et montre des résultats cohérents. Ces résultats apportent des informations sur les transferts sédimentaires entre les affluents et le fleuve Thio qui seront comparées à d'autres études utilisant des méthodes de traçage sédimentaires différentes. La seconde étude se concentre sur le bassin versant karstique de la source du Hannetot. Des carottes sédimentaires ainsi que les matières en suspension ont été étudiés sur différents points du bassin versant. Les différents tests réalisés montrent des variations dans les contributions des sources sédimentaires dans le temps. Différents proxies saisonniers et météorologiques contrôlant ces variations ont été identifiés. La dernière étude est un cas appliqué au forage d'alimentation en eau potable de la ville de Gisors pompant dans un aquifère karstique. Son but est d'identifier l'origine des sédiments provoquant des pics de turbidité lors de fortes précipitations. Le modèle de contribution des sources isole plusieurs sources potentielles et montre une augmentation dans les contributions de certaines lors des pics de turbidité.

Toutes ces études montrent l'intérêt de la morphogranulométrie en tant que traceur sédimentaire. Elles démontrent également que cette technique est d'autant plus intéressante lorsqu'elle est en combinaison avec d'autres méthodes de traçage sédimentaire.

# INTRODUCTION

---

Un sédiment est composé d'une multitude de particules formées par des processus d'altération chimique, physique, biologique et biochimique des roches. Elles peuvent être laissées sur place et/ou transportées depuis des environnements sources jusqu'aux environnements puits en subissant possiblement de nombreux processus de remaniement. On les différencie des roches sédimentaires qui constituent une accumulation à l'échelle géologique de ces éléments détritiques et/ou biologiques et/ou biochimiques de diverses origines et subissant une compaction et une potentielle cimentation diagénétique (Cojan and Renard, 2013). Les processus d'érosion, de transport et de dépôt des sédiments sont observables sur des périodes de temps parfois très courtes, de quelques années à quelques jours lors d'événements de crue.

Dans ces processus d'altération puis de transport et dépôt, l'eau joue un rôle majeur, puisque l'érosion par l'eau affecterait 1094 millions d'hectares de sol à l'échelle mondiale (Lal, 2003), environ deux fois plus que l'action du vent. Dans l'histoire de l'humanité, le déplacement de sédiments par l'eau est à l'origine des vallées fertiles du Nil, du Yang-Tsé ou de l'Euphrate, parmi bien d'autres qui ont contribué à la naissance de nombreuses civilisations. Mais également, par extension, les perturbations apportées par ces déplacements ont également impacté négativement les sociétés humaines depuis l'antiquité (Brown, 1984, 1981; Olson, 1981). Par exemple, l'abandon de la ville de Pi-Ramsès se serait produit à la suite de l'ensablement progressif d'un bras du Nil à la fin de la XX<sup>ème</sup> dynastie égyptienne (Agut and Moreno García, 2016). De nos jours, le transport de sédiments dans les rivières jusqu'aux océans est estimé de quelques dizaines à plusieurs milliers de tonnes par kilomètre carrés en un an (Milliman and Meade, 1983). Ce flux impacte l'écologie (Acornley and Sear, 1999; Newcombe and Jensen, 1996) et les activités humaines (McCully, 2001; Sundborg et al., 1982; Wang et al., 2005). Ces sédiments sont notamment de potentiels véhicules pour de nombreux contaminants : les métaux lourds vont s'adsorber aux particules en suspension (Kronvang et al., 2003) et les films bactériens vont s'y accrocher (Dussart et al., 2001).

L'érosion des sols et sédiments dans les bassins versants, leur transport et leur dépôt constituent donc un problème sociétal qui préoccupe les gestionnaires des terres et de l'eau tout autour du monde. Ces processus d'érosion, transport et dépôt sont complexes et constituent l'essentiel des transferts de matière de surface continentale vers les océans (Lal, 2003).

Les facteurs contrôlant l'érosion, le transport et le dépôt des sédiments sont multiples : la nature de la roche érodée, le processus d'érosion (dissolution chimique, altération physique, etc), le temps et l'environnement de transport et de dépôts. Le sédiment va donc être modifié dans ses propriétés physique et chimique au fur et à mesure qu'il va être soumis à ces processus. L'analyse des sédiments afin de reconstruire leur histoire constitue donc un enjeu clef pour comprendre, surveiller et contrôler les transferts sédimentaires.

Les environnements de dépôts en milieu aqueux sont multiples (Cojan and Renard, 2013). Dans un environnement lacustre les conditions hydrodynamiques calmes vont permettre aux particules les plus fines de se décanter et des alternances saisonnières pourront affecter la nature des sédiments. Au contraire, en environnement fluvial, la grande variabilité spatiale de la dynamique va créer différentes zones de transport et de dépôt avec l'apparition de méandres, de bancs de cailloux et de chenaux. L'eau peut également emprunter un chemin souterrain et être associée à des transferts sédimentaires importants. Les karsts et leurs réseaux de conduits parfois décamétriques offrent des zones de dépôt et de resuspension complexes à étudier. La connaissance de ces derniers, de par les réserves en eau douce que les aquifères karstiques représentent, est un important enjeu sociétal.

Le suivi des transferts de sédiments par la communauté scientifique a été particulièrement notable ces dernières décennies. Différentes méthodes ont été développées pour, entre autre, analyser les sources de sédiments dans les hydrosystèmes et quantifier leurs transferts, pour déterminer les différentes causes et forçages des processus d'érosion, de transport et de dépôt.

Parmi celles-ci, les méthodes de « sediment fingerprinting » ont émergé ces 30 dernières années (Collins et al., 2001; Evrard et al., 2010; Krein et al., 2003; Lamba et al., 2015; Martínez-Carreras et al., 2010; Motha et al., 2004; Walling and Woodward, 1992). Cela consiste en un traçage de la signature des différentes sources sédimentaires afin d'étudier et quantifier les transferts des sédiments depuis leur origine (Figure 1).

Les différentes méthodes de « fingerprinting » varient en fonction du paramètre utilisé pour tracer la source sédimentaire (Collins et al., 2017; Haddadchi et al., 2013). Ces paramètres peuvent être liés à une (ou plusieurs) caractéristique(s) physiques ou biogéochimiques des sédiments que l'on va rechercher et comparer dans les bassins versants en différents points d'échantillonnage selon des gradients amont-aval. Les sédiments aval sont constitués d'un mélange de sédiments sources et donc des différents paramètres qui les caractérisent qu'il convient de déconvoluer.

Ces méthodes ont toutefois des limites et des verrous scientifiques (Smith et al., 2015). La sélection des sources peut influencer grandement dans les résultats, et un prélèvement non exhaustif peut biaiser les résultats. Les paramètres choisis peuvent également induire des biais, ils doivent être conservatifs et montrer des contrastes suffisants entre les différentes sources pour pouvoir les signer (Haddadchi et al., 2014; Sherriff et al., 2015; Smith et al., 2015). Selon le contexte, la conservation et la capacité à signer une source peuvent varier. Une solution peut être d'augmenter le nombre de paramètres afin de réduire l'influence des paramètres biaisés (Sherriff et al., 2015). Selon les paramètres, la signature va marquer différents processus (transport, nature ou origine du sédiment, environnement de dépôts, etc). C'est pourquoi un grand nombre de paramètres existent à ce jour.

Le développement de nouveaux traceurs et leur amélioration est donc clef pour la caractérisation de l'origine et des processus de transfert des particules. Ces travaux visent à développer une méthode basée sur la mesure de la forme des particules sédimentaires comme traceur.

Pour cela, une approche en 4 étapes a été entreprise afin de (1) vérifier si les données de taille et de forme peuvent discriminer des échantillons de sédiments ; (2) utiliser ces résultats pour évaluer la contribution de sources sédimentaires dans des mélanges expérimentaux contrôlés ; (3) établir un protocole de mesure et de traitement automatisé des données sédimentaires ; et (4) appliquer cela à plusieurs hydrosystèmes.

# I. LE SUIVI SEDIMENTAIRE SOURCE TO SINK

## A. METHODOLOGIE DU TRAÇAGE SEDIMENTAIRE (SEDIMENT FINGERPRINTING)

Une liste exhaustive des paramètres servant à tracer les sources serait longue : magnétisme (Gruszowski et al., 2003; Motha et al., 2004; Russell et al., 2001), géochimie (Carter et al., 2003; Collins et al., 1997a, 2012; Fournier et al., 2009; Theuring et al., 2015), géochimie des radionucléides naturels et artificiels (Du and Walling, 2016; Evrard et al., 2013; Le Gall et al., 2016), couleur du sédiment (Debret et al., 2011; Krein et al., 2003; Martínez-Carreras et al., 2010; Poulenard et al., 2009; Van Exem et al., 2019), granulométrie (Dupont and Lafite, 1986; Fournier et al., 2008; Krein et al., 2003; Lacroix et al., 2000), matière organique (Copard et al., 2018), etc. Il est communément admis que l'étude d'un seul de ces paramètres n'est pas suffisante pour caractériser les transferts de sédiments mais qu'une combinaison de traceurs permet de distinguer les sources de sédiments de manière satisfaisante (Collins and Walling, 2002; Walling et al., 1993). Une description non-exhaustive des méthodes les plus communes est présentée ci-après. De nombreuses autres méthodes sont utilisés et décrites dans la littérature (Collins and Walling, 2002; Davis and Fox, 2009; Walling, 2013).

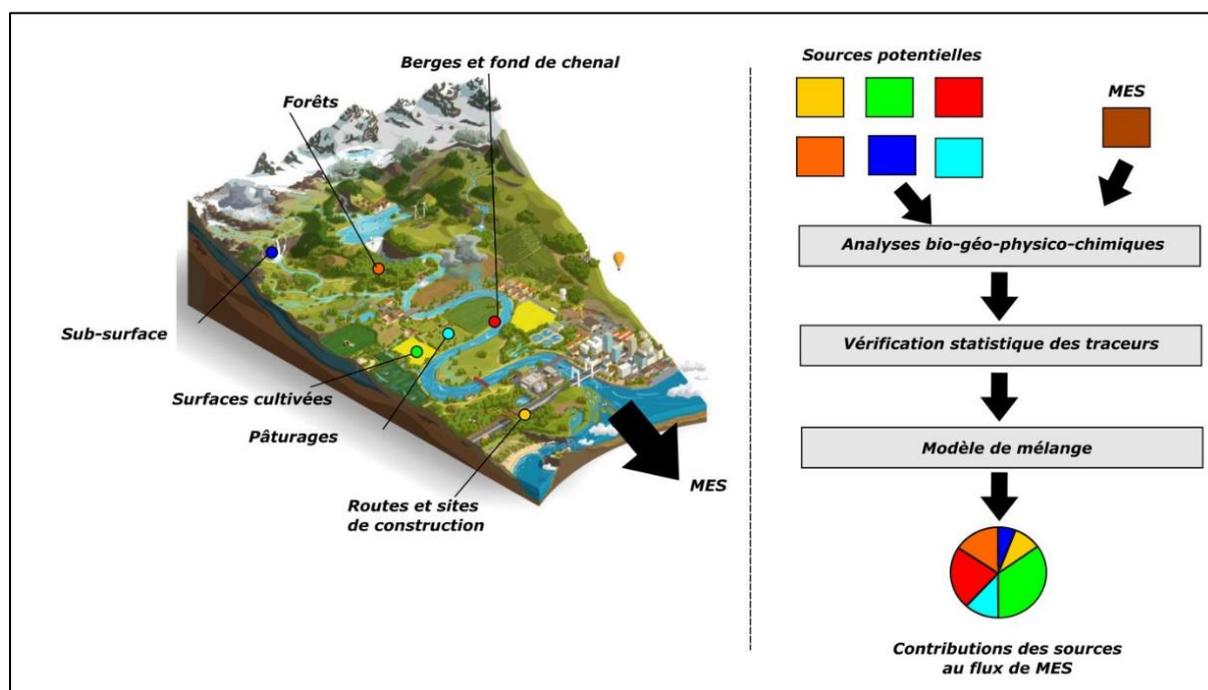


Figure 1 : Schéma résumant les techniques de «sediment fingerprinting» (traçage sédimentaire) dans les Matières En Suspension (MES) des systèmes fluviaux (modifié par (Patault, 2018), d'après(Haddadchi et al., 2013)). Les sources présentées sont des exemples parmi de multiples possibilités inhérentes au bassin versant étudié

### 1) Approches géochimiques

#### a) Analyses géochimiques des éléments

L'analyse géochimique cherche à identifier la nature du sédiment par sa concentrations en éléments chimiques. Elle inclut parfois l'analyse isotopique de ces éléments I.A.1)b). Lorsque les sources sédimentaires ont des natures géologiques contrastées, il est possible de retrouver ces natures en fonction des éléments chimiques caractéristiques (Carter et al., 2003; Collins et al., 1997a, 2012;

Theuring et al., 2015). La chimie n'est pas uniquement affectée par la géologie mais également par la biologie et l'activité anthropique (occupation des sols, activité industrielle, etc (Carter et al., 2003)).

Par exemple, Collins et al. (1997a) mesurent les concentrations en métaux lourds (Cu, Zn, Pb, Cr, Ni, Co) et traces (Fe, Mn, Al) ainsi que les cations (Na, Mg, Ca, K) dans des dépôts de plaine alluviale pour retracer l'historique des apports sédimentaires de différents affluents possédant une couverture géologie contrastée. Avec un modèle de mélange, ils arrivent à identifier une perturbation dans les apports relativement constants de chaque source et à relier cette perturbation à un évènement climatique extrême s'étant déroulé à la même période.

Carter et al. (Carter et al., 2003) mesurent les concentrations géochimiques des éléments les plus communs (N, C, As, Pb, Zn, Cr, K, Ca, Mn, Mg, Na, Cu, Al, Fe, P) sur les sédiments en suspension d'un cours d'eau urbain au Royaume-Uni. A partir d'un modèle de mélange entre ces éléments, l'étude retrace les contributions en sédiment de deux zones à la géologie contrastée, mais aussi les origines de l'érosion (surface cultivée, poussière de chemins, paroi de chenal du cours d'eau, etc).

A travers ces deux exemples on observe que la géochimie permet de mesurer un jeu de variables permettant dans de nombreux cas d'identifier un ou plusieurs paramètres montrant une signature unique pour chaque source potentielle. Une fois ces signatures identifiées, un modèle de mélange permet de déterminer les proportions de chaque source au sein des échantillons aval où ces sources sont mélangées. Cette méthode reste limitée dans le sens où la géochimie n'est parfois pas toujours suffisamment contrastée pour différencier les sources. De plus, la chimie d'un cours d'eau (en particuliers les ions majeurs) peut varier de l'amont à l'aval, et la diagénèse influe également sur la chimie d'un dépôt alluvial (Collins et al., 1997a). Une partie des traceurs peuvent ne pas être conservatifs dans ces contextes.

#### *b) Analyses chimique des isotopes*

L'analyse des radionucléides des sédiments est une méthode qui consiste à analyser des isotopes radioactifs, d'origine cosmogonique ( $^7\text{Be}$  et  $^{210}\text{Pb}$ ) ou provenant de tests et accidents nucléaires ( $^{137}\text{Cs}$ ) (Bonniwell et al., 1999), en tant que traceurs de l'origine des sédiments. Ces radionucléides ont une forte tendance à s'adsorber aux particules sédimentaires (Hawley et al., 1986). Selon sa demi-vie, le radionucléide va décroître à différente vitesse. L'activité de certains éléments comme le  $^7\text{Be}$  diminue très vite par rapport au temps de résidence d'un sédiment au fond de la rivière, alors que le  $^{210}\text{Pb}$  décroît beaucoup plus lentement.

Une grande variété de radionucléides est utilisée dans de nombreuses études en fonction du contexte, Olley et al. 1993 utilisent le rapport  $^{226}\text{Ra}/^{232}\text{Th}$  pour tracer les sources dans un cours d'eau raviné en Australie, tandis que Le Gall et al. 2016 se servent du rapport  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  pour tracer les différentes sources lithologiques et de surfaces d'un bassin agricole en France. Dominik, Burrus, et Vernet 1987 ; Bonniwell, Matisoff, et Whiting 1999 et Le Cloarec et al. 2007 ont proposé différents modèles permettant d'estimer les temps de résidence et de transport des sédiments fluviaux à partir de ces éléments dans différents contextes. Lorsque plusieurs sources ont des temps de résidence contrastés, il est possible de les discriminer avec les radionucléides (Evrard et al., 2010).

#### *c) Matière Organique*

La Matière Organique (MO) est synthétisée par des organismes vivants et conserve des traces de son origine même après avoir subi des processus de transports et dépôts (Meyers and Ishiwatari, 1993). La MO est donc utilisée pour étudié les interactions et processus des sédiments qu'elle compose (Meyers, 2003).

Différentes variables peuvent être tracées par l'étude de la MO, la MO aquatique peut par exemple marquer l'intensité des apports de phosphore dissout (Amann et al., 2014), la remobilisation de nutriments (Danger et al., 2012; Essington and Carpenter, 2000) ou les régimes de précipitations (Saunders et al., 2012). La MO détritique marque les processus actifs du bassin versant, notamment l'érosion (Schmid et al., 2016; Tyler et al., 2010) en la distinguant selon son origine : géologique, pédologique ou carbonisée.

## 2) Approches physiques

### a) *Colorimétrie*

La couleur est un paramètre physique utilisé pour caractériser les roches et les sols depuis le siècle dernier avec une estimation visuelle par le biais de différentes chartes de couleurs (Folk, 1969; Munsell, 1905). Elle est généralement liée à la nature du sédiment.

Le traçage des sources sédimentaires avec cette méthode n'est pas récente (Grimshaw and Lewin, 1980; Phillips and Marion, 2001) mais l'utilisation d'appareil de mesure de spectrométrie a permis de réduire le biais de l'expérimentateur (Post et al., 1993) et de mesurer la couleur de manière quantitative (Debret et al., 2011; Martínez-Carreras et al., 2010; Udelhoven and Symader, 1995; Van Exem et al., 2019). L'usage d'appareils récents avec la méthodologie des modèles de mélange classiquement utilisée a permis de réaliser une analyse de traçage sédimentaire fiable avec un coût et un temps d'analyse réduits comparés aux analyses géochimiques et isotopiques (Legout et al., 2013; Martínez-Carreras et al., 2010; Tiecher et al., 2015).

### b) *Mesure de la taille des particules (granulométrie)*

Tout comme la couleur, la mesure de la taille d'une particule de sédiment est un paramètre physique mesuré et analysé par les sédimentologues depuis le siècle dernier (Cailleux, 1943; Hjulström, 1935; Passega, 1957). Elle est liée à la source et à la nature du sédiment (Li et al., 2013), mais elle est également affectée par son transport et son environnement de dépôt. Hjulström (Hjulström, 1935) par exemple a mis en relation la taille des sédiments présents dans les environnements de dépôt et l'énergie hydrodynamique nécessaire pour permettre leur transport et dépôt (Figure 2). Passega (Passega, 1957) a caractérisé, à partir de la médiane et du premier percentile des distributions granulométriques des sédiments fluviaux, les mécanismes de transport ayant permis les dépôts sédimentaires (Figure 3). Dans un contexte où les tailles de deux sources sédimentaires sont contrastées, la granulométrie peut être utilisée pour caractériser l'origine du sédiment, mais puisqu'elle peut être affectée par l'action du transport, ce paramètre n'est pas toujours conservatif.

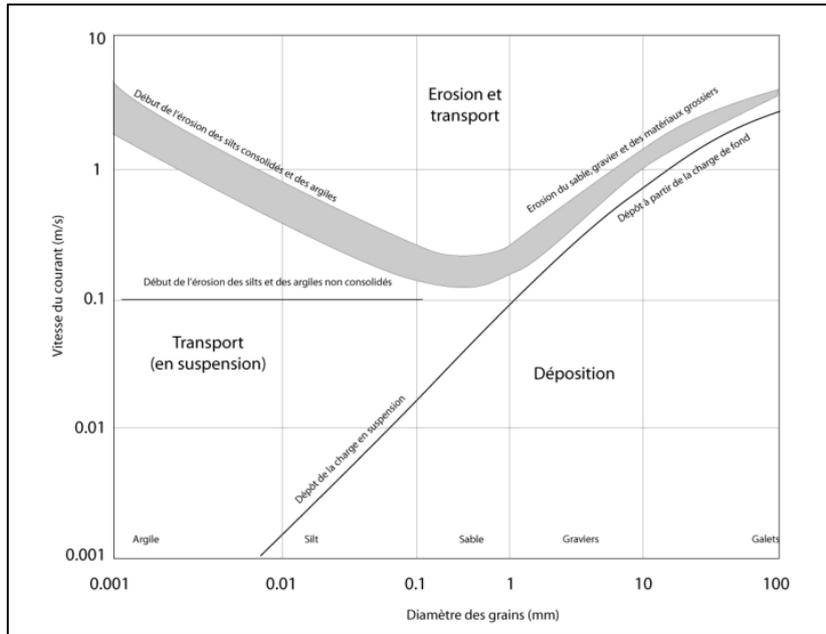


Figure 2: diagramme de Hjulström. Relation entre la taille du grain, la vitesse de flux et le type de mouvement sédimentaire (Hjulström, 1935)

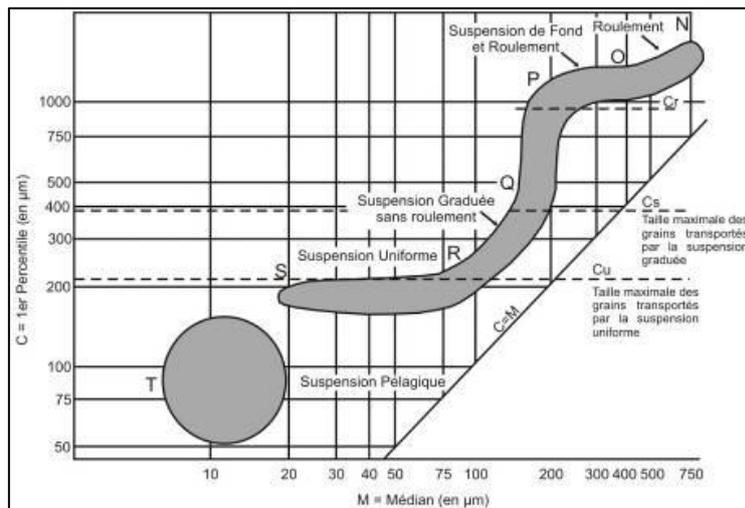


Figure 3: diagramme CM à partir duquel on peut déduire les mécanismes de transport pour des sédiments fluviaux (Passega, 1957)

Mais la mesure de la taille des particules est également utilisée dans les méthodes de fingerprinting car c'est un paramètre clef nécessaire pour l'analyse des données des études géochimiques. En effet, la taille des particules influence les propriétés chimiques (Horowitz, 1991; Stone and English, 1993), la concentration en radionucléide (He and Walling, 1996) et les propriétés magnétiques des minéraux (Foster et al., 1998). Lorsque les distributions de taille des particules sont très contrastées entre les différents échantillons, il est nécessaire de corriger les données en fonction de ces variations afin d'avoir un modèle de mélange linéaire sans biais (Russell et al., 2001; Walling et al., 1999).

Définir la taille des particules dans un sédiment peut se révéler complexe. Entre les diamètres, la longueur et la largeur, il y a de nombreuses manières de la quantifier. De nombreuses méthodes sont disponibles mais privilégient en général un seul aspect de la géométrie de la particule.

On peut classer les méthodes courantes de mesure de la taille d'une particule selon leur gamme de tailles mesurées (Figure 4). On peut considérer que la taille des sédiments présents en suspension dans les hydrosystèmes varie entre moins d'1 µm (argiles/colloïdes, Figure 5) et quelques centimètres (graviers).

gamme de taille	100 nm	1 µm	10 µm	100µm	1 mm	10 mm	plusieurs cm
tamissage							
diffraction laser							
compteur de particule							
analyse d'image							

Figure 4: gammes de tailles mesurables par les méthodes granulométriques courantes (Malvern Instruments, 2015)

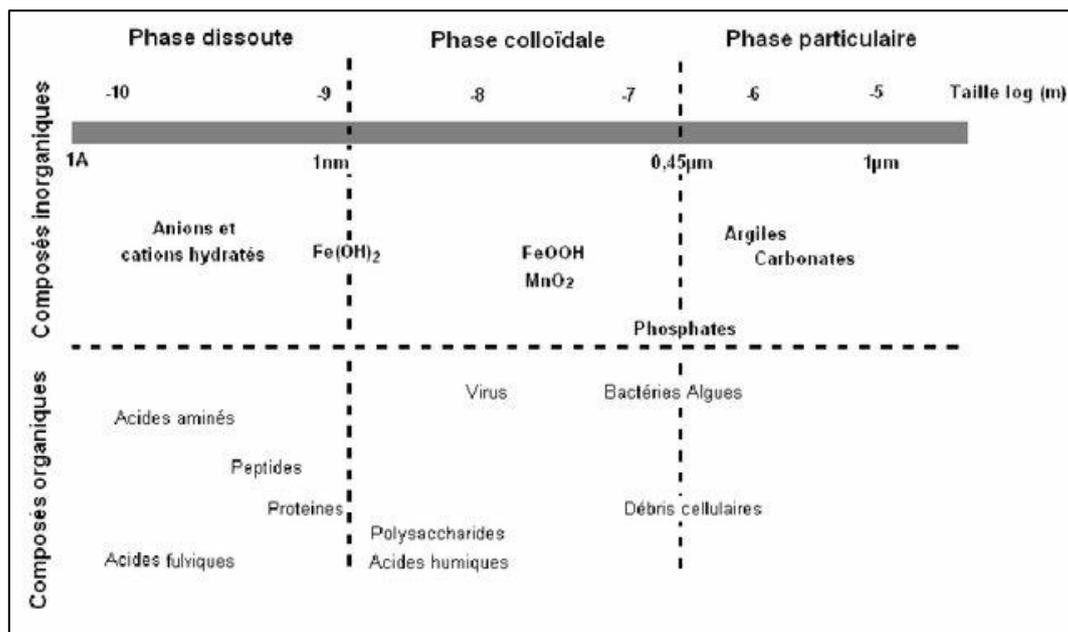


Figure 5: schéma représentant la limite inférieure de la phase particulaire dans les hydrosystèmes (Buffle and Leeuwen, 1992)

On peut également comparer ces méthodes suivant leur précision, leur vitesse de mesure, la préparation d'échantillon, etc (Tableau 1).

Tableau 1 : comparaison des différentes méthodes granulométriques courantes (Malvern Instruments, 2015)

technique	size	shape	dynamic range	speed	resolution	wet	dry
laser diffraction	0		000	000	00	0	0
compteur à variation d'impédance	0		00	000	000	0	
analyse d'image	0	0	00	000	000	0	0
tamissage	0		0	0	0	0	0

On constate donc que toutes ces techniques ont une utilité en fonction du contexte dans lequel on souhaite mesurer la taille du sédiment et quel aspect de la mesure on souhaite privilégier (rapidité, résolution, gamme de mesure, etc). On observe également qu'une de ces méthodes permet de mesurer une grandeur supplémentaire : la forme.

### *c) Morphométrie des particules sédimentaires*

Comme la taille, la forme est un paramètre physique lié à l'origine, la nature, le transport et l'environnement de dépôts du sédiment. Elle est utilisée pour comprendre ces phénomènes depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle (Cox, 1927; Helland et al., 1997 ; Kennedy and Ehrlich, 1985 ; Mazzullo et al., 1982 ; Velichko and Timireva, 1995) et fait toujours l'objet d'études récentes (Barclay and Buckingham, 2009; Eggers and Ehrlich, 2006; Kapui et al., 2018; Krein et al., 2003).

Par exemple Eggers et Ehrlich 2006 utilisent la forme pour analyser la provenance de sables fins des intervalles glaciaires et interglaciaires de l'Atlantique Nord. Ils identifient trois sources : (1) grains émoussés, très altérés ; (2) grains intermédiaires, anguleux, transportés par les glaciers et (3) grains irréguliers avec des surcroissances siliceuses d'origine sous-marine. En calculant la proportion des grains de chaque groupe dans les échantillons, ils peuvent retracer les dynamiques sédimentaires entre les périodes glaciaires et interglaciaires.

La limite principale pour cette méthode est leur temps d'analyse. Pour un échantillon naturel composé de plusieurs sources hétérogènes, le temps nécessaire pour avoir un nombre de particules mesurées statistiquement représentatif est très élevé. De plus, pour les particules fines, l'utilisation d'appareil de microscopie tel que le MEB implique un temps de préparation additionnel et des coûts d'analyse et de consommables importants.

## **B. RECENTS DEVELOPPEMENTS, APPLICATION DE LA MORPHOMETRIE DANS LE FINGERPRINTING ET OBJECTIFS DE TRAVAIL**

La mesure de la forme des particules submillimétriques a débuté avec la démocratisation de la microscopie optique. Elle s'effectuait visuellement par l'opérateur à partir d'une charte visuelle (Krumbein, 1941; Rodriguez et al., 2013; Sochan et al., 2015; Tafesse et al., 2013), par exemple la charte de Krumbein (Figure 6) ou par mesures manuelles (Bagheri et al., 2014; Krumbein, 1941; Rodriguez et al., 2013). Puis, avec les avancées technologiques, l'analyse d'images de particules numérisées par des logiciels a émergé. Cela a permis d'automatiser la mesure, et donc d'augmenter la représentativité statistique et d'éliminer les biais liés à la subjectivité de l'opérateur, ainsi que de mesurer des particules de plus en plus petites. Ce que l'on appelle « analyse d'image » (Image Analysis) consiste en la prise d'images des particules composant un échantillon de sédiments et le calcul par un logiciel de leur taille et de leur forme sous la forme de multiples paramètres mathématiques. Ces paramètres sont calculés à partir du contour en pixels défini par un réglage de niveaux de gris par l'opérateur.

Les limitations de l'analyse d'image proviennent principalement de la résolution de l'image (Pirard et al., 2005), plus le nombre de pixels sera grand, plus la mesure sera précise et pourra mesurer les particules de petites tailles. Mais en augmentant le zoom afin d'avoir une meilleure qualité, on réduit la taille de l'image et donc le nombre de particules présentes sur l'image.

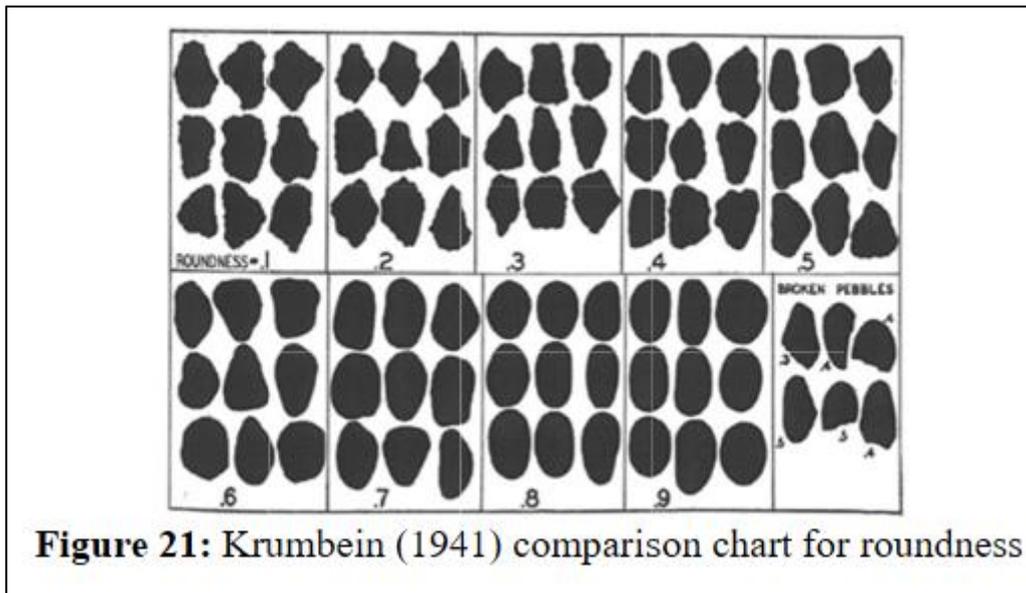


Figure 6 : charte de Krumbein (Krumbein, 1941)

L'observation de particules par microscopie commence à se répandre (Fournier, 2012; Podczec, 1997; Rinne, 2015; Rodriguez et al., 2013; Sochan et al., 2015). Les appareils modernes comprennent une caméra directement montée sur microscope, le tout relié à un ordinateur avec un logiciel permettant d'observer les images et de calculer les paramètres de taille et de forme. Pour des particules de tailles plus importantes, certains utilisent un simple appareil photo (Arasan et al., 2011; Tafesse et al., 2013) voire un scanner numérique (Đuriš et al., 2016).

Pour les particules les plus fines, un certain nombre d'études utilise l'analyse d'image avec un microscope électronique à balayage (Bagheri et al., 2014; Coulon et al., 2015; Ilic et al., 2015; Leibrandt et al., 2015; Liu et al., 2015; M. Mosquera-Fernández et al., 2016). Cette technique permet d'avoir une reconstruction détaillée haute résolution en 3D de chaque particule.

Le principal inconvénient de ces techniques d'observation des particules « statiques » est leur temps d'analyse. Pour un échantillon naturel le temps nécessaire pour avoir un nombre de particules mesurées statistiquement représentatif serait beaucoup trop élevé. De plus, pour les particules fines, l'utilisation d'appareil de microscopie tel que le MEB implique un temps de préparation additionnel et des coûts d'analyse et de consommables importants.

Comme mentionné précédemment, il est nécessaire d'avoir un nombre de particules mesurées très élevé pour avoir une bonne représentativité statistique des résultats. De manière générale, plus le nombre de particules mesurées est élevé, plus la fiabilité des mesures augmente. La norme ISO13322-1 (ISO, 2004) propose, pour une distribution de taille de particule log-normale, un nombre minimum de particules mesurées  $N$  :

$$\log N = -2 \log \delta + K$$

Où  $\delta$  est l'erreur relative et  $K$  une constante déterminée par la limite de confiance, la distribution et d'autres paramètres.

Néanmoins, Bodycomb (Bodycomb, 2013) constate que les recommandations de la norme présentent des limites lorsqu'appliquées aux résultats de ses analyses. Il préconise de mesurer soi-même la dérive causée par un trop petit nombre de particules mesurées en répétant plusieurs fois la même analyse pour différents volumes de particules (Figure 7). Il constate que pour avoir des

données fiables, il est possible d'utiliser pour une première approche la valeur empirique d'au moins 1500 particules minimum par analyse. L'analyse d'image avec un appareil à flux dynamique de particules permet de mesurer de tels quantités aisément contrairement aux autres méthodes (MEB et observations par microscopie de particules immobiles), ce qui en fait une méthode à privilégier pour l'analyse d'image.

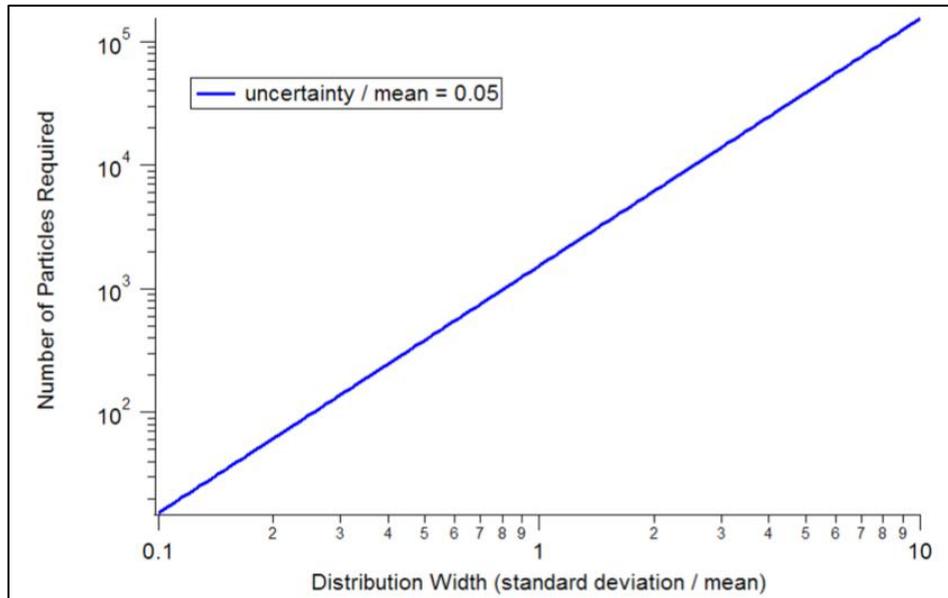


Figure 7 : Exemple de courbe estimant le nombre de particules nécessaires en fonction de la distribution des tailles de particules d'un échantillon (Bodycomb, 2013)

### 1) Appareils à flux de particule dynamique : notre proposition

Les améliorations dans l'imagerie (caméras, capteurs optiques, lentilles, vitesse d'obturation, etc) et les capacités de traitement des logiciels ont permis l'émergence d'appareils de mesure capables de capturer des images de particules de l'ordre du micron circulant dans un flux. Ces méthodes permettent de mesurer un grand nombre de particules sur un temps relativement faible ce qui permet d'avoir une bonne représentativité statistique sur un échantillon (Bodycomb, 2013). Les instruments utilisés se différencient principalement par le vecteur entrainant le flux de particules.

L'analyse dynamique d'image de particules par vecteur sec consiste simplement à séparer les particules par vibration puis à les faire chuter par gravité devant le champ de la caméra (Figure 8).

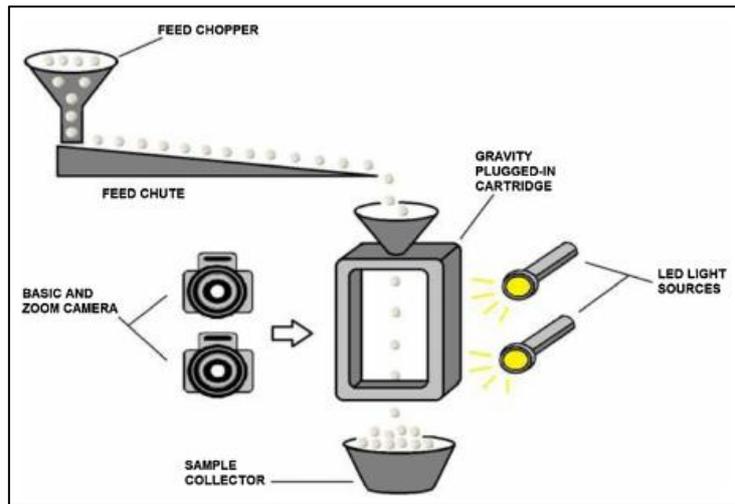


Figure 8 : Schéma de principe d'un analyseur dynamique d'image de particule par vecteur sec (Czajkowska et al., 2015)

L'autre type d'analyse dynamique d'image de particule se réalise en vecteur liquide (Figure 9). Cette méthode consiste à faire passer les particules en suspension (généralement dans l'eau) dans une cellule entre une caméra et une source de lumière.

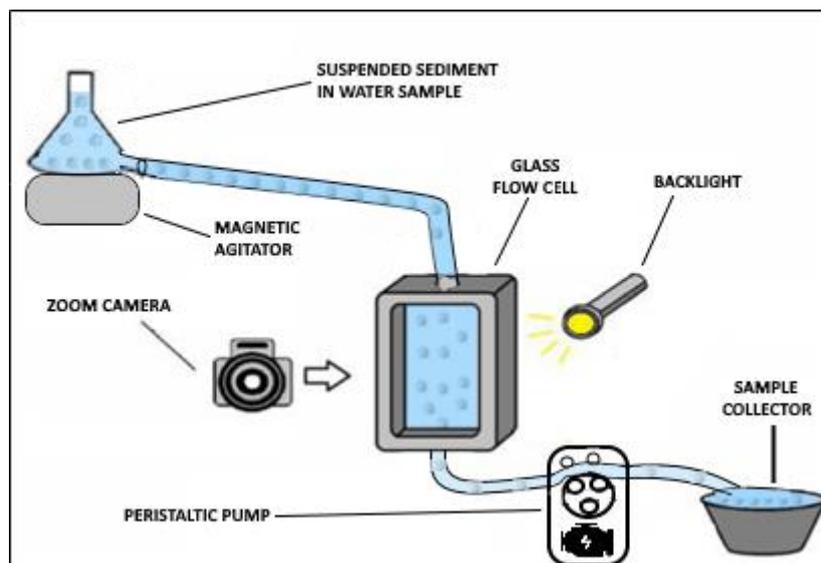


Figure 9 : Schéma de principe d'un analyseur dynamique d'image de particule par vecteur liquide

Ces techniques présentent plusieurs avantages : (1) elles sont non destructrices ; (2) elles permettent de mesurer un très grand nombre de particules (plus de 100 000 grains) en quelques minutes, la mesure est donc statistiquement représentative même pour des échantillons très hétérogènes ; (3) elles ne nécessitent qu'une simple mise en suspension (aucune préparation si on étudie les matières en suspension d'un cours d'eau) ; (4) l'appareillage est relativement simple et à terme, il est envisageable de l'appliquer en mesure in-situ au bord d'un cours d'eau si un constructeur était prêt à adapter le matériel aux contraintes de terrain.

Ces appareils sont utilisés dans l'industrie extractive (Leroy et al., 2011; Ulusoy et al., 2014a, 2014b; Zöls et al., 2013) et dans des études de biodégradation (Cadogan et al., 2014). Des appareillages similaires sont utilisés en milieu marin pour la reconnaissance du benthos, des zooplanctons et des floes (Eisma et al., 1990; Grosjean et al., 2004; Hill et al., 1998; Mikkelsen et al., 2005; Milligan, 1996; Van Leussen et al., 1996)

En sédimentologie, les études utilisant cette méthode sont rares et isolées (Shang et al., 2018; Tysmans et al., 2009, 2006). Elles tendent pourtant à confirmer leur utilité pour caractériser et discriminer différentes natures et dépôts sédimentaires.

Elle a rarement été utilisée pour analyser des eaux environnementales à l'exception d'une étude sur la coagulation du cyanure dans les eaux usées (Shen et al., 2013) et une étude sur des eaux brutes (Rabinski et al., 2004) qui s'est limitée à l'analyse purement granulométrique sans chercher à caractériser en détail les particules par leurs paramètres de forme.

A la lumière de ces progrès techniques et du succès des études mentionnées, notre objectif est donc d'utiliser l'analyse d'image dynamique à vecteur liquide comme outil de mesure de la morphométrie, puis les paramètres de taille et de forme mesurés en tant que traceur physique pour le sediment fingerprinting.

Cet objectif se décompose en plusieurs points :

- (1) Définir la performance de l'appareil à discriminer des sédiments purs entre eux et identifier des paramètres de forme clefs pour leur différenciation ;
- (2) Créer un premier modèle de prédiction des proportions de sédiments purs au sein de mélanges créés en laboratoire à partir des échantillons purs identifiés précédemment ;
- (3) Mettre en place un protocole de mesure et d'analyse pour le morphogranulomètre ;
- (4) Identifier les sources sédimentaires dans différents bassins versants naturels en étudiant les différences de taille et de forme des sédiments sur différents points de mesures clefs de ces hydrosystèmes. Puis analyser les transferts de sédiments en calculant les variations dans la contribution de ces sources sur différentes périodes et en différents endroits du bassin versant.

## 2) Paramètres descripteurs

Lors d'une analyse d'image, des résultats sous la forme de paramètres mathématiques décrivant la taille et la forme des particules mesurées sont obtenus. M. W. Clark (Clark, 1981) définit les qualités désirables essentielles pour un jeu de paramètres descripteurs :

- Individualité : Un seul set de paramètres doit correspondre à une seule forme.
- Parcimonie : La quantité de paramètres dans un set doit être la plus basse possible afin de faciliter le traitement des données.
- Indépendance : Les paramètres doivent être autant que possible indépendants mathématiquement. Un certain degré d'interdépendance est inévitable.
- Invariable à la rotation : Quelque que soit l'orientation d'une même forme, la valeur des paramètres doit être la même.

D'autres qualités peuvent être intéressantes mais sont plus difficilement réalisables :

- Les paramètres peuvent être interprétés avec un sens physique.
- Il est possible de reconstruire la forme à partir du jeu de paramètre.

Il semble donc apparent qu'il est nécessaire d'utiliser une combinaison de paramètres pour décrire les formes analysées. Toutefois certains paramètres (que l'on appellera paramètre globaux) tendent à s'approcher des points mentionnés précédemment à eux seuls.

Les paramètres considérés comme de premier ordre sont des paramètres mesurables directement à partir de l'image et sont en pixels ou  $\mu\text{m}$ . Ils décrivent la taille de la particule. Ci-après, les paramètres parmi les plus communs (Đuriš et al., 2016; Leibrandt et al., 2015; Olson et al., 2011; Pirard et al., 2005; Rinne, 2015; Rodriguez et al., 2013) :

$P_p$	Périmètre de la particule
$A_p$	Aire de la particule
$P_{ch}$	Périmètre de l'enveloppe convexe de Hull (Figure 10B)
$A_{ch}$	Aire de l'enveloppe convexe de Hull (Figure 10B)
$A$	Axe majeur de l'ellipse équivalente
$B$	Axe mineur de l'ellipse équivalente
$A_{EC}$	Aire du cercle/sphère de surface équivalente (Figure 10F)
$D_{EC}$	Diamètre du cercle/sphère d'aire équivalente (Figure 10F)
$D_{IC}$	Diamètre du cercle/sphère inscrit (Figure 10E)
$D_{fmax}$	Diamètre de ferret maximum (Figure 10D)
$D_{fmin}$	Diamètre de ferret minimum (Figure 10C)
$D_{moy}$	Diamètre moyen passant par le centre de gravité de la particule (Figure 10H)
$D_{max}$	Distance entre les deux pixels les plus éloignées (Figure 10G)
$L_G$	$\frac{P_p + \sqrt{P_p^2 - 16 * A_p}}{4}$ Longueur géodésique (Figure 10A)
$F_T$	$\frac{P_p - \sqrt{P_p^2 - 16 * A_p}}{4}$ Épaisseur de fibre (Figure 10A)
$D_{crofton}$	Diamètre de Crofton : moyenne d'un grand nombre de longueurs tracées au hasard entre deux points du contour de la particule

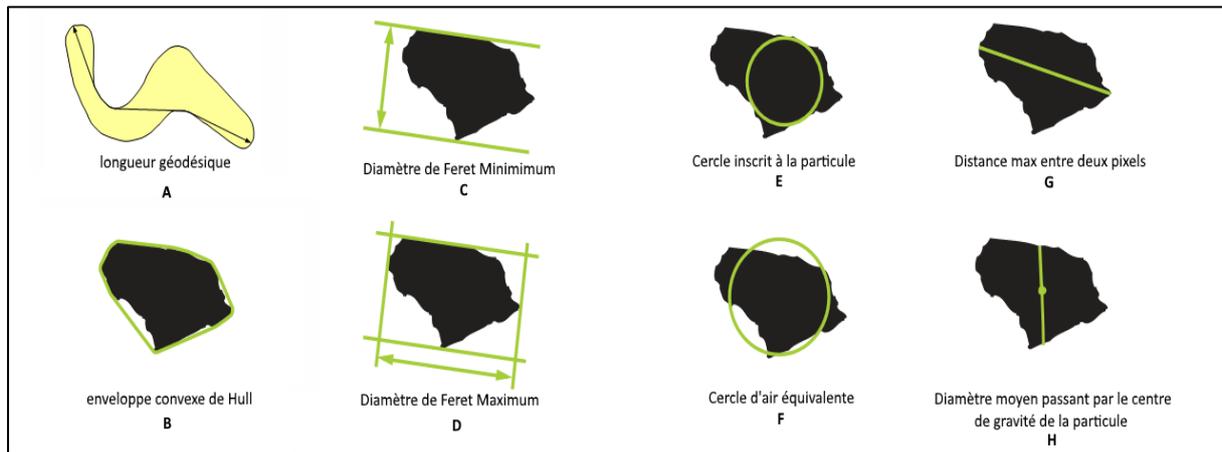


Figure 10 : exemples de paramètres de taille

Les paramètres de second ordre sont fonction des paramètres de premier ordre. Ils peuvent être subdivisés en 3 catégories (Rodriguez et al., 2013) qui correspondent à 3 échelles différentes de description de la forme (Figure 11) : les paramètres décrivant la morphologie globale de la forme (Morphology, échelle globale), ceux qui caractérisent l'angularité du contour (Roundness, échelle intermédiaire) et ceux qui sont fonction de la texture de la surface (petite échelle).

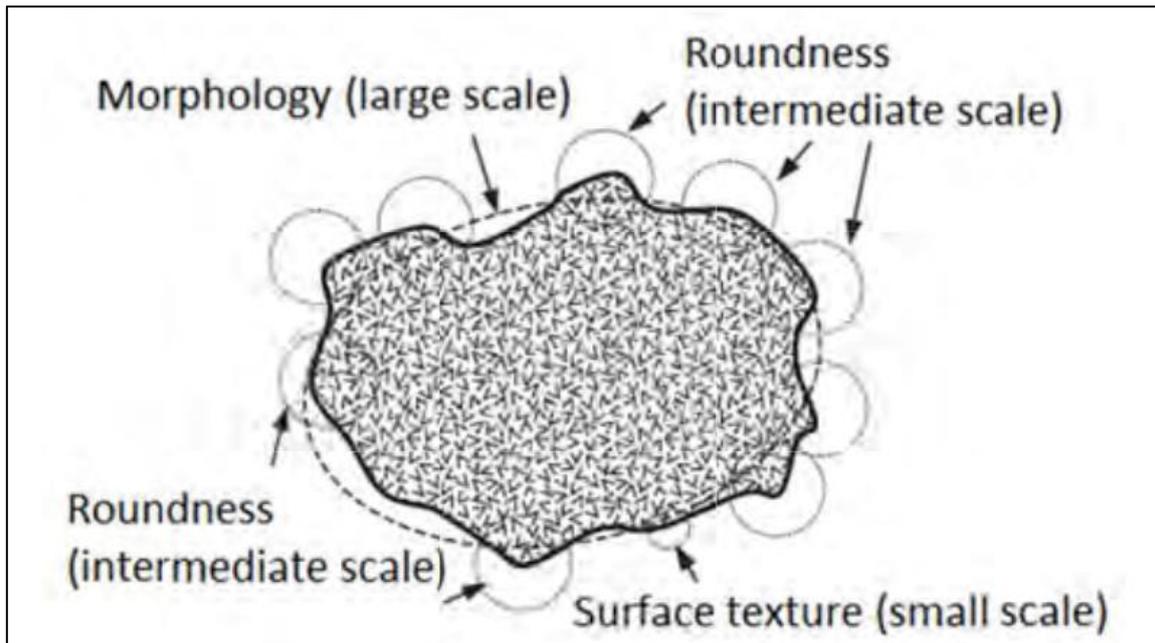


Figure 11 : échelles des paramètres descripteurs de forme (Rodriguez 2013)

- Morphologie :

Ferret Ratio	$\frac{D_{fmax}}{D_{fmin}}$	
Form factor	$\frac{4\pi A_p}{P_p^2}$	(Liu et al., 2015)
Circularity	$\frac{P_p}{2\sqrt{\pi A_p}}$	(Leibrandt et al., 2015; Liu et al., 2015; Sochan et al., 2015)
Aspect ratio	$\frac{D_{fmin}}{D_{fmax}}$	ou Ferret Ratio (Leibrandt et al., 2015; Liu et al., 2015)
Axial ratio	$\frac{B}{A}$	ou Ellipse Ratio (Liu et al., 2015)
Elongation	$\frac{D_{fmax}^2}{A}$	(Leibrandt et al., 2015; Liu et al., 2015; Sochan et al., 2015)
Ell. Elongation	$1 - \frac{B}{A}$	Ellipse Elongation
Extent	$\frac{A_p}{D_{max} \times D_{fmin}}$	(ISO, 2008)
Eccentricity	$\frac{F_T}{L_G}$	(ISO, 2008)
Straightness	$\frac{D_{max}}{L_G}$	(ISO, 2008)

- Angularité :

Solidity	$\frac{A_p}{A_{ch}}$	(Leibrandt et al., 2015; Liu et al., 2015)
Convexity	$\frac{P_{ch}}{P_p}$	(Leibrandt et al., 2015; Liu et al., 2015; Sochan et al., 2015)
Roundness	$\frac{4A_p}{\pi D_{fmax}^2}$	(Đuriš et al., 2016; He et al., 2016)
Compactness	$\frac{\sqrt{\frac{4A_p}{\pi}}}{D_{max}}$	(ISO, 2008)

- Texture de surface :

Bluntness  $\frac{1}{\sqrt{V}-1}$  avec  $V = \frac{1}{N} \sum_i (1 + \frac{r_{max}}{r_i})^2$  (He et al., 2016; Pirard, 1993; Pirard et al., 2005)  
 où  $r_i$  = rayon du plus grand cercle inscrit au point  $i$  et  $r_{max}$  = valeur max de  $r_i$  (Figure 10A)

Roughness  $\frac{A_p - A(MUHO_p)}{A_p}$  (Pirard, 1993; Pirard et al., 2005) (Figure 12B)  
 où  $A(MUHO_p)$  est l'aire de la référence lisse de la particule : ensemble des disque de rayon supérieur ou égal à  $\gamma \lambda_\epsilon$  ( $\gamma \in [0,1]$  et  $\lambda_\epsilon$  = disque maxima inscrit), augmenté des disques supportés par le squelette minimal (Pirard, 1993)

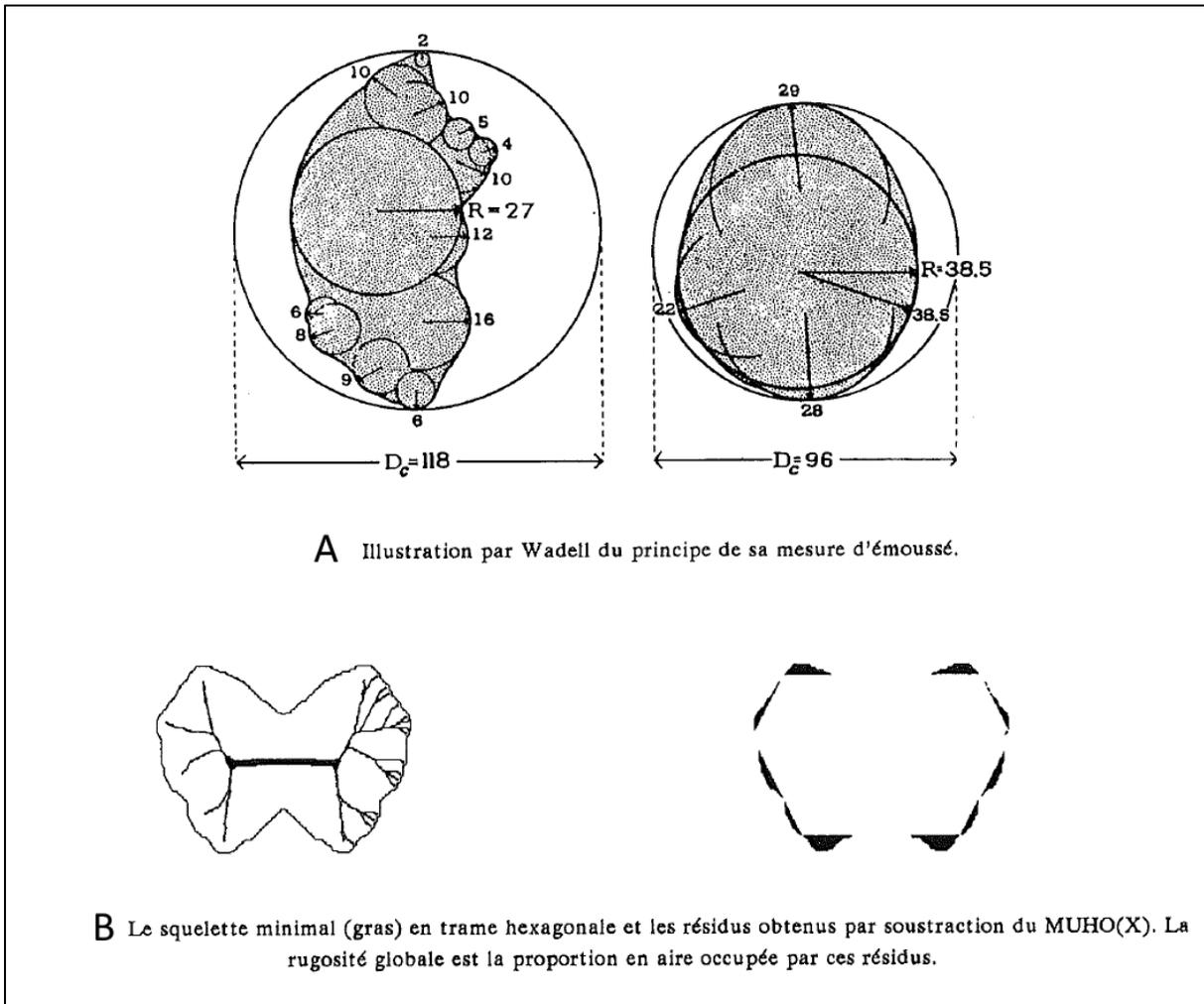


Figure 12 : exemples de mesure de la Bluntness (ou émousé, A) et la Roughness (ou rugosité, B) (Pirard, 1993)

Certains paramètres ne rentrent pas dans cette classification : les paramètres globaux sont des paramètres décrivant la particule sur plusieurs échelles et tendent à décrire la morphologie globale, le contour et la texture à eux seuls.

Une méthode consiste à faire correspondre une transformée de Fourier au contour « déroulé » de la particule (Figure 13a) ou aux variations angulaires (Figure 13b) (Clark, 1981).

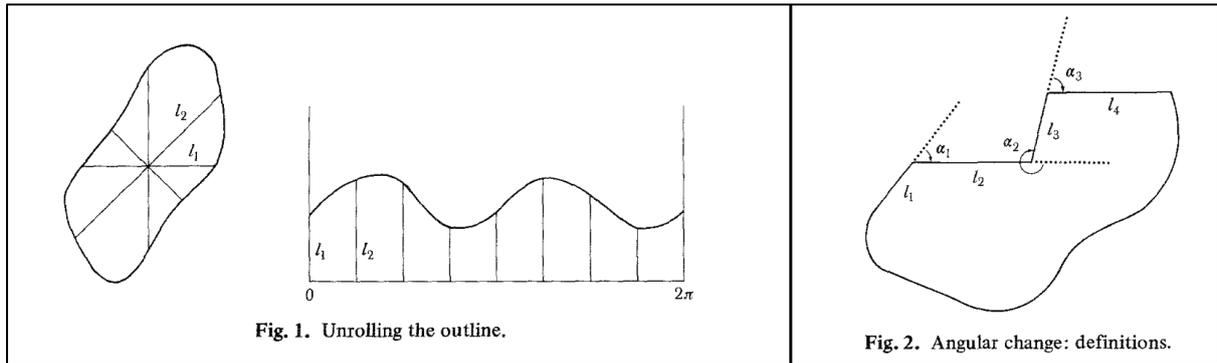


Figure 13 : a) à gauche : Courbe correspondante aux valeurs de rayons depuis le centre de gravité de la particule (ou coordonnée polaire du contour de la particule avec l'origine au centre de gravité, en ordonnée la distance  $r$  et en abscisse l'angle  $\theta$  en radian) ; b) à droite : variations angulaires, le contour est défini par une longueur et un angle (Clark, 1981)

L'utilisation de la dimension fractale comme descripteur de forme est également un paramètre global (Arasan et al., 2011; Das, 2007; Perugini et al., 2011). Pour une forme en deux dimensions, la dimension varie entre un et deux. En appliquant ce principe au contour de la particule, plus ce dernier sera irrégulier, plus la dimension fractale augmentera (Figure 14).

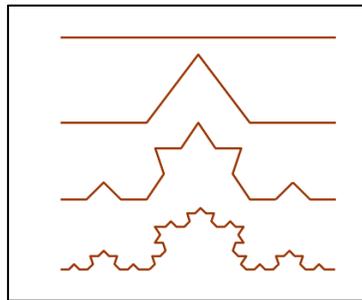


Figure 14 : Courbe de Koch, la valeur de dimension fractale  $D=1.262$

Le désavantage de ces paramètres globaux est qu'ils tendent à résumer plusieurs informations (morphologie, contour et texture) en une seule valeur, ce qui complique l'interprétation. Ces paramètres ne seront pas utilisés dans cette thèse.

## C. ANALYSES DES DONNEES SEDIMENTAIRES

### 1) Analyses de la taille

#### a) Indices granulométriques calculés

L'utilisation de la taille pour comparer différents sédiments se fait fréquemment par l'analyse d'une distribution idéale. Pour une population, il est communément assumé une distribution normale ou gaussienne. Les paramètres utilisés pour décrire une distribution granulométrique suivent 4 principaux groupes :

(1) La taille moyenne, (2) la variance (tri) des tailles autour de la moyenne, (3) la symétrie (ou dissymétrie) autour de la moyenne et (4) le degré de concentration des grains autour de la moyenne (coefficient d'acuité). Ces paramètres peuvent être obtenus graphiquement ou mathématiquement. Ils permettent d'isoler et de comparer les distributions de différentes populations de tailles de sédiments avec un jeu limité de valeurs.

Voici quelques exemples de formules basées sur les quantiles (Folk and Ward, 1957) pour le calcul de ces paramètres :

Quantiles :  $qX$  ; X nombre entre 1-100 correspondant à la valeur en pourcent sur la courbe cumulative (chapitre II.2.).

Moyenne :  $M = \frac{(q16 + q50 + q84)}{3}$  (Folk and Ward, 1957).

Indice de classement (Sorting index) :  $So = \frac{(q84-q16)}{4} + \frac{(q95-q5)}{6.6}$  indique la qualité du classement. Plus la valeur est grande, plus la distribution est mal triée, avec une grande différences de taille entre les grains les plus fins et ceux les plus grossiers de l'échantillon (Folk and Ward, 1957).

Coefficient de dissymétrie (Skewness) :  $Sk = \frac{(q84+q16-2q50)}{2(q84-q16)} + \frac{(q95+q5-2q50)}{2(q95-q5)}$  renseigne sur la dissymétrie de la distribution autour de la médiane, la distribution est bien symétrique si la skewness est nulle, en allant vers des valeurs positives, elle sera bombée du côté des particules grossières et inversement (Folk and Ward, 1957).

Coefficient d'acuité (Kurtosis) :  $K = \frac{(q95-q5)}{2.44(q75-q25)}$  mesure la forme du pic de la courbe. Si K est proche de 1, la distribution suit une répartition normale, si K est supérieur à 1, il y a une répartition montrant la prédominance d'une classe, illustrée par un pic dans la courbe de fréquence, si K est inférieur à 1, la courbe de fréquence va être plus étalée, montrant une égale représentativité des différentes classes (Folk and Ward, 1957).

Mais la méthode la plus précise pour calculer ces paramètres indicateurs est la méthode des moments (Blott and Pye, 2001; Krumbein and Pettijohn, 1938) puisqu'elle se base sur la distribution granulométrique complète. Le programme Gradistat (Blott and Pye, 2001) offre un calcul rapide des statistiques granulométriques par la méthode des moments et par Folk and Ward. L'utilisation de ce programme est très répandue en sédimentologie (Donaldson et al., 2019; Hallin et al., 2019; Jia et al., 2019; Lemma et al., 2019; van der Bilt et al., 2018; Wittmeier et al., 2015).

#### *b) Analyses de spectres granulométriques*

Afin d'avoir un aperçu intégré de toutes les différentes tailles des particules d'un sédiment, on représente les variations de tailles sous la forme d'une distribution de fréquences d'une quantité (nombre, surface ou volume) de particules détectées. Cette distribution peut être représentée en fréquences cumulées ou relatives (Figure 15).

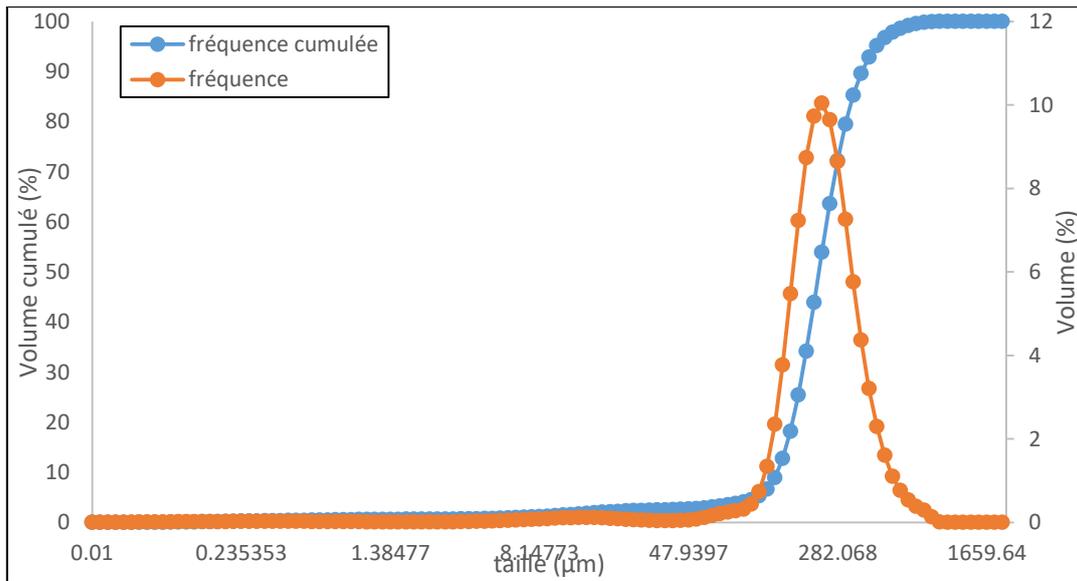


Figure 15: Exemple de distribution granulométrique d'un sable bien trié en volume

Une population de particules d'origine sédimentaire unique et de tailles homogènes suit généralement une loi normale ou log-normale. Lorsque plusieurs populations sont présentes dans l'échantillon, il est possible d'identifier différents groupes en identifiant les différents modes de chaque gaussienne (Figure 16).

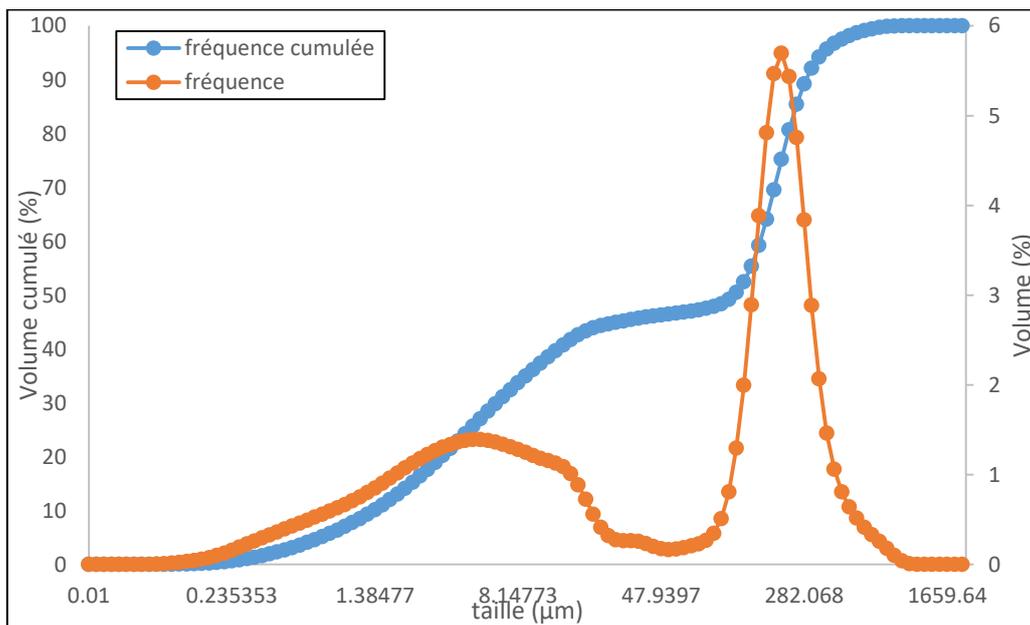


Figure 16: Exemple de distribution granulométrique d'un mélange d'un sable et d'une argile (kaolinite)

Lorsqu'un sédiment de nature non déterminée présente une distribution avec plusieurs modes (Figure 17) il est possible d'utiliser des techniques d'identification telle qu'une observation au Microscope Electronique à Balayage (MEB) pour associer chaque mode à une nature/origine (Figure 17). Le couplage des deux méthodes permet d'annuler leurs limites respectives : le manque de représentativité statistique d'une observation au microscope étant complété par l'observation intégrée de la mesure granulométrique de l'échantillon.

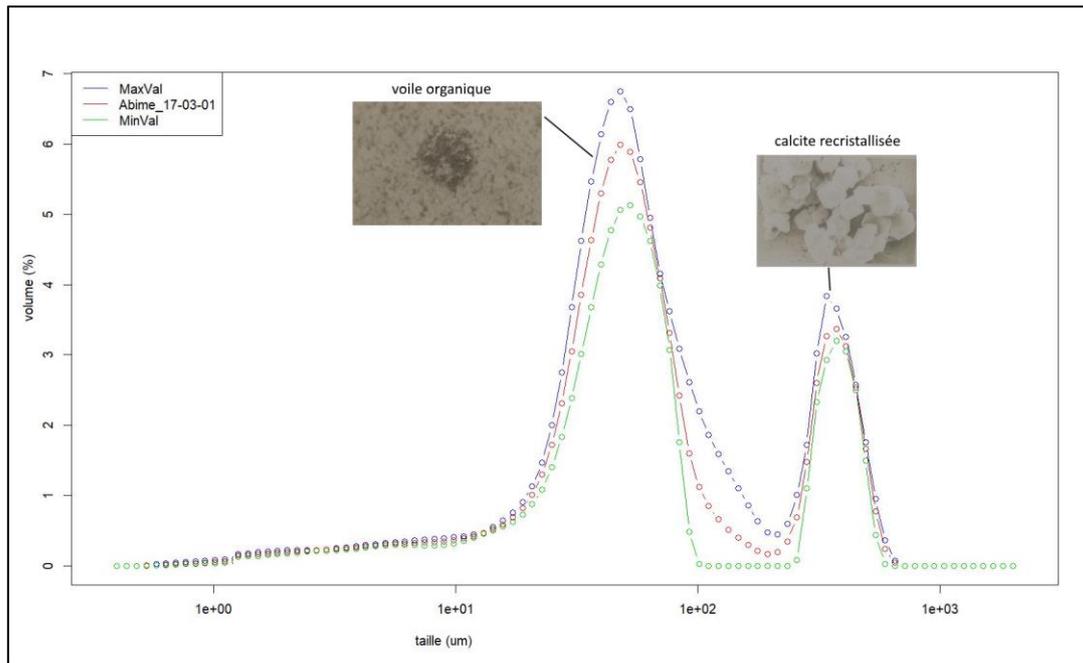


Figure 17: couplage d'une distribution granulométrique avec une observation au MEB

## 2) Classification et analyses statistiques des paramètres

La plupart des auteurs choisissent de ne sélectionner qu'un jeu réduit de paramètres, comme préconisé par M. W. Clark (Clark, 1981) (voir chapitre I.B.2)), afin de réduire le temps de traitement et le volume de données à traiter. Des analyses et représentations statistiques basiques sont ensuite réalisées (moyennes, variances, quantiles, boîtes à moustache, etc). Des logiciels tels que Gradistat (Blott and Pye, 2001) pour la taille des particules ont été développés pour automatiser certaines analyses.

Pourtant, avec les outils de traitement informatique actuels, la gestion de grands jeux de données devient plus aisée et des méthodes de classification et de statistiques multivariées permettent de synthétiser l'information (ACP, AFD), faire des typologies (CAH) et d'obtenir des informations sur les forçages. Ils permettent également de tester la significativité (Khi-deux, Kruskal Wallis) de ces derniers et réaliser des modèles prédictifs (AFD). En morphogranulométrie, Liu et Campaña (Campaña et al., 2016; Liu et al., 2015) utilisent ces outils pour étudier le comportement et les relations des paramètres de taille et de forme entre eux.

### a) Analyse en composantes principales (ACP)

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) utilise une transformation orthogonale pour convertir les variables d'entrées (les paramètres de taille et de forme) en un nombre réduit de variables synthétiques non linéairement corrélées appelées composantes principales (Hill and Smith, 1976; Jolliffe, 1986), en déformant le moins possible la réalité. Elle réduit la dimensionnalité des jeux de données et met en évidence les corrélations entre les variables d'entrées et les composantes. Cette méthode permet d'identifier les corrélations majeures entre les paramètres et identifie différents groupes d'individus à partir de leur valeur sur chaque composante. Il s'agit donc d'obtenir un résumé le plus pertinent possible des données initiales.

Cet outil est fréquemment utilisé en sédimentologie lors d'étude multiparamétriques (Burns et al., 1997; Molinaroli et al., 2007; Palazón et al., 2015), par exemple pour identifier la signature

hydrochimiques des sédiments (Castella-Müller et al., 1998) ou pour identifier des modalités de transport de matières en suspension à partir de données hydrodynamiques et granulométriques (Fournier et al., 2008). Dans cette thèse, l'ACP servira à observer la variation des données suivant les multiples paramètres de taille et de forme mesurés.

### b) Analyse en coinertie (ACOI)

Puisque que chaque analyse de type ACP est construite à partir des valeurs relatives de leur jeu de données, il n'est pas possible de comparer deux ACP calculées sur des sets de données différents. Les analyses k-tableaux permettent de projeter deux ou plusieurs « tableaux » (et donc les résultats de deux ACP) sur un même plan de composantes « compromis » et donc de pouvoir comparer les analyses. Ces analyses k-tableaux se décomposent en plusieurs méthodes selon les types de données et les objectifs, par exemple l'analyse en composantes principales généralisée (Casin, 1996; Flury, 1986), l'analyse STATIS (Fournier et al., 2009; Lavit et al., 1994; Stanimirova et al., 2004) et l'analyse en coinertie (Chessel and Hanafi, 1996; Dolédec and Chessel, 1994; Dray et al., 2003).

Dans le domaine de l'étude du transport particulaire, Fournier (Fournier et al., 2009) utilise la méthode STATIS mais dans cette thèse, la méthode choisie est l'analyse en coinertie permettant la comparaison des individus (ACOI). Elle recherche une représentation des 2 ensembles de données dans un espace commun (Dolédec and Chessel, 1994; Dray et al., 2003). Son principe consiste à maximiser les corrélations entre les coordonnées des sites issus des deux analyses précédentes (maximisation de la covariance). En maintenant fixe l'espace de la première matrice de données (Y), elle cherche de nouveaux axes dans l'espace de la deuxième matrice de données (X) remplissant ces conditions (Figure 18). Souvent utilisée dans les analyses espèces-milieu en écologie (Legendre, 2019), elle sera ici utilisée pour la comparaison entrée-sortie d'un système karstique. La Figure 19 illustre les différentes projections permettant l'interprétation de l'analyse en coinertie.

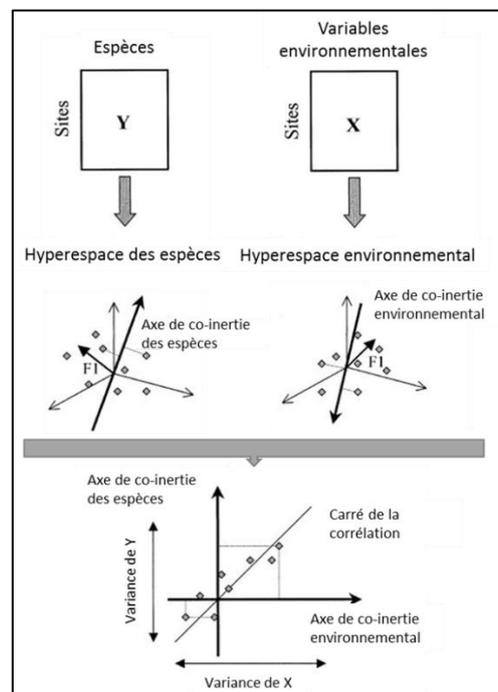


Figure 18 : Principes de l'analyse de coinertie (ACOI). Les sets de données écologiques X et Y produisent deux représentations des sites dans deux hyperspaces. Des analyses séparées trouvent des axes maximisant l'inertie dans chaque hyperspace. L'étude ACOI vise à trouver les axes de coinertie sur lesquels les sites sont projetés. ACOI maximise la covariance carrée entre les projections des sites sur les axes de coinertie. (Dray et al., 2003)

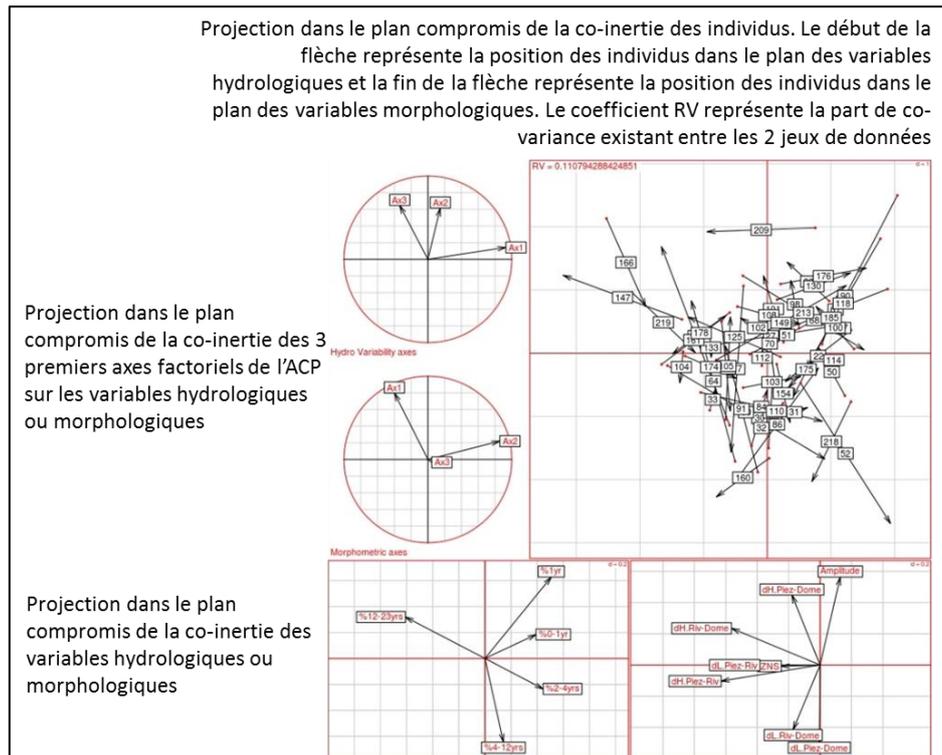


Figure 19 : synthèse graphique des différentes analyses projetées sur le plan du compromis créé par co-inertie (Massei et al., 2019)

### c) Tests d'indépendance/de conformité

Le test de conformité des moyennes : khi-deux (ou khi carré,  $\chi^2$ ) (Corder and Foreman, 2014) est utilisé pour déterminer si l'on observe une différence significative entre des fréquences attendues et les fréquences observées. Ce test sera utilisé pour savoir si les distributions granulométriques mesurées par le morphogranulomètre (fréquences observées) et les distributions de taille mesurées par le granulomètre laser (fréquences attendues) correspondent bien pour un même échantillon.

Kruskal-Wallis est un test statistique non paramétrique de comparaison de moyennes qui évalue les différences parmi au moins 3 groupes d'échantillons sur une distribution non normale (Corder and Foreman, 2014; McKight and Najab, 2010). Ce test est une variante de l'ANOVA (analysis of variance) qui est paramétrique et qui ne peut être utilisée que sur des variables de distribution normale. Collins et Palazón utilisent cet outil pour sélectionner les variables de traçage les plus significatives (Collins et al., 2011, 2012, 1997b; Palazón et al., 2015). Dans cette thèse, cet outil servira à vérifier la capacité des paramètres morphogranulométriques à discriminer significativement les groupes d'échantillons identifiés par classification ascendante hiérarchique (CAH).

### d) Classification ascendante hiérarchique (CAH)

La classification ascendante hiérarchique (CAH) par ultramétrique de Ward ou Ward Hierarchical Clustering (Murtagh and Legendre, 2014; Ward, 1963) permet de regrouper les individus d'un jeu de données selon leur ressemblance. C'est une méthode de classification de données basée sur la réduction de la variance intra-groupe. Elle classe les objets suivant des groupes hiérarchisés (les clusters) en les agglomérant. Chaque objet débute dans son propre groupe/cluster et, en montant dans la hiérarchie, des groupes sont réunis à chaque itération. Par exemple, Campaña utilise la CAH pour observer les ressemblances dans les signatures de taille et de forme entre différents faciès

sédimentaires (Campaña et al., 2016). De la même manière, une classification sera réalisée dans cette thèse pour analyser la signature des différents sédiments mesurés au morphogranulomètre.

Afin de déterminer le nombre optimal de cluster au sein de la CAH pour classer les données, le Partitionnement Autour des Médoids (PAM) calcul le nombre idéal de groupe au sein du jeu de données. C'est une méthode de classification basée sur l'algorithme des k-moyennes (k-means) qui partitionne les données en un nombre attendu de groupes (Kaufman and Rousseeuw, 1990). Chacune de ces partitions peut être comparée afin d'obtenir un ajustement optimal.

#### *e) Analyse factorielle discriminante (AFD)*

L'analyse factorielle discriminante (AFD) est utilisée pour trouver une combinaison linéaire de caractéristiques séparant ou regroupant des observations dans des classes (Ripley, 1996). Elle peut être utilisée pour plusieurs objectifs :

- La description des données : Parmi les groupes connus, quelles sont les principales différences que l'on peut déterminer à l'aide des variables mesurées ? Ici on souhaite explorer des données selon différents groupes prédéfinis.
- Classement/prédiction : Peut-on déterminer le groupe d'appartenance d'une nouvelle observation uniquement à partir des variables mesurées ? Ici on utilise les groupes prédéfinis pour voir dans lequel sera placé un nouvel individu.
- Validation : L'analyse discriminante permet de faire un choix entre plusieurs classifications, pour savoir laquelle est la plus pertinente.

Cette technique permet donc d'établir un modèle linéaire entre différents individus groupés selon une classification donnée, puis d'utiliser ce modèle pour prédire l'appartenance de nouveaux individus aux différents groupes en établissant sa proximité (son « score ») pour chacun.

L'AFD peut être utilisée pour réaliser un modèle de mélange pour le traçage des sources sédimentaires (source fingerprinting) et sera utilisée pour prédire l'appartenance de différentes particules à des sources sédimentaires potentielles. Elle est notamment utilisée dans l'outil statistique Sed\_SAT (Cashman et al., 2018; Gorman Sanisaca et al., 2017; Patault, 2018).

#### *f) Sediment Source Assessment Tool (Sed\_SAT) (Gorman Sanisaca et al., 2017)*

Cet outil est une procédure statistique développée par l'USGS (United State Geological Survey agency) permettant la réalisation et l'application d'un modèle de mélange pour le traçage de sédiments. Sed\_SAT identifie les outlier (observations aberrantes), évalue la conservativité des paramètres par l'application de « Bracket Test », identifie les traceurs les plus discriminants et réalise un modèle par AFD avec ces traceurs qui va être soumis à une analyse d'erreur par test de Monte-Carlo. De nombreux autres outils similaires existent dans la littérature (Le Roux et al., 2013; Lim et al., 2003; Mukundan et al., 2012).

Cet outil est utilisé dans plusieurs étude avec des données isotopiques, hydrochimiques et colorimétriques (Gellis et al., 2019; Gellis and Sanisaca, 2018; Patault et al., 2019; Pulley et al., 2019) et sera donc testé ici avec des données morphogranulométriques.

## II. DEVELOPPEMENT D'UNE METHODOLOGIE D'ANALYSE MORPHOMETRIQUE APPLIQUEE AU SUIVI SOURCE TO SINK

---

### A. INTRODUCTION

Pour vérifier la capacité du morphogranulomètre à bien mesurer la taille et la forme, il est nécessaire de répondre aux questions méthodologiques suivantes : Le morphogranulomètre peut-il mesurer la taille avec précision ? Quel est l'impact de la préparation des échantillons (séchage, broyage, ultrasons, etc) sur la mesure ? La mesure de la forme permet-elle de discriminer des échantillons de nature et préparation unique ?

Pour cela, plusieurs lots d'échantillons de différentes natures simples et uniques puis préparations sont mesurés et analysés. Ces échantillons sont présentés dans le chapitre suivant (chapitre II.B). Cette démarche de validation d'une méthodologie est nécessaire pour pouvoir appréhender des sédiments naturels souvent composés de mélanges complexes de particules de différentes natures/origines.

Plusieurs tests ont été réalisés afin de répondre à ces questions méthodologiques :

Tout d'abord, la mesure de la taille sera abordée. Dans quelle gamme de mesure le morphogranulomètre mesure-t-il la taille ? Est-il capable de discriminer des échantillons de différentes tailles ? Avec quelle précision ? Pour répondre à ces questions, une comparaison des distributions de taille du morphogranulomètre (le paramètre diamètre du cercle de surface équivalente à celle de la particule) avec les mesures d'un granulomètre laser est effectuée.

Classiquement en sédimentologie, une grande partie des échantillons subit une ou plusieurs altérations (broyage, ultrasons, etc) lors de la préparation. Cette préparation altère-t-elle leur taille et forme ? Dans quelle mesure et sur quels paramètres ? Pour observer l'impact de cette préparation, des essais avec différentes préparations (durées de broyage, avec ou sans ultrasons, avec ou sans centrifugation) ont été exécutés sur des matériaux cohésifs naturels.

Puis, la conservativité de la mesure de la forme sera adressée. Le morphogranulomètre peut-il discriminer des échantillons de nature et préparation différentes ? Dans quelle mesure et avec quelle sensibilité ? La méthodologie d'analyse des résultats sur les mesures du morphogranulomètre est présentée comme suit :

Premièrement en réalisant une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) avec toutes les particules des répliquas des différents échantillons afin de montrer la capacité du morphogranulomètre à discriminer les échantillons dans différents groupes.

Deuxièmement, afin d'affiner et de comprendre cette classification, une analyse en composantes principales (ACP) sur les moyennes des échantillons est réalisée afin d'observer quels paramètres discriminent le mieux les groupes identifiés avec la CAH ; ceux-ci seront testés par des tests de Kruskal-Wallis.

Afin de clarifier l'analyse, Une représentation graphique simplifiée des échantillons en fonction d'un nombre réduit de paramètres les plus discriminants est proposée et utilisée comme outil de

validation avec des échantillons locaux en combinaison avec une analyse factorielle discriminante (AFD).

Toutes les analyses précédentes sont réalisées sur les moyennes. Les moyennes ne traduisant pas toute l'information d'une distribution, les distributions complètes des paramètres de formes les plus discriminants sont analysées plus en détail sur une sélection d'échantillon. Cette observation va permettre d'observer en quoi les différentes distributions font varier les moyennes entre les échantillons analysés.

Enfin, des tests de mélanges d'échantillons sont effectués avec une tentative de quantification de chaque source dans un mélange par AFD. D'abord avec deux sources différentes puis trois. Ces tests sont comparés avec les résultats obtenus par le logiciel Sed\_SAT, proposant un protocole statistique de traitement de données communément utilisé dans les études de sediment fingerprinting (Cashman et al., 2018; Gorman Sanisaca et al., 2017; Patault, 2018).

## B. SPECIFICATIONS MATERIELLES

Le matériel utilisé est composé d'un morphogranulomètre fabriqué par Occhio (Figure 1) et d'un granulomètre à diffraction laser Beckman-Coulter LS13320 pour la calibration de la mesure de la taille.

L'analyse d'image est effectuée directement lors la prise de photographie par le logiciel constructeur associé au morphogranulomètre, Callisto. Dans ce travail, les analyses statistiques ont été effectuées sur les paramètres de taille et de forme calculés pour chaque particule et extraits du logiciel. Les paramètres calculés sont décrits dans le chapitre I.B.2) et dans la norme ISO9276-6 (ISO, 2008).

Plusieurs réglages des objectifs de la caméra sont possibles, chaque position induit une résolution d'image différente. L'acquisition de l'image nécessite également la calibration de plusieurs paramètres tels que la profondeur de champ de la caméra, le zoom, la luminosité du rétroéclairage, la focale et le threshold (seuil de niveau de gris à partir duquel on considère qu'un pixel appartient à une particule). L'ajustement de ces paramètres dépend des caractéristiques intrinsèques de l'appareil, de la taille minimale et de la gamme de tailles des particules (Rinne, 2015), mais aussi des caractéristiques d'analyses souhaitées par l'opérateur. La résolution des images analysées dépend du bon paramétrage de l'appareil et du matériel optique. (Pirard, 1993; Pirard et al., 2005) démontre qu'une bonne résolution est essentielle à la précision des paramètres descripteurs. Différents tests seront donc réalisés pour une mesure optimale.

## C. LOTS SEDIMENTAIRES

Un avantage de la morphogranulométrie est que, comme la granulométrie laser, elle ne demande que peu de contraintes de préparation d'échantillons et est donc relativement facile à mettre en œuvre. Aucun réactif n'est nécessaire et dans le cas d'échantillons environnementaux, la seule contrainte est la nécessité de conserver leur état naturel depuis le prélèvement jusqu'à la mesure. Deux solutions peuvent être mises en œuvre pour répondre à ce problème : une est de maintenir les conditions de conservation (température, pH, aucun contact avec des agents contaminants, etc) jusqu'à la mesure ; l'autre est de réaliser les mesures in-situ. Cette dernière possibilité reste idéale car, suivant l'échantillon et les mesures à réaliser, la conservation peut se révéler coûteuse et pas toujours fiable. Malheureusement les contraintes de terrain et d'appareil font que pour l'instant, le morphogranulomètre n'est pas adapté aux mesures in-situ. C'est pourquoi toutes les mesures seront effectués en laboratoire avec différentes méthodes de conservation testées.

Pour calibrer les mesures du morphogranulomètre sur les différentes formes et préparations que peuvent prendre un sédiment, plusieurs tests vont être effectués sur différents lots sédimentaires. La Figure 20 explique quel lot servira à effectuer quel test.

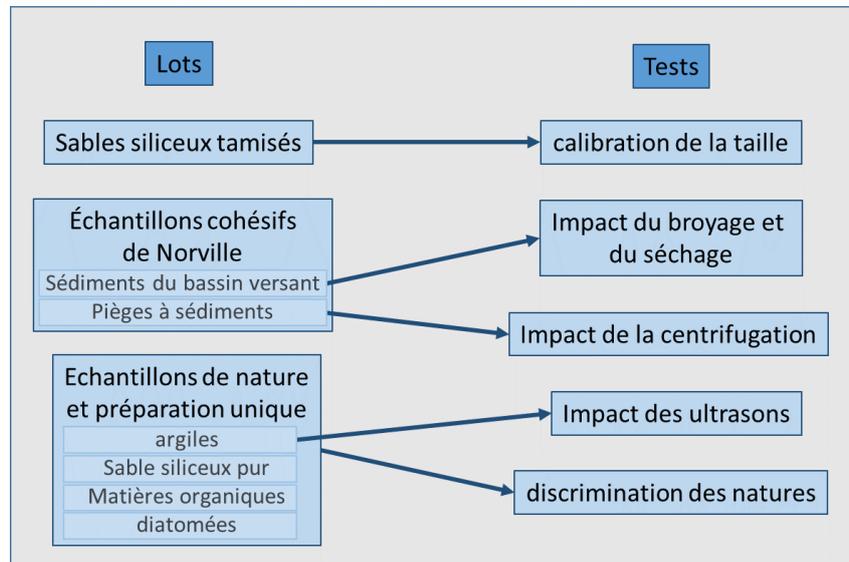


Figure 20 : schéma des différents rôles des lots sédimentaires

**1) Échantillons de sable siliceux tamisés pour la calibration de la mesure de la taille :**

Pour calibrer la mesure de la taille de notre appareil, des échantillons de sable siliceux tamisés ont été utilisés. Quatre sables siliceux de carrière différents ont été tamisés à 40  $\mu\text{m}$ , 63  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$  et 160  $\mu\text{m}$ .

**2) Échantillons cohésifs de Norville, et du Pays blanc guérandais pour l'impact du séchage, du broyage et de la centrifugation :**

Des échantillons cohésifs ont été utilisés pour observer l'effet de certaines préparations (broyage, séchage, ultrasons et centrifugation) sur la mesure de la taille et de la forme des particules mesurées au morphogranulomètre.

Pour le séchage et le broyage, une partie des échantillons sont des sols et formations superficielles provenant du bassin versant de la rivière du Bébec (Figure 21, Tableau 2) en Normandie (France). Ces échantillons ont été soumis à un séchage puis un broyage pour être ensuite comparés à l'échantillon brut. Le séchage est réalisé dans une étuve à 30°C durant 48h minimum, le broyage est effectué avec un vibro-broyeur à bille réglé à puissance maximal (25 Hz).

Tableau 2 : liste des échantillons de sources sédimentaires prélevés sur le bassin versant

nom	nature	date	localisation
NBV_01 Limon	limon	27/02/2019	bassin versant Bébec
NBV_02 Colluvionslimon	colluvionsde limon	27/02/2019	bassin versant Bébec
NBV_03 Colluvionsmixte	colluvions mixtes	27/02/2019	bassin versant Bébec
NBV_04 VaseBebecsource	vase	27/02/2019	lit du Bébec
NBV_05 colluvionslimon	colluvionsde limon	27/02/2019	bassin versant Bébec
NBV_06 colluvionsmixte	colluvions mixtes	27/02/2019	bassin versant Bébec
NBV_07 Craieglauco	sol crayeux	27/02/2019	bassin versant Bébec
NBV_08 VaseBebecdelta	vase	27/02/2019	lit du Bébec
NBV_09 ArgileSilexcontactcraieb	Argile à silex	27/02/2019	encaissant
NBV_10 Sol Sables Verts	sol silteux	27/02/2019	bassin versant Bébec

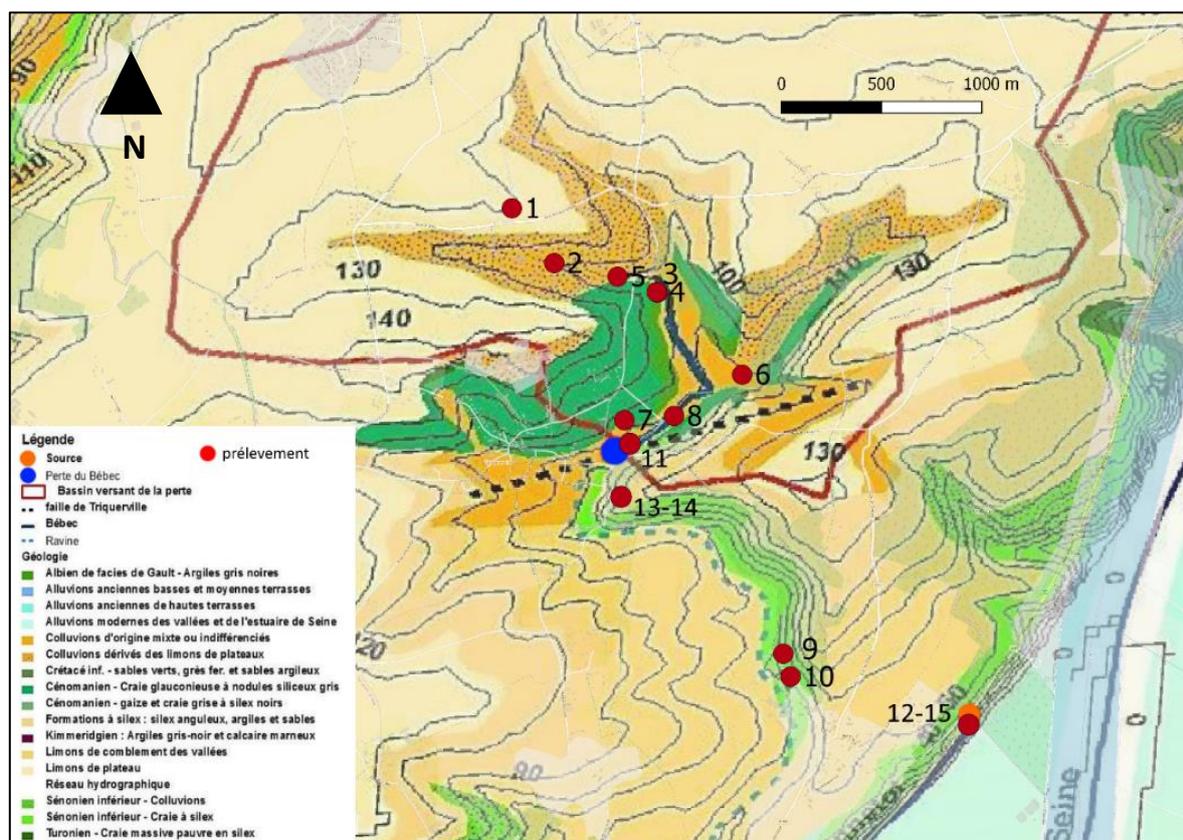


Figure 21 : localisation des échantillons de sources sédimentaires prélevés sur fond de carte géologique adaptée à partir de (Duran, 2015)

Les tests avec la centrifugation ont été réalisés sur les matières en suspension capturées par des pièges à sédiment de type TIMS (Figure 22, Time Integrated Sampling of Suspended Sediment, (Phillips et al., 2000)) placés à la source du Hannebot (points 12-15 de la Figure 21). La centrifugeuse permet d'attendre 7000 tours par minute (RPM), les échantillons ont donc été centrifugés à cette vitesse durant 45 minutes.

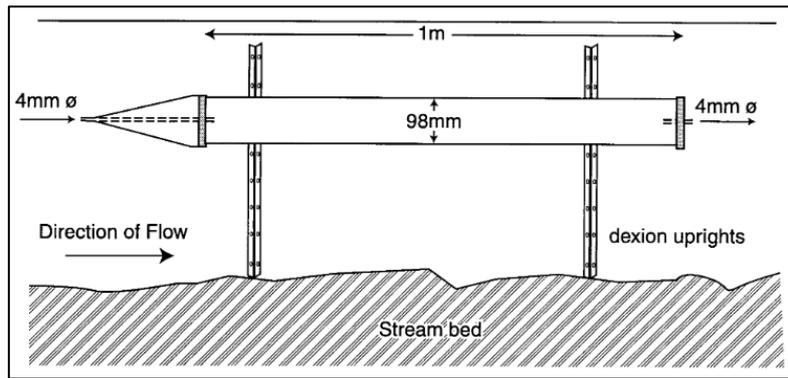


Figure 22 : Schéma d'un piège à sédiment de type TIMS (Phillips et al., 2000)

### 3) Echantillons de nature et préparation unique pour la calibration de la mesure de la forme :

Afin de réaliser la calibration méthodologique de la forme, trois principaux types de particules ont été utilisés (Tableau 3) : (1) des minéraux (sable de silice, argiles, oxydes et charbons) ; (2) des particules biologiques (pollens, spores et diatomées) ; et (3) des sédiments organiques (différents échantillons de tourbe, de charbon/lignites, de sols et de végétaux carbonisés). Certains sols d'origines différentes (vertisol, sol limoneux et sol chernozem) seront également présentés comme un premier aperçu des échantillons naturels complexes.

Tableau 3 : liste des échantillons de nature et préparation unique et nombre de répliques pour chaque échantillon

type		nom	répliques	préparation
Minéraux	argile broyée	smectite-Montmorillonite	3	broyage + ultrasons
		Illite rouge	3	broyage + ultrasons
		Illite jaune	3	broyage + ultrasons
		Illite verte	3	broyage + ultrasons
		kaolinite	3	broyage + ultrasons
	silice	sable siliceux purifié	3	pur
matière organique broyée	carbonisé	bois	2	broyage
		herbe	2	broyage
		suie hexane	2	broyage
		blé	2	broyage
	sols	tchernozem	3	broyage
		Vertisol	2	broyage
		limon silteux	2	broyage
	tourbe	sol de tourbe	3	broyage
	charbon	A20	2	broyage
		Beulah Zap	3	broyage
biologique	pollen	anémone	3	agar fondu puis dilué
		bouleau	3	agar fondu puis dilué
		chêne	3	agar fondu puis dilué
		érable	3	agar fondu puis dilué
		herbe	3	agar fondu puis dilué
		lin	3	agar fondu puis dilué
		prunus	3	agar fondu puis dilué
		pin	3	agar fondu puis dilué
		sapin	3	agar fondu puis dilué
	diatomée	pinnularia neomajor	3	agar fondu puis dilué

Les échantillons de matière organique proviennent de la (International Humic Substances Society | IHSS). Le sable siliceux provient d'une carrière et est fourni par Carlo Erba Reagents, les argiles minérales d'Aroma-Zone Argiles, les diatomées de la Culture Collection of Algae (SAG) et le pollens

de BÉGÉNAT (fournisseur de préparations biologiques). Toutes mentions d'argiles se rapportent au minéral et non à la fraction granulométrique.

Des échantillons naturels locaux ont été utilisés pour la validation des observations sur ces échantillons :

- Trois Sables provenant des milieux marin et éolien du nord-ouest de la France,
- Des diatomées de la SAG (Culture Collection of Algae),
- Une argile d'un marais Loire-Atlantique,
- De la vase provenant d'un ruisseau en Normandie,
- Trois sols de Normandie.

Tous les échantillons ont été mesurés deux à trois fois pour contrôler la répétabilité avec environ 60 000 particules par analyse. Les échantillons biologiques ont été reçus dans une suspension d'agar solide qui a été chauffée à l'état liquide et mélangée à de l'eau. Les échantillons minéraux et organiques ont été reçus sous forme de poudres qui ont été mises en suspension avant analyse. Les échantillons de matière organique et d'argile ont été reçus broyés et les argiles ont été dispersées par ultrason durant 10 minutes. La dispersion par ultrasons est réalisée avec l'injecteur intégré au granulomètre laser qui présente 6W de puissance.

#### D. LE MORPHOGRANULOMETRE MESURE-T-IL LA TAILLE AVEC PRECISION ?

Plusieurs études ont déjà testé les performances de l'analyse d'image en tant qu'analyse granulométrique (Coulon et al., 2015; Das, 2007; Fournier, 2012; Ilic et al., 2015; Leroy et al., 2011; Mingard et al., 2009; Shen et al., 2013). Chaque étude utilise différents appareils pour réaliser l'analyse d'image avec des performances variables. Les tests de Rabinski avec des particules calibrées (Rabinski et al. 2004) montrent une grande répétabilité et une bonne résolution pour des particules de 1 à 10  $\mu\text{m}$ . Dur et Mikkelsen (Dur et al., 2004; Mikkelsen et al., 2005) ont comparé leurs distributions granulométriques entre l'analyse d'image et le granulomètre laser. Lors de la comparaison d'instruments de même gamme de taille, de bons accords ont été trouvés et, même avec des gammes de taille différentes, les mesures étaient similaires (Mikkelsen et al., 2005).

S. Zölls (Zölls et al., 2013) a réalisé une étude mesurant les mêmes échantillons calibrés avec différents instruments morphométriques disponibles dans le commerce et populaire dans l'industrie pharmaceutique. L'étude conclue que chaque appareil a ses spécificités, certains ont une meilleure résolution, d'autres une meilleure précision logiciel et d'autres encore une plus grande ergonomie et génèrent des résultats mieux standardisés. La sélection d'un appareil dépend donc de l'usage que l'on souhaite en faire. Pour mesurer la précision de notre propre appareil, plusieurs tests ont été réalisés.

Comme plusieurs réglages des objectifs de la caméra sont possibles, des tests sur les échantillons de sable tamisés (chapitre II.C.1) sont réalisés pour vérifier si les gammes de tailles sont bien distinguables sur les différents réglages de grossissement à disposition. Chaque position induit une résolution d'image différente, le zoom le plus puissant permet d'avoir une résolution de 0,185  $\mu\text{m}/\text{px}$  (micromètre/pixel) alors que celui qui permet d'avoir le champ le plus large est de 1,113  $\mu\text{m}/\text{px}$ . Ces résultats sont comparés aux mesures effectuées au granulomètre laser sur les mêmes échantillons.

La Figure 23 montre des différences notables entre les 2 méthodes. Le granulomètre à diffraction laser semble détecter les particules de moins de 2 à 5  $\mu\text{m}$  qui ne sont pas visibles sur les distributions du morphogranulomètre. Pour les particules supérieures à 5  $\mu\text{m}$ , les distributions sont assez

similaires (si l'on considère toute la gamme d'objectif du morphogranulomètre) avec une bonne localisation de chaque fraction tamisée pour les deux méthodes. A chaque fraction de taille, un grossissement correspondant donne des résultats très proches du granulomètre laser, mais semble manquer de précision sur les autres fractions. Il est donc nécessaire de sélectionner le grossissement le plus adapté à la mesure de la fraction analysée.

Pour le grossissement le plus faible (1,115  $\mu\text{m}/\text{px}$ ), on représente très bien les particules grossières de diamètre supérieur à 100  $\mu\text{m}$ , mais les distributions sont irrégulières, en marche d'escalier. Le zoom intermédiaire (0,417  $\mu\text{m}/\text{px}$ ) est moins performant et présentent des marches d'escalier encore plus prononcées pour les fractions grossières. Le grossissement maximum (0,185  $\mu\text{m}/\text{px}$ ) n'observe aucune particule au-delà de 100  $\mu\text{m}$  de diamètre. Cela s'explique par la taille de l'image, qui se réduit en augmentant le grossissement, elle fait plus de 3 mm de côté pour le zoom minimum (1,115  $\mu\text{m}/\text{px}$ ) alors qu'elle est inférieure à 500  $\mu\text{m}$  de côté pour le zoom maximum (0,185  $\mu\text{m}/\text{px}$ ). La gamme de mesure de ce dernier est donc trop basse pour voir les différences entre les fractions qui présentent une grande majorité de particules au-delà de 100  $\mu\text{m}$ .

Toutefois ce grossissement plus fort est le plus performant sur les particules fines inférieures à 50  $\mu\text{m}$ , alors que le grossissement minimum (1,115  $\mu\text{m}/\text{px}$ ) détecte bien ces particules mais surestime leur taille de 20  $\mu\text{m}$  environ.

Le grossissement intermédiaire pourrait sembler un compromis entre les deux mais il ne semble pas réellement mieux distinguer les fractions entre 20 et 63  $\mu\text{m}$  que le grossissement large. Il représente l'option la moins précise sur chaque extrême et n'est pas franchement plus précis dans les fractions intermédiaires.

Les différentes gammes sont :

- Zoom minimum (1,115  $\mu\text{m}/\text{px}$ ) = détecte entre 20 à 800  $\mu\text{m}$ , précis entre 40 et 500  $\mu\text{m}$ .
- Zoom intermédiaire (0,417  $\mu\text{m}/\text{px}$ ) = détecte entre 15 à 250  $\mu\text{m}$ , précis entre 40 et 250  $\mu\text{m}$ .
- Zoom maximum (0,185  $\mu\text{m}/\text{px}$ ) = détecte entre 5 à 100  $\mu\text{m}$ , précis entre 10 et 60  $\mu\text{m}$ .

Le choix de la résolution va donc être un choix sur la gamme de mesure et la précision à l'intérieur de cette gamme. De manière générale, les sédiments peuvent avoir des tailles très variables, privilégier une fourchette la plus large possible est donc plus pertinent, ce qui oriente le choix le plus fréquent vers le zoom minimum (1,115  $\mu\text{m}/\text{px}$ ), qui sera utilisé dans le reste de cette étude. Toutefois l'utilisation de grossissements plus importants pourrait se révéler plus pertinente si les échantillons analysés présentaient exclusivement des particules fines (<63  $\mu\text{m}$ ).

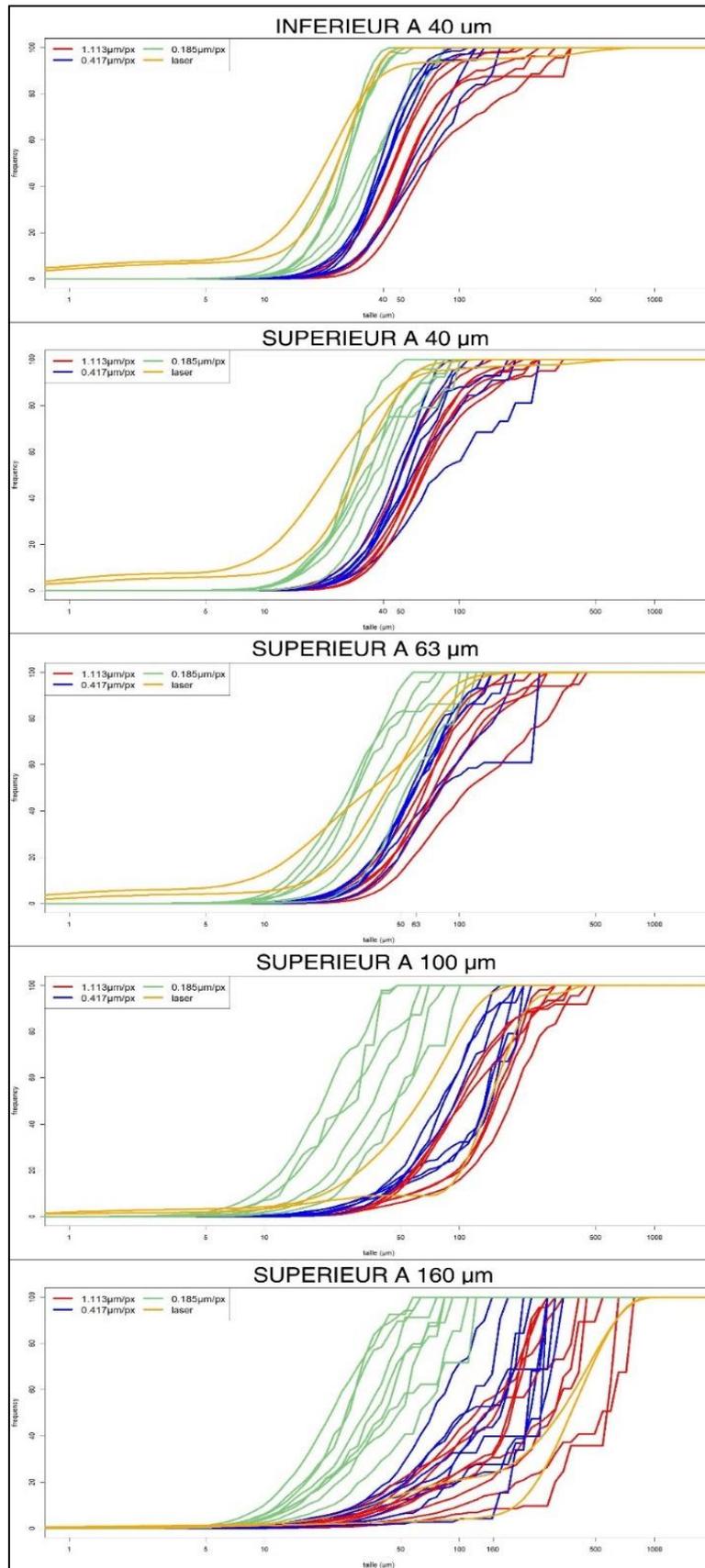


Figure 23 : spectres granulométriques des échantillons de sable tamisés mesurés avec différents grossissements

Afin d'observer comment la mesure de la taille avec les deux appareils réagissent suivant différents matériaux, 3 échantillons de nature et de préparation différentes (chapitre II.C.3) ont été utilisés. Ici, seul le grossissement minimum (1.113  $\mu\text{m}/\text{px}$ ) est utilisé. La Figure 24 montre tout d'abord une très bonne répétabilité du morphogranulomètre pour tous les échantillons (morpho 1 à 3). Les tests statistiques de conformité khi-deux ( $\chi^2$ ) confirment la similarité avec une valeur ( $p > 0,05$ ) pour chaque réplicat. On observe comme pour la Figure 23 l'absence de particules inférieures à 5  $\mu\text{m}$  sur les échantillons mesurés au morphogranulomètre présentant une fraction de fines importantes (Figure 24A et B). Les courbes semblent correspondre pour les particules supérieures à 5  $\mu\text{m}$ , on observe notamment une superposition quasi parfaite entre les deux méthodes pour le sable grossier (Figure 24C) qui ne présente aucune particule fine.

Le morphogranulomètre semble donc adapté pour la mesure de la taille dans la mesure où l'on reste dans une gamme de taille de 5  $\mu\text{m}$  à 1 mm.

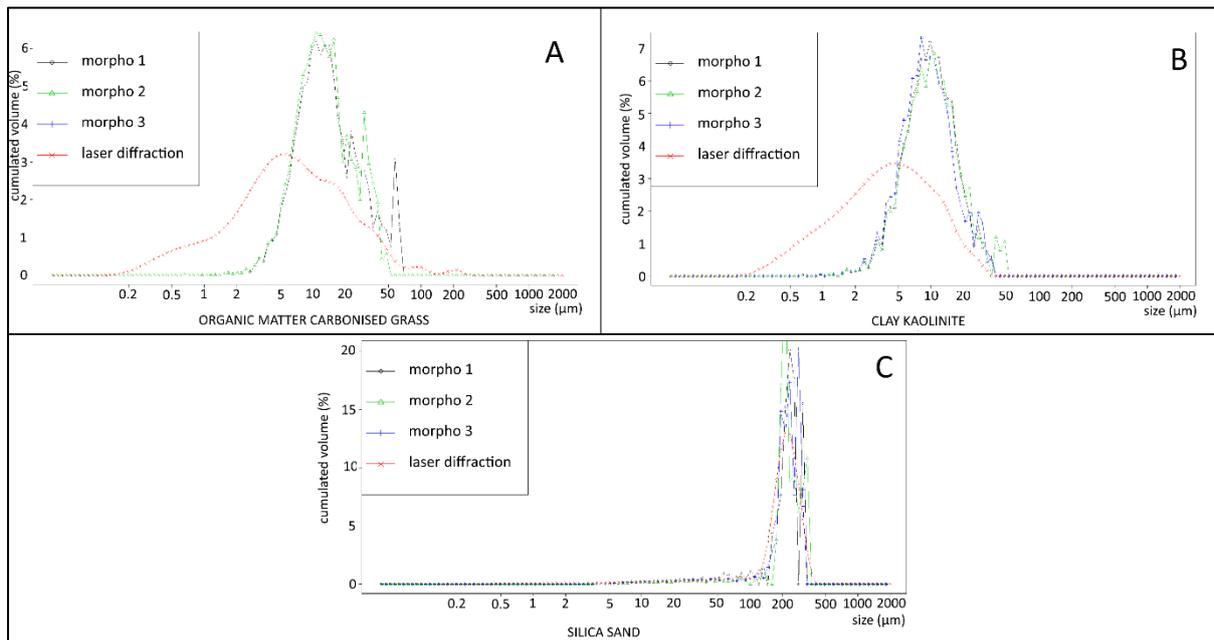


Figure 24 : Distribution de taille des particules en pourcentage de volume de 3 échantillons (A : herbe carbonisée ; B : Argile Kaolinite ; C : Sable de Silice). Morpho 1, 2 et 3 sont les différents réplicats mesurés au morphogranulomètre, la courbe rouge est la mesure au granulomètre laser.

## E. QUEL EST L'IMPACT DES DIFFERENTES PREPARATIONS SUR LA MESURE DE LA TAILLE ET DE LA FORME ?

### 1) Broyage et séchage sur des échantillons cohésifs

Les sédiments cohésifs sont des matériaux susceptibles de s'agréger entre eux sous certaines conditions chimiques et hydrodynamiques. Cette agrégation peut être à l'origine de modifications importantes des tailles et des formes. Fettweis (Fettweis et al., 2012; Lee et al., 2012) identifie quatre niveaux d'agréations dans des floccs issus de matière en suspension de la mer du Nord sur les côtes de la Belgique : (1) les particules primaires (0.1-4  $\mu\text{m}$ ), (2) les microflocs ou flocculi (4-20  $\mu\text{m}$ ), (3) les macroflocs (50-200  $\mu\text{m}$ ) et (5) les mégaflocs (>200  $\mu\text{m}$ ).

En laboratoire, il est fréquent d'utiliser différentes méthodes préparatoires telle que le broyage (après séchage) ou les ultrasons afin de limiter ces agrégations (Bartos et al., 2015; Franco et al., 2004; Pérez-Maqueda et al., 2005; Poli et al., 2008; Sánchez-Soto et al., 2000). Certains échantillons

présentés dans le chapitre II.C.3) comme les argiles et les matières organiques ont été obtenus broyés. Avant d'étudier la taille et la forme de ces échantillons, il est nécessaire de réaliser une analyse méthodologique évaluant l'impact de ce broyage et des ultrasons sur les échantillons cohésifs.

Pour observer l'impact du broyage sur les paramètres de taille et de forme des particules, différents prélèvements d'un même bassin versant (chapitre II.C.2)) ont été séchés puis broyés 5 et 10 minutes. A chaque étape (brut, séché et broyé), leur taille et leur forme ont été mesurées au granulomètre laser et au morphogranulomètre. Ce test va donc nous permettre de vérifier l'effet du séchage et du broyage sur ces mesures. Le broyage est réalisé avec un broyeur à bille en utilisant une fréquence fixe (la fréquence maximale de l'appareil) et en faisant varier la durée du broyage.

On observe clairement sur la Figure 25 l'effet du broyage et du séchage sur la taille des grains. Les échantillons séchés semblent avoir des distributions unimodales avec un mode autour de 70-90  $\mu\text{m}$  tandis que les échantillons bruts peuvent être plurimodaux, avec plus de fines autour de 5-30  $\mu\text{m}$ . Les échantillons broyés ont une forte asymétrie négative (décalage vers les fines) témoignant de la désagrégation des particules.

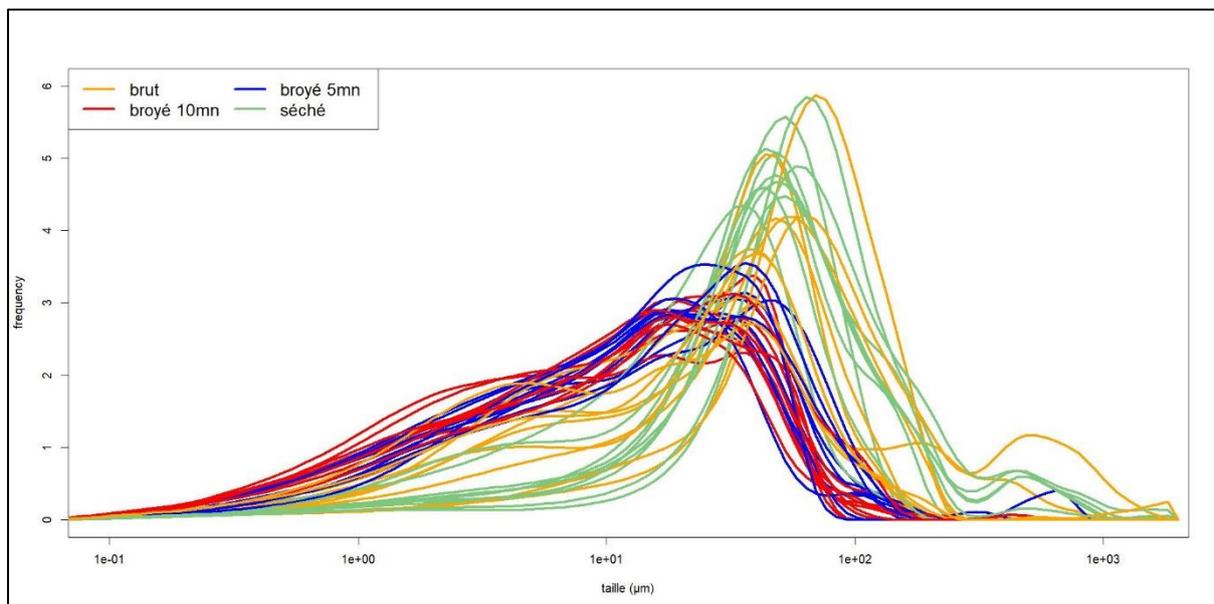


Figure 25 : Distributions granulométriques laser de différents échantillons ayant subi du séchage ainsi que plusieurs degrés de broyage

Ces observations se retrouvent lorsque l'on effectue une analyse en composantes principales (ACP) sur les paramètres statistiques calculés par Gradistat (Blott and Pye, 2001) à partir des distributions (Figure 26). Sur l'axe 1, notamment corrélé avec la médiane (D50) (Figure 26B), les sédiments bruts ont une grande variabilité à l'intérieur du groupe témoignant de l'hétérogénéité des particules qui les composent (Figure 26A) tandis que les échantillons séchés présentent la même dynamique mais avec une variabilité plus faible et une granulométrie plus forte. Par contre, les sédiments broyés ont des résultats très homogènes décalés vers une granulométrie plus fine (Figure 26A, liée à l'asymétrie observée précédemment) quelle que soit la nature de l'échantillon (Figure 26C). Le broyage gomme l'hétérogénéité naturelle due à la nature différente des échantillons que l'on observe sur les échantillons non préparés (Figure 26C). En effet, les échantillons ayant subi broyage et séchage sont

plus homogènes (Figure 26A). Les relations entre méthode et nature sur la taille des échantillons seront développées plus en détail avec les résultats du morphogranulomètre (Figure 28).

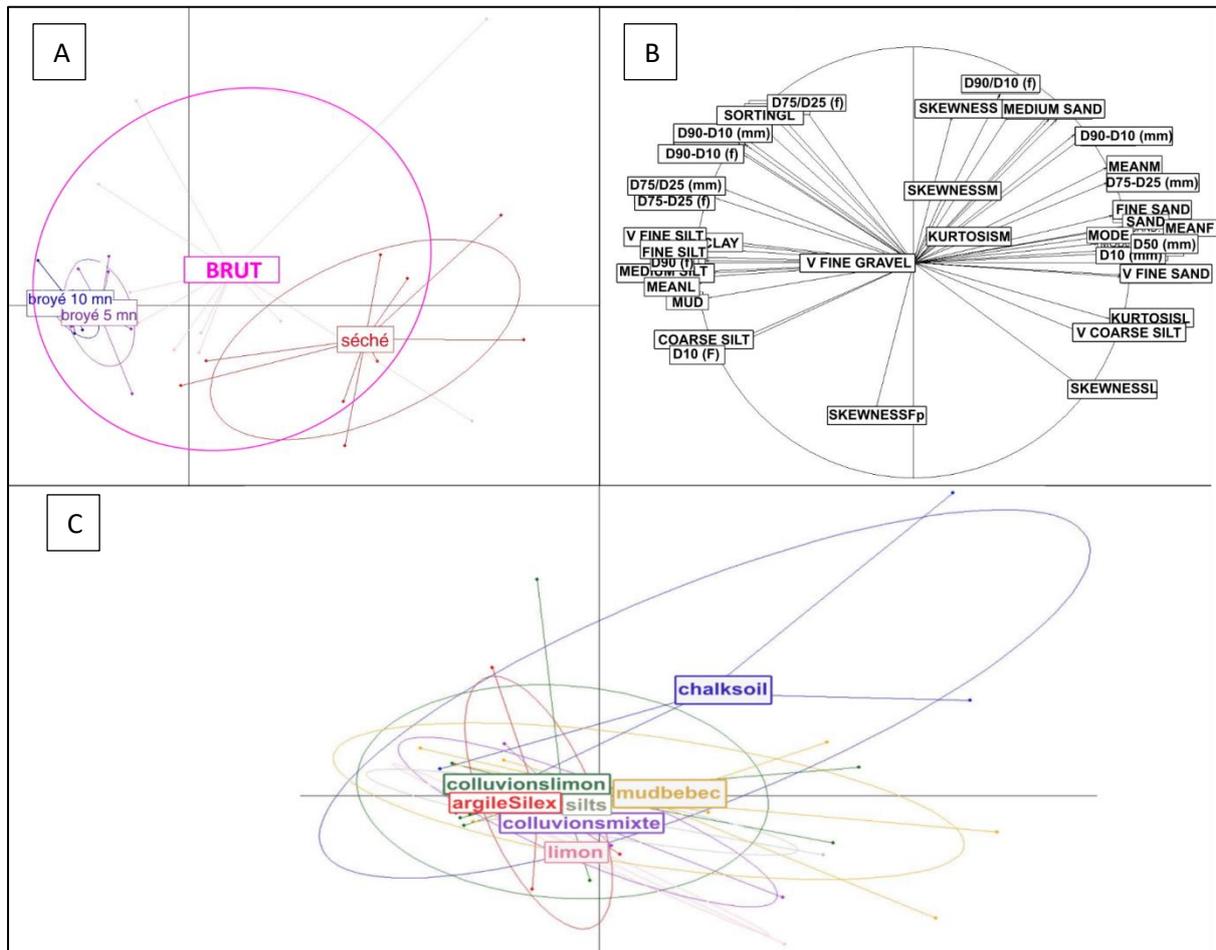


Figure 26 : Représentation échantillons cohésifs tests pour le broyage sur les axes 1 et 2 de l'ACP suivant leur valeur sur les paramètres statistiques calculés avec gradistat (Blott and Pye, 2001). A : échantillons classés par préparation; B : paramètres statistiques calculés par gradistats ; C : échantillons classés par nature

Lorsque l'on regarde la variation sur la taille et la forme avec le morphogranulomètre (Figure 27), on constate tout d'abord que 78% de la variabilité est expliquée par les axes 1 et 2. On observe sur l'axe 1, une variation des paramètres de taille (Area Diameter, Inner Diameter, Mean Diameter, Perim Diameter, Crofton Diameter, Width, Length, Ell Width, Ell Length, Outgrowth, Skeleton Length, Feret min, Feret Length, Max Distance, Geodesic Length, Fibre Thickness) et sur l'axe 2 les paramètres de forme (Bluntness, Roughness, Elongation, Aspect Ratio, Ell Elongation, Ell Roundness, Ell Ratio, Eccentricity, Straightness, Roundness, Compactness, Extent, Solidity, Convexity, Circularity). Pour les échantillons, les 3 types de préparations sont bien séparés. Il y a clairement une variation selon les deux axes 1 et 2 des échantillons bruts vers le séchage. Ce dernier augmente donc les valeurs de paramètres de taille comme de forme, la taille et l'irrégularité de la forme sont plus grandes. Ensuite, en broyant les échantillons séchés (B05 ou B10), on observe une variation suivant l'axe 2, avec la taille (Area Diameter et Width) qui diminue (action logique du broyage). Cette taille semble proche de celle des échantillons bruts mais est également plus homogène. L'altération de la forme observée sur le séchage semble persister avec une irrégularité légèrement plus grande que sur les

échantillons bruts. On observe peu de différences entre les groupes de 05 et de 10 minutes de broyage.

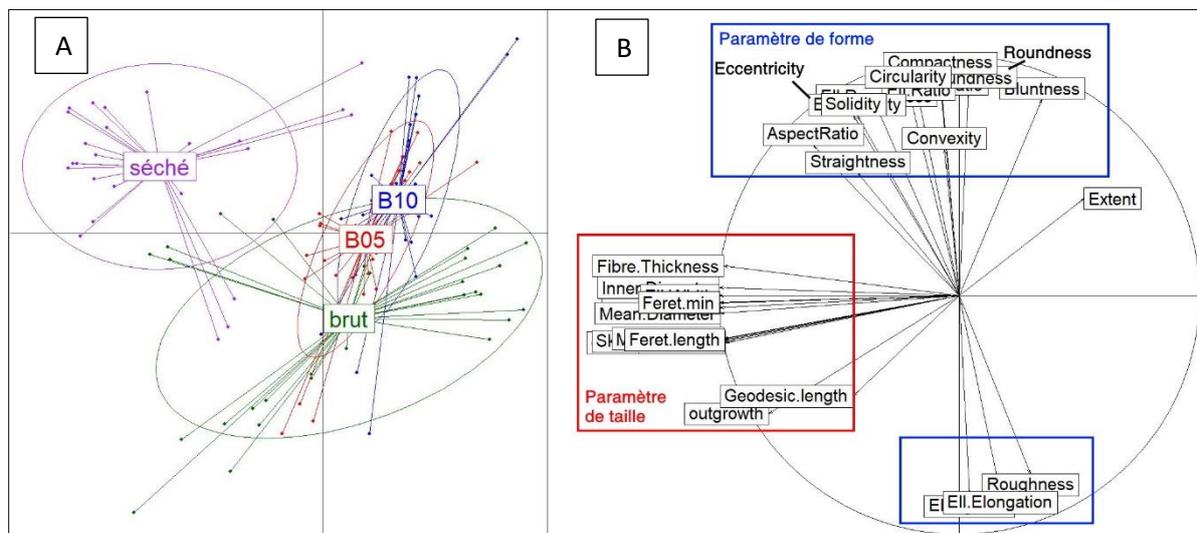


Figure 27 : Représentation des échantillons cohésifs tests pour le broyage sur les axes 1 et 2 de l'ACP (48 et 30% de la variabilité respectivement) suivant leur valeur sur les paramètres de taille et de forme mesurés par le morphogranulomètre. A : échantillons classés par préparation (B05= broyés 5 minutes, B10= broyés 10 minutes) ; B : paramètres de taille et de forme

Ces résultats montrent que le séchage et le broyage ont effectivement une influence significative sur les paramètres de taille et de forme des particules. Le séchage augmente la taille ainsi que toutes les valeurs de forme et réduit les contrastes entre échantillons (décalage sur l'axe 1 et sur l'axe 2 par rapport aux échantillons bruts), le broyage réduit la taille mais affecte moins les paramètres de forme dont les grandeurs restent proches des échantillons séchés (décalage sur l'axe 1 mais pas sur l'axe 2 par rapport aux échantillons séchés).

On constate également que pour le broyage ces variations dépendent du matériau analysé (Figure 28). Pour le séchage, les matériaux montrent tous une diminution sur l'axe 1 (augmentation de la taille) et une augmentation sur l'axe 2 (forme plus irrégulière). Après le broyage on constate par contre que pour les colluvions (mixte et limons) le broyage s'exprime principalement par une augmentation sur l'axe 1 (diminution de la taille), tandis que pour les limons, vase, silts et sol crayeux cette augmentation sur l'axe 1 se combine avec une diminution sur l'axe 2 (forme plus régulière). Enfin, dans le cas de l'argile à silex, la variation se fait principalement sur cette diminution sur l'axe 2.

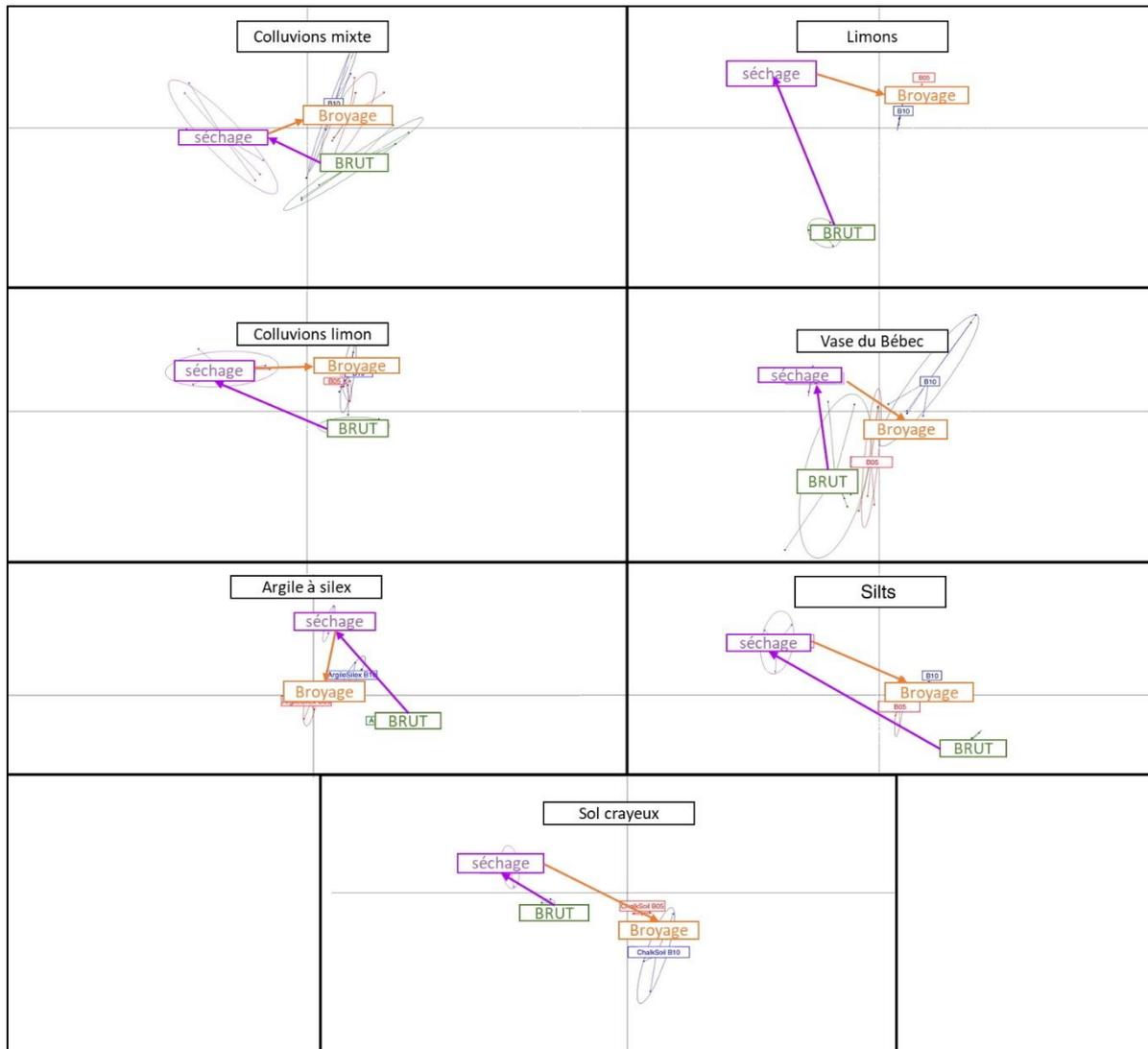


Figure 28 : Représentation des échantillons sur les axes 1 et 2 de l'ACP (48 et 30% de la variabilité) classés par nature et par préparation ; l'ACP a été réalisée sur tous les échantillons, les échantillons sont affichés un par un pour améliorer la lisibilité

De manière globale, comme pour la mesure au granulomètre laser, le broyage et le séchage altèrent la mesure de la forme et masquent les différences entre les échantillons. Par prudence, les matériaux broyés seront donc considérés avec une forme altérée, non représentatifs de leur nature originelle.

## 2) Ultrasons sur un échantillon cohésif

Un des échantillons de nature argileuse broyée, la kaolinite blanche (chapitre II.C.3)), a été testé pour observer l'impact des ultrasons sur sa taille et sa forme. Différentes durées ont été utilisées : 1, 5 puis 10 minutes ; et comparées à un échantillon sans ultrasons. La Figure 29 illustre les distributions granulométriques de ces différents tests.

Pour l'échantillon brut et celui avec 1 minute d'ultrasons, on observe un certain nombre de particules supérieures à 50  $\mu\text{m}$ . Ce n'est pas le cas pour les échantillons ayant subi 5 et 10 minutes d'ultrasons. Les particules de cette fraction sont des agrégats liés aux propriétés cohésives des argiles. On observe également une légère réduction de taille avec l'augmentation de la durée des ultrasons : le mode de la fraction inférieure à 50  $\mu\text{m}$  est autour de 15  $\mu\text{m}$  pour l'échantillon 1

minute, tandis qu'il passe à 13  $\mu\text{m}$  pour l'échantillon 05 minutes et 10  $\mu\text{m}$  pour l'échantillon 10 minutes.

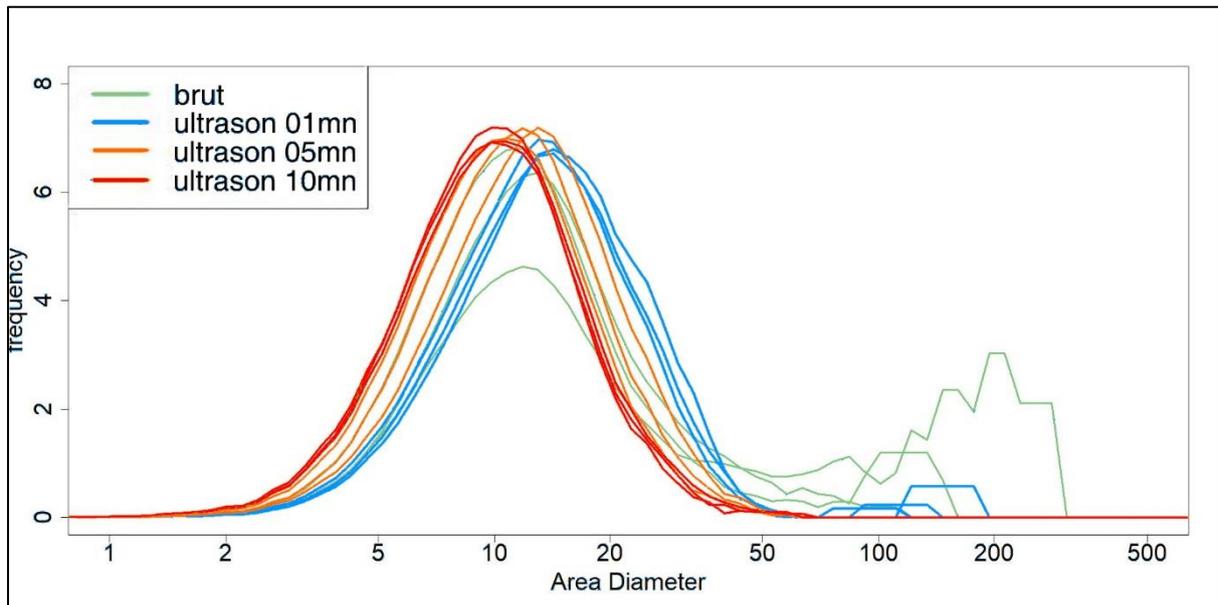


Figure 29 : Distributions granulométriques lasers de différents échantillons ayant subi plusieurs degrés d'ultrasons

Si l'on reprend la classification de Fettweis (Fettweis et al., 2012), la fraction observée avec un mode de 10-15  $\mu\text{m}$  correspond aux microflocs et les particules plus grossières seraient des macroflocs. Les ultrasons d'une durée d'au moins 5 minutes désagrègent les macroflocs et plus leur durée est importante, plus une réduction de taille va être observée. Ici, les ultrasons n'ont été appliqués que jusqu'à 10 minutes, mais Poli (Poli et al. 2008) a montré dans un article que les ultrasons appliqués sur plusieurs journées sont capables de désagréger des argiles jusqu'à leurs feuillets élémentaires.

Pour l'impact sur la forme, l'ACP en Figure 30 illustre la variation des différents tests avec les paramètres de taille et de forme. Sur l'axe 1 (68% de la variabilité), on retrouve la majorité des paramètres, la totalité des paramètres de taille (en positif) ainsi qu'une grande partie des paramètres de forme (en négatif). L'axe 2 (23% de variabilité) est corrélé avec les paramètres liés au rapport largeur/longueur (Elongation, Aspect Ratio, Feret Ratio, etc).

En ce qui concerne la répartition des échantillons sur ces axes, on observe d'une part que l'échantillon soumis à 1 minute d'ultrasons est très proche de l'échantillon brut et s'en différencie peu. L'échantillon ayant subi 05 minutes d'ultrasons est à la fois plus bas sur l'axe 1 et l'axe 2. Cela traduit une plus petite taille et une forme plus émoussée (axe 1) ainsi que des particules plus allongées (axe 2). L'échantillon « 10 minutes » est surtout plus négatif sur l'axe 1 par rapport à l'échantillon brut. Il présente les plus petites tailles et des formes émoussées.

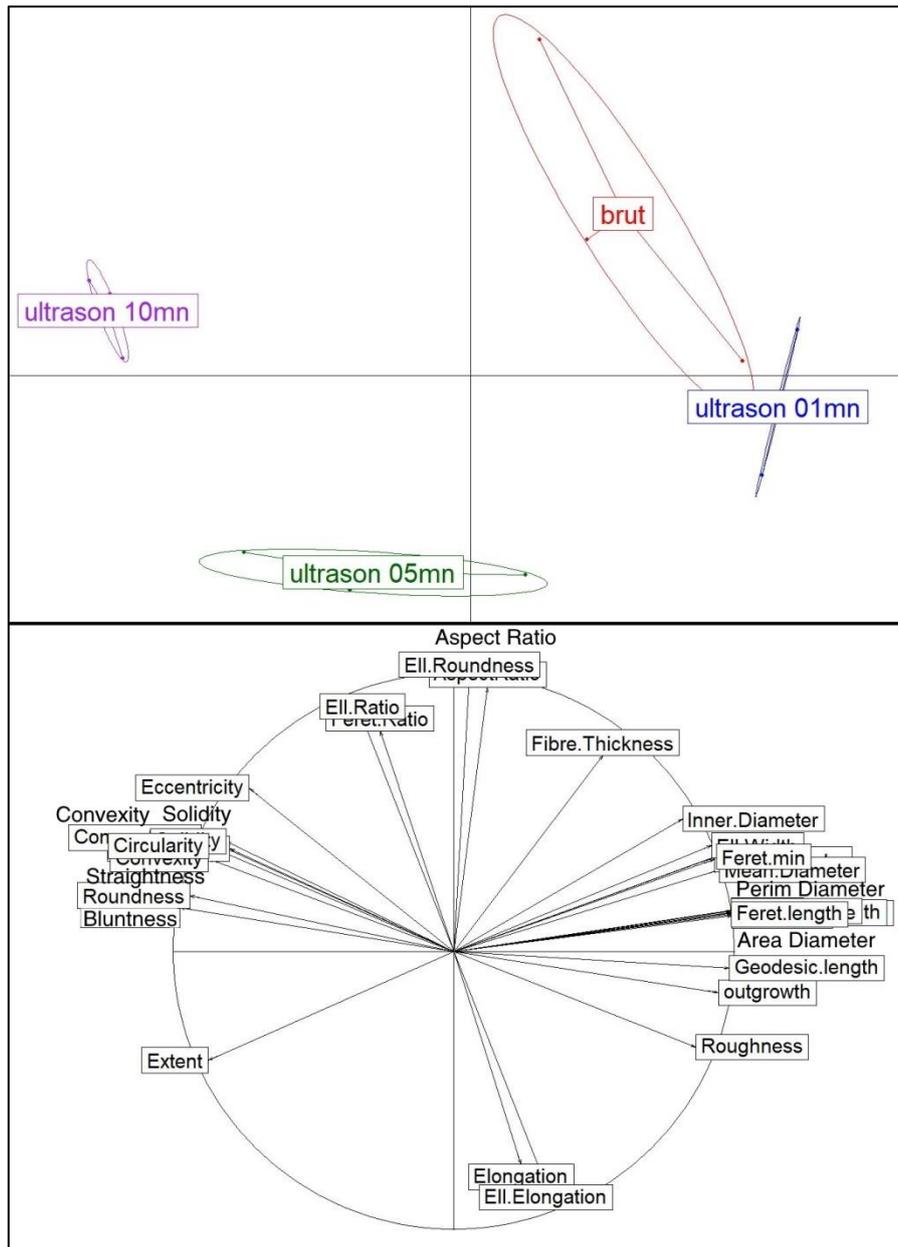


Figure 30 : Représentation de l'échantillon d'argile avec et sans ultrasons sur les axes 1 et 2 de l'ACP (68 et 23% de la variabilité respectivement) suivant leur valeur sur les paramètres de taille et de forme mesurés par le morphogranulomètre

Comme mentionné précédemment, Poli (Poli et al. 2008) a montré que les ultrasons sont capables de désagréger des argiles jusqu'à leurs feuillets élémentaires. Mais réduire une argile à sa couche élémentaire (d'une épaisseur  $<1 \mu\text{m}$ ) nécessite un puissant agent dispersant et/ou des ultrasons pendant une très longue durée (plusieurs jours). Ce qui rend la préparation beaucoup plus longue alors que la mesure au morphogranulomètre dure entre 5 et 15 minutes. De plus, cette forme élémentaire se retrouve rarement telle quelle dans un sédiment ou en suspension dans une eau naturelle où l'on observera principalement des microflocs et macroflocs (Fettweis et al., 2012). Il sera considéré dans cette étude que les particules d'argile mesurées après 10 minutes d'ultrasons présentent des formes proches des celles retrouvées dans la nature. Cette préparation a été choisie car elle permet d'avoir une population granulométrique unique. Des études supplémentaires devront être réalisés afin de confirmer que ces formes sont réalistes pour des sédiments argileux.

### 3)Centrifugation de sédiments en suspension

Lors de la récupération des échantillons de pièges à sédiment de type TIMS (chapitre II.C.2)), ceux-ci sont centrifugés pour en concentrer la matière en suspension en chassant l'eau. Pour observer l'effet de cette préparation, une ACP entre les échantillons centrifugés et les échantillons « bruts » (la mesure brute est faite sur un prélèvement d'une partie des sédiments du piège (1 litre après un mélange manuel). L'ACP (Figure 31) montre sur l'axe 1 (49% de variabilité) des paramètres de taille (Area Diameter, Length, Ell. Length, etc) et de forme (Convexity Straightness, Eccentricity, etc) alors que sur l'axe 2 (36% de variabilité) on retrouve une autre combinaison de paramètres de taille et forme (Inner Diameter, Ferret Ratio, Elongation, Compactness, Roundness, etc). Certains paramètres de forme sont corrélés selon une combinaison des deux axes (Aspect Ratio, Solidity, Circularity, Roughness). C'est selon cette combinaison que l'on constate une différence nette entre la préparation et les échantillons bruts suivant plusieurs paramètres de taille et de forme (axe 1, Area Diameter, Compactness, Elongation, Roundness, Inner Diameter, etc). Les deux groupes se distinguent très bien selon l'axe 2, mais reste proche dans leurs valeurs sur F1. La centrifugation a donc un effet non négligeable sur la mesure de la forme des particules.

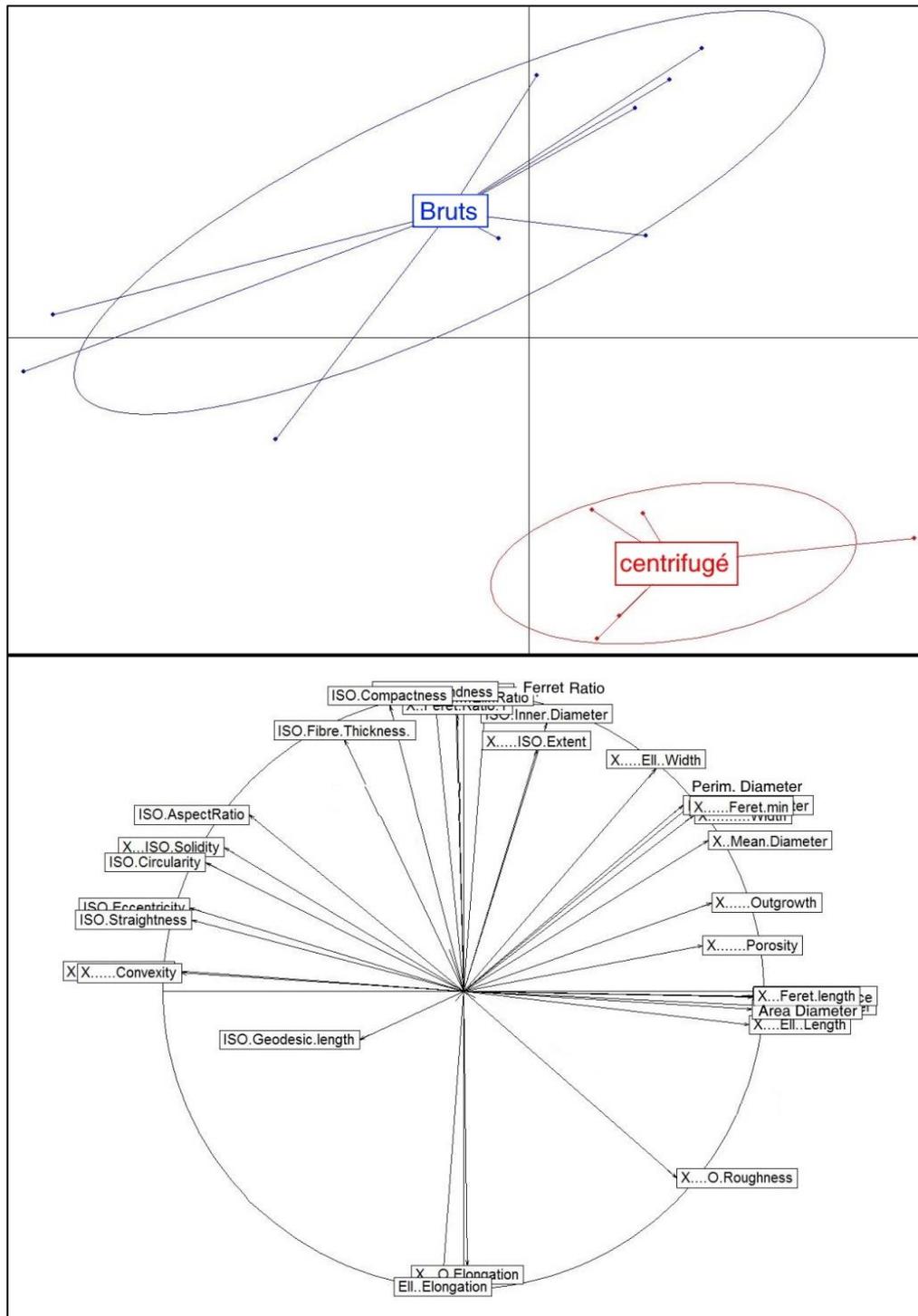


Figure 31 : représentation des différents échantillons de pièges à sédiments, centrifugés ou non (bruts), sur les axes 1 et 2 de l'ACP (49% et 36% de variabilité) sur tous les paramètres de taille et de forme

Tout comme le broyage, le séchage et les ultrasons, la centrifugation altère principalement la forme globale des particules (aspect Ratio, Elongation, Extent, Straightness, etc) et leur contour (Roughness, Bluntness, Solidity). Ceci est probablement dû à une agrégation des particules cohésives lors du processus. Les sédiments centrifugés ont donc une forme altérée et ne sont pas représentatifs de leur forme naturelle.

Néanmoins, une altération naturelle peut elle-même modifier la taille et la forme des sédiments de manière similaire aux préparations réalisées (broyage lors du transport, séchage après dépôts, compactage après enfouissement, etc). Malgré la transformation qu'ils ont pu subir en laboratoire, l'analyse de la morphogranulométrie de ces sédiments « artificiellement altérés » reste donc pertinente pour vérifier la capacité du morphogranulomètre à les différencier d'autres sédiments.

Ces sédiments ayant subi une préparation ne seront pas interprétés comme représentant des tailles et formes naturelles, mais bien comme la combinaison d'une nature et d'une préparation en laboratoire.

## F. EST-CE QUE LA FORME DISCRIMINE DES ECHANTILLONS DE NATURE ET PREPARATION UNIQUES ?

### 1) Identification de la nature des échantillons

Les échantillons utilisés pour cette calibration sont présentés au chapitre II.C.3) et sont de nature et origine diverses. Pour examiner la répartition des échantillons, une classification hiérarchique de Ward a été effectuée sur les résultats de l'ACP (HCPC (Husson et al 2010), Figure 32). Lors du partitionnement des données autour des médoïds (PAM) utilisé pour obtenir le nombre de groupes optimal sur la base de la décomposition de la variance, 5 groupes ont été trouvés (Figure 33). On s'aperçoit que ces 5 groupes sont caractérisés par leur nature : i) tous les échantillons de matière organique sont regroupés ensemble, ii) le sable de silice est associé à l'échantillon de grenats, iii) les pollens de petites tailles et de formes régulières (un seul ballonnet), iv) les diatomées, et v) les pollens de plus grande taille et de forme irrégulière (pin et sapin, plusieurs ballonnets) associés aux argiles.

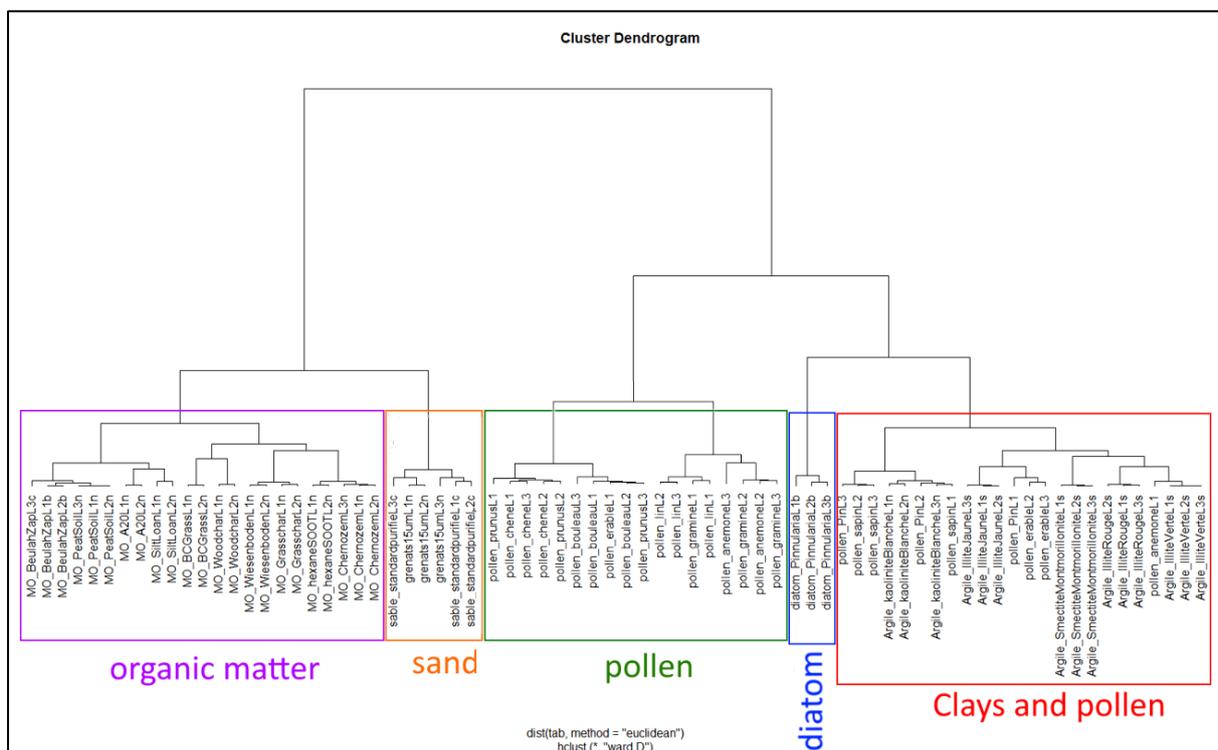


Figure 32 : classification hiérarchique de Ward sur les résultats de l'ACP (HCPC)

La classification montre le lien entre la nature et la forme d'une particule. On observe dans le dernier groupe associant des argiles et des pollens irréguliers que des particules de natures différentes mais

de formes similaires ne peuvent pas être discriminées ; même chose pour les différents types de matière organique.

La classification a permis d'observer une discrimination entre plusieurs groupes, mais elle ne permet pas d'observer quelles sont les caractéristiques de ces groupes. Pour cela, il faut revenir sur l'ACP à partir de laquelle la CAH a été réalisée.

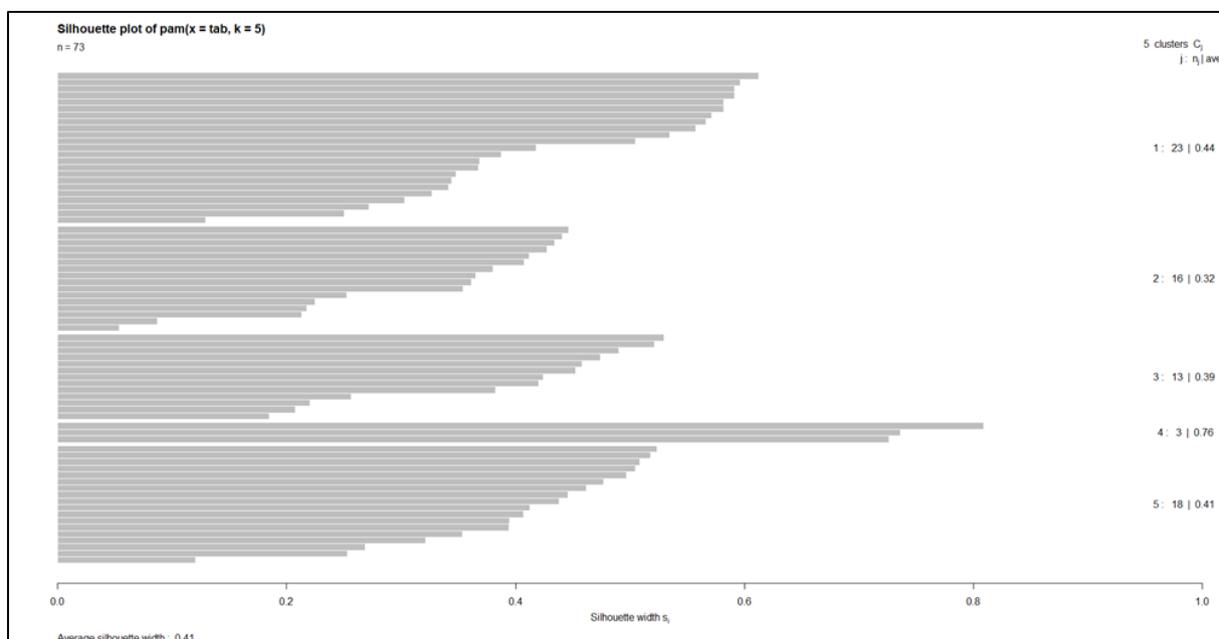


Figure 33 : Représentation graphique en silhouette du partitionnement des échantillons optimal (en 5 groupes/clusters)

Afin de définir dans quelle mesure cette classification est en relation avec les paramètres de forme et leurs variations, on va observer l'analyse en composantes principales (ACP). Comme mentionné précédemment elle a été effectuée sur la valeur moyenne de la distribution de chaque échantillon dans chacun des 36 paramètres (Figure 3, Figure 4, Tableau 2). La moyenne a été choisie afin de résumer et simplifier la prospection et la description des données. Les distributions complètes seront analysées à posteriori.

Suivant l'axe 1 (Tableau 4, Figure 34), qui représente 50,3% de la variance, tous les paramètres de taille (Area Diameter, Inner Diameter, Length, Width, Ferret Length, Ellipse Length, etc.) varient de manière très similaire. La plupart des paramètres de forme ont également une assez bonne corrélation avec cet axe.

Les autres dimensions de l'ACP (axe 2 et 3, Tableau 4) regroupent des paramètres de forme, par exemple Elongation and Ferret Ratio, Ellipse Ratio et Ellipse Elongation ou ISO Straightness et ISO Eccentricity. La plupart des paramètres ayant une forte corrélation avec dim3 ont également une forte corrélation avec dim2.

Le deuxième axe, dim2 (Figure 34, Tableau 4), représente 30,3% de la variance. Il est très bien corrélé (corrélation > 0,4) à des paramètres de forme tels que Straightness, Solidity, Eccentricity, Circularity, Bluntness, Roughness, etc. Certains de ces paramètres ont des formules très similaires (Bluntness et Roughness, Elongation et Ell. (Ellipse) Elongation, par exemple). Ces paramètres semblent plutôt liés au contour de la particule.

Le troisième axe de dimension, dim3 (Figure 35, Tableau 4), représente 10,9% de la variance et est principalement corrélé avec ISO Straightness, Convexity, O. Elongation, Ellipse Elongation, Ellipse

Ratio, Feret Ratio, Roundness, Ellipse Roundness, etc (corrélation > 0.4). Les autres dimensions représentent moins de 5% de la variation totale. Ces paramètres semblent plutôt liés à la forme globale, en particulier à l'élongation, aux ratios largeur/longueur, des particules.

Tableau 4 : corrélation entre les paramètres et les 3 dimensions de l'ACP ; les paramètres ayant les corrélations les plus fortes avec une dimension sont en jaune

	dim 1	dim 2	dim 3
ISO.Area.Diameter	-0.959	-0.196	-0.104
ISO.Inner.Diameter	-0.929	-0.306	-0.092
X..Mean.Diameter	-0.964	-0.168	-0.110
Perim..Diameter	-0.978	0.018	0.025
Crofton.Diameter	-0.978	0.018	0.025
X.....Width	-0.958	-0.217	-0.079
X.....Length	-0.976	-0.038	-0.105
X....Ell..Width	-0.948	-0.250	-0.080
X....Ell..Length	-0.973	-0.016	-0.111
X.....Outgrowth	-0.815	0.336	-0.068
Skeleton.Length	-0.979	-0.028	-0.090
X..Feret.Ratio.1	-0.137	-0.868	0.456
ISO.Max.Distance	-0.977	-0.040	-0.103
ISO.Geodesic.length	-0.559	-0.004	0.097
ISO.Fibre.Thickness.	-0.878	-0.389	-0.187
X....O.Bluntness	0.784	-0.485	-0.282
X....O.Roughness	-0.534	0.701	0.381
X...O.Elongation	0.129	0.854	-0.477
ISO.AspectRatio	-0.256	-0.800	-0.200
Ell..Elongation	0.218	0.839	-0.480
X.Ell..Roundness	-0.310	-0.828	0.381
X....Ell..Ratio	-0.218	-0.839	0.480
ISO.Eccentricity	0.426	-0.768	-0.452
ISO.Straightness	0.535	-0.607	-0.570
X..ISO.Roundness	0.082	-0.861	0.435
ISO.Compactness	0.068	-0.924	0.343
X....ISO.Extent	0.439	-0.345	0.459
X...ISO.Solidity	0.343	-0.839	-0.353
X.....Convexity	0.719	-0.478	-0.472
ISO.Circularity	0.495	-0.806	-0.255
X.....Feret.min	-0.957	-0.220	-0.077

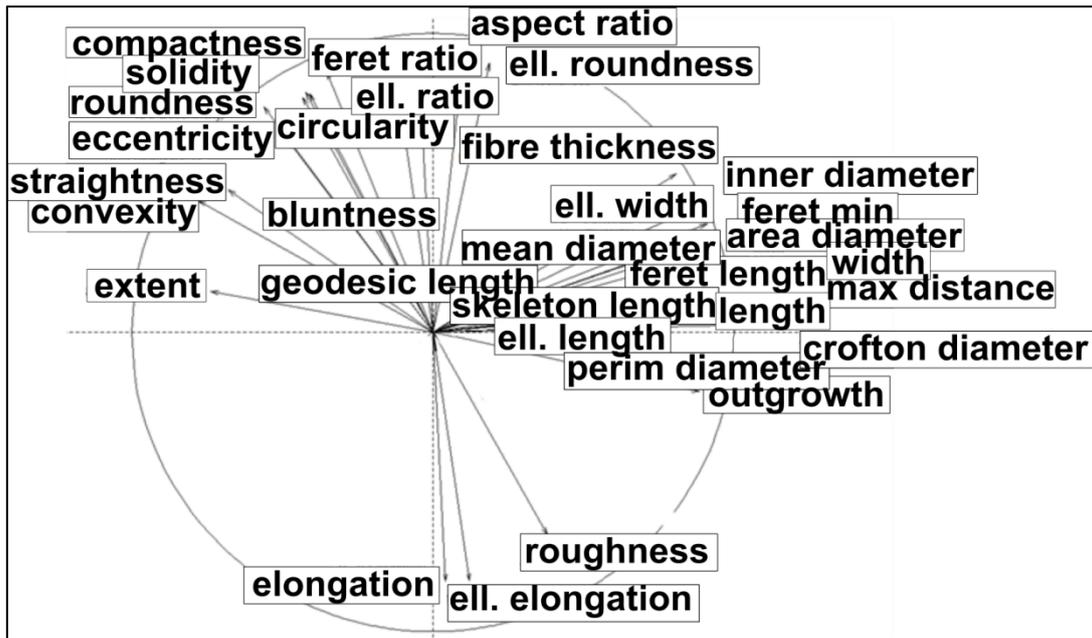


Figure 34 : paramètres de taille et de forme sur les dimensions 1 et 2 de l'ACP

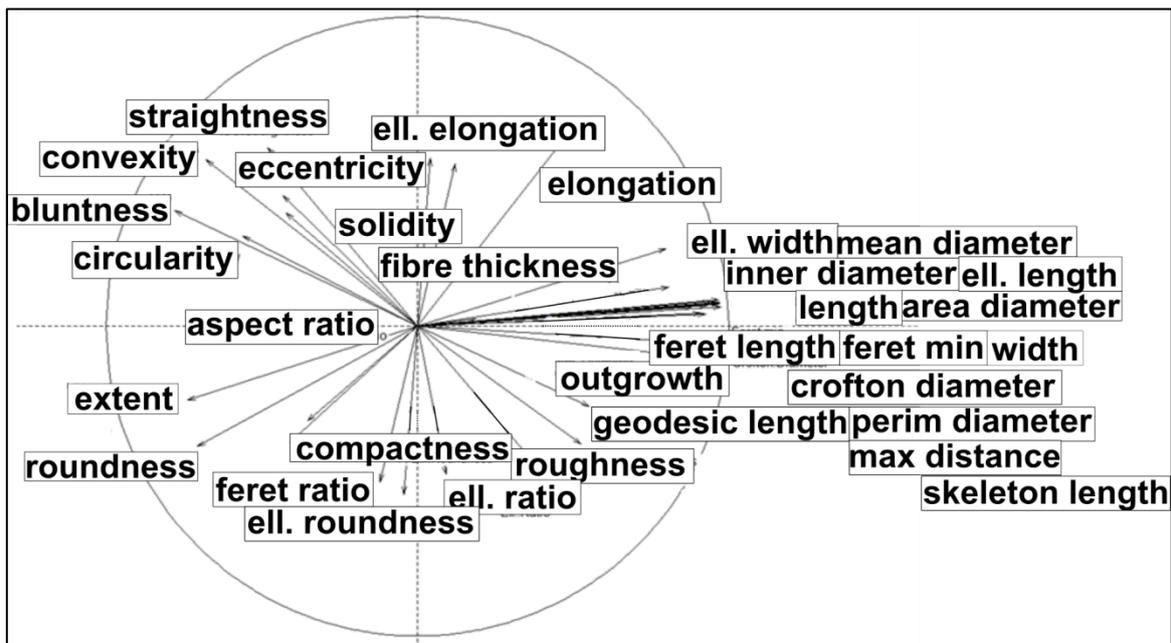


Figure 35 : paramètres de taille et de forme sur les dimensions 1 et 3 de l'ACP

Les Figure 36 et Figure 37 illustrent la répartition des groupes définis par la classification en fonction de ces paramètres. On observe sur l'axe 1, la discrimination par la taille, avec à une extrémité les sables, diatomées et matières organiques et à l'autre, les argiles et les pollens (ce dernier groupe présente une très forte variabilité et certains échantillons présentent des tailles élevées).

Sur l'axe 2, on observe les diatomées avec des valeurs très négatives, qui se démarquent fortement des autres groupes. Cette espèce de diatomée est très atypique de par sa forme rectangulaire très régulière. Les paramètres de contour semblent donc traduire cette propriété. Les sables et les pollens forment les valeurs extrêmes opposées, avec les argiles et matière organiques légèrement plus basses.

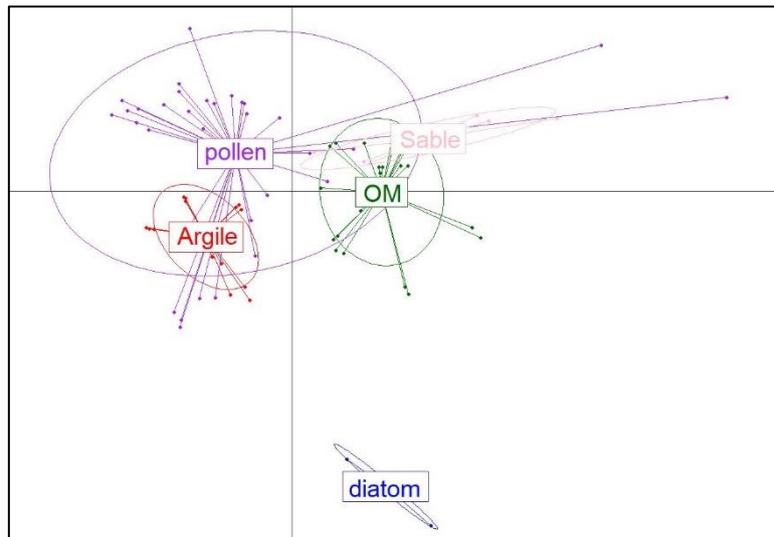


Figure 36 : représentation des échantillons sur les dimensions 1 et 2 de l'ACP

Sur l'axe 3, on observe également en opposition les sables et diatomées. Les sables plus positifs et les diatomées les plus négatives. Les argiles sont plus proches des diatomées alors que les pollens et matières organiques restent au centre de l'ACP. Les pollens montrent toutefois une grande variabilité sur cet axe et certains points montrent des valeurs négatives plus basses que les diatomées. Cette variabilité peut être liée aux différentes formes que peuvent prendre les pollens testés : certains présentent une forme quasi circulaire avec un seul « ballonnet » alors que d'autres sont formés de trois « ballonnets ».

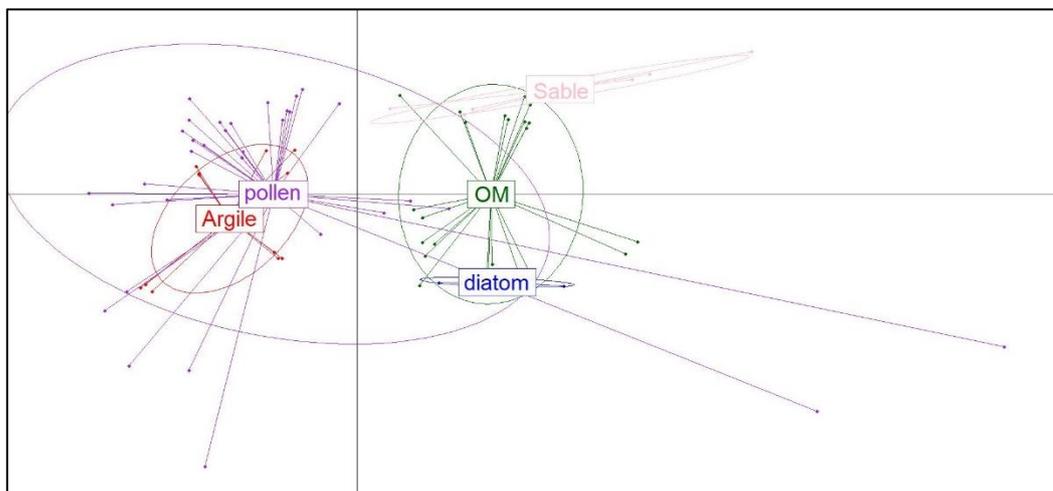


Figure 37 : représentation des échantillon sur les dimensions 1 et 3 de l'ACP

Sur cette ACP de nombreux paramètres ont des variations similaires, ce qui n'est pas surprenant compte tenu que beaucoup ont des formules mathématiques très proches, impliquant parfois les mêmes variables d'entrée (I.B.2)).

En réalisant un test de colinéarité (résultats en annexe) on observe de très fortes colinéarités entre les paramètres suivants :

- Area Diameter, Inner Diameter, Mean Diameter, Skeleton Length, Max distance, Fibre Thickness et Outgrowth (paramètres de taille) ;
- Perimeter Diameter et Crofton Diameter ;

- Width/Length et respectivement Ellipse Width/Ellipse Length ;
- Bluntness et Outgrowth ;
- Feret Ratio, Eccentricity, Roundness, Ellipse Ratio, Ellipse Roundness, Aspect Ratio et Compactness ;
- Circularity et Solidity.

Pour la réalisation d'un modèle linéaire et afin d'éviter d'analyser plusieurs fois la même information, le jeu de paramètre a été réduit au 12 variables suivantes :

4 paramètres de taille : Area Diameter, Crofton Diameter, Width, Length ; 5 paramètres de forme globale : Elongation, Eccentricity, Extent, Convexity et Circularity ; et 3 paramètres de contour : Bluntness, Roughness, Straightness.

Pour vérifier que cette réduction dans le nombre de paramètre permet toujours de discriminer les échantillons aussi bien qu'avant, deux analyses factorielles discriminantes (AFD) ont été réalisées. Une sur l'ACP sur tous les 36 paramètres mesurés (Figure 38), l'autre sur les 12 paramètres sélectionnés (Figure 39).

La Figure 38 montre que chaque groupe est bien identifiable par le modèle de l'AFD, certains groupes comme celui des diatomées sont très éloignés alors que le sable, la matière organique (OM géologique et OM-soil) et l'argile sont assez proches.

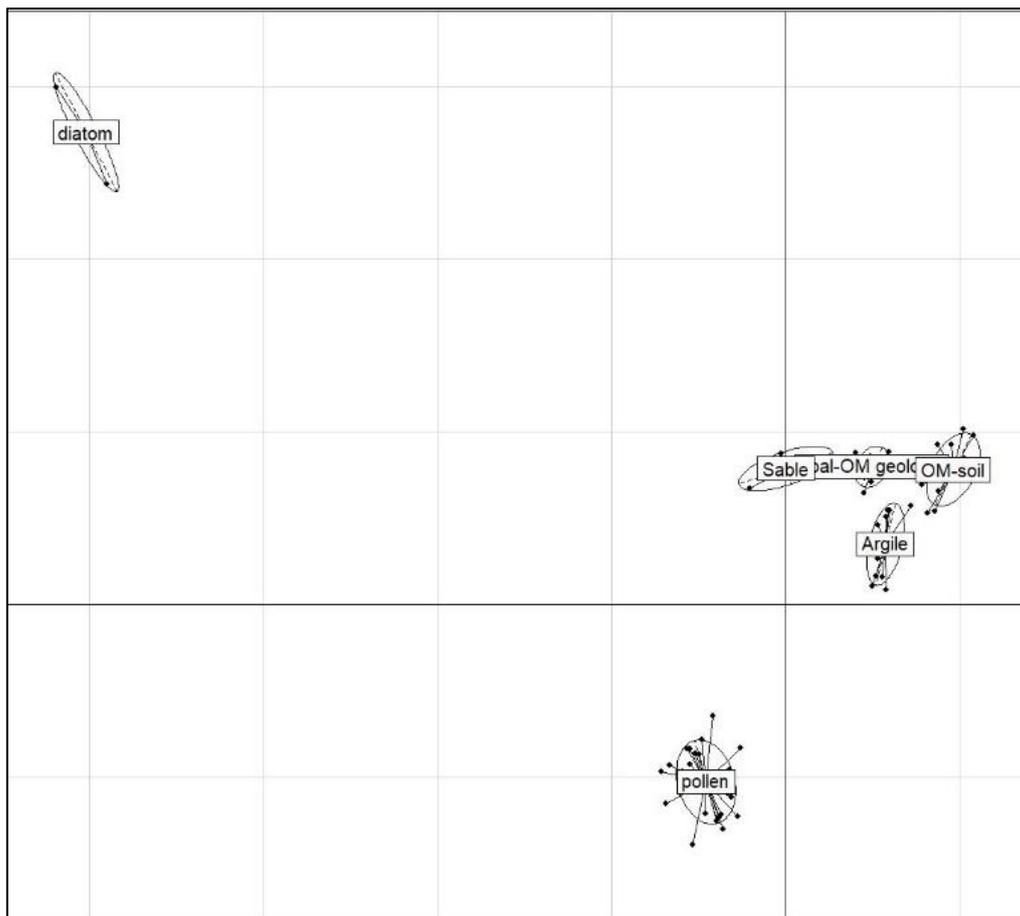


Figure 38 : Projections des individus dans le plan défini par les axes de l'AFD sur les 36 paramètres initiaux. Les groupes sont représentés par des ellipses de variance intra-groupe où les centres sont les médoides

Sur la Figure 39 on distingue également chaque groupe les uns des autres. Certains groupes sont plus rapprochés des autres mais reste bien identifiables.

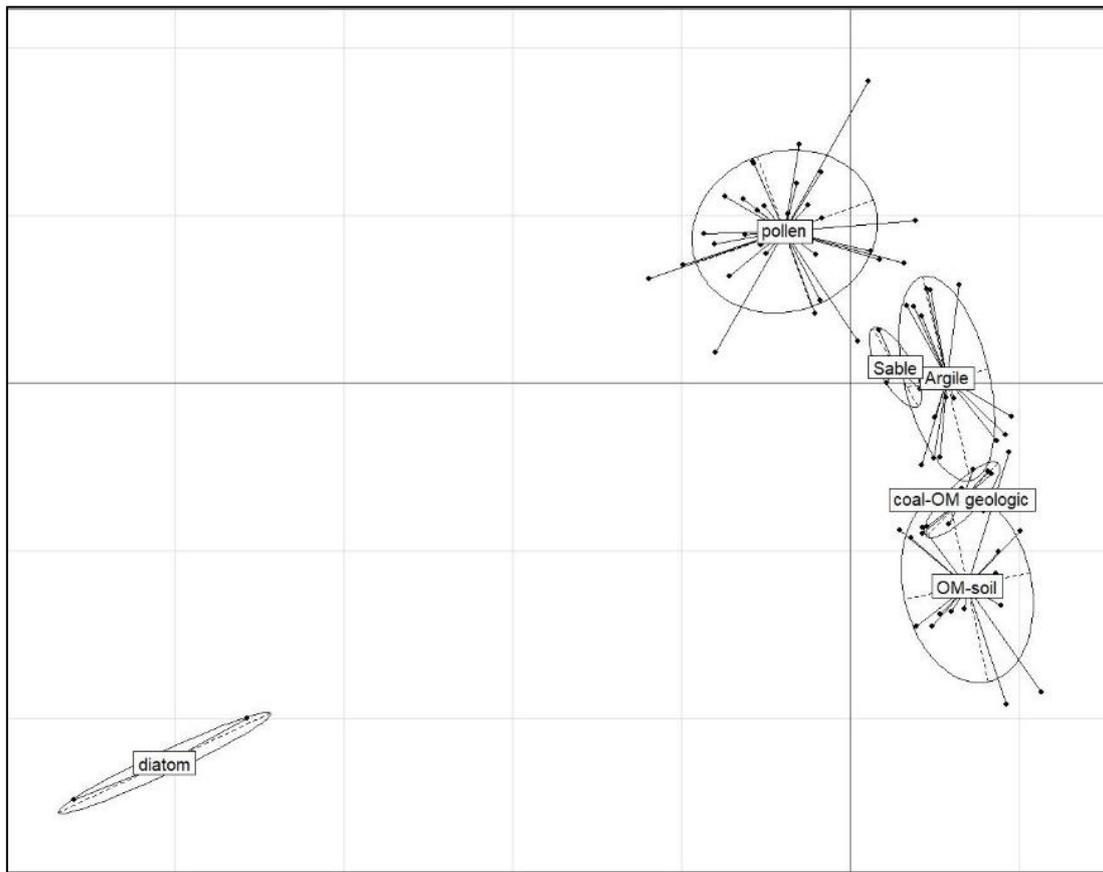


Figure 39 : Projections des individus dans le plan défini par les axes de l'AFD sur les 12 paramètres sélectionnés, Les groupes sont représentés par des ellipses où les centres sont les moyennes et les ellipses les variances intra-groupes

Si l'on regarde les recombinaisons entre les modèles et les échantillons (matrice de confusion) (Tableau 5), on observe des résultats quasi identiques entre les deux AFD, avec 17% de recombinaisons seulement. Ces tests permettent de conclure qu'il est possible d'analyser les données avec seulement 12 paramètres sans perdre d'information essentielle tout en simplifiant les calculs et les interprétations.

Tableau 5 : Matrices de confusion de l'AFD sur les ACP ; tableau supérieur ACP avec tous les paramètres ; tableau inférieur ACP avec les 12 paramètres sélectionnés

fac acp a11	Argile	charbon-OM geol	diatom	OM-soil	pollen	Sable
Argile	12	0	0	0	3	0
charbon-OM geol	0	6	0	0	2	0
diatom	0	0	3	0	0	0
OM-soil	0	0	0	13	2	0
pollen	5	0	0	2	26	0
Sable	0	2	0	0	1	0
fac acp 12 param	Argile	charbon-OM geol	diatom	OM-soil	pollen	Sable
Argile	12	0	0	0	3	0
charbon-OM geol	0	6	0	0	2	0
diatom	0	0	3	0	0	0
OM-soil	0	2	0	13	0	0
pollen	5	0	0	2	26	0
Sable	0	2	0	0	1	0

Pour une représentation graphique plus simple, il est envisageable de représenter les données des échantillons avec 3 paramètres seulement parmi les 12 sélectionnés, puisque l'ACP a montré que plus de 90% de la variabilité peut être expliquée par trois dimensions. Les paramètres sélectionnés sont un paramètre de taille : Area Diameter ; et deux paramètres de forme : l'un corrélé avec dim1 et dim2, O. Bluntness ; l'autre corrélé avec dim2 et dim3, ISO Straightness.

Le choix entre les 12 paramètres a été motivé par les critères suivants :

- Ils sont tous fortement corrélés à une des 3 premières dimensions de l'ACP afin de représenter la variabilité au maximum.
- Mitchell et Soga (Mitchell et Soga 2005) classifient les paramètres de forme en fonction de leur échelle : un paramètre peut caractériser la morphologie (grande échelle), le contour (intermédiaire) ou la texture du contour (petite échelle). Les 3 paramètres sélectionnés pour la représentation des tracés 3D ont été choisis en accord avec cette classification : Area Diameter est un paramètre de taille, la Straightness caractérise la morphologie globale et enfin la Bluntness est liée à la texture du contour.
- Parmi tous les paramètres correspondant aux critères précédents, la combinaison Area Diameter, Straightness et Bluntness présente le moins de recombinaison lorsque l'on réalise une AFD (19% de recombinaison).

Tableau 6 : matrice de confusion de l'AFD sur les échantillons avec les 3 paramètres Area Diameter – Straightness - Bluntness

fac XYZ ASB	Argile	coal-OM geol	diatom	OM-soil	pollen	Sable
Argile	14	0	0	1	0	0
coal-OM geol	2	6	0	0	0	0
diatom	0	0	3	0	0	0
OM-soil	0	4	0	11	0	0
pollen	4	0	0	0	28	1
Sable	0	2	0	0	1	3

Des tests d'indépendance de Kruskal-Wallis (données non normalement distribuées) ont été réalisés pour confirmer si ces 3 paramètres distinguaient de manière significative la distribution des échantillons entre eux.

Tous les couples possibles sont indépendants sur au moins un des 3 paramètres (résultats en annexe). Tous les groupes ont donc au moins un paramètre permettant de les distinguer. Ce test confirme que cette combinaison de 3 paramètres est bien capable de discriminer tous nos groupes de particules. Étant donné que les 3 paramètres combinés passent les tests d'indépendance entre tous les groupes, les analyses peuvent être représentées par ces 3 valeurs sur un diagramme 3D. La moyenne de chaque répétition de chaque échantillon est indiquée sur le diagramme (Figure 40).

Le sable de silice (bleu), les argiles (rouge foncé) et les échantillons de matière organique (OM) (vert foncé) se distinguent clairement. Les argiles se caractérisent par un Area Diameter faible (inférieur à 50  $\mu\text{m}$ ), une Straightness moyenne relativement élevée (0,98 à 0,99) et une Bluntness moyenne élevée (0,92 à 0,94). Comme l'a déjà montré la classification hiérarchique de Ward, certaines argiles et pollens ont une signature très proche en raison de leur taille similaire, mais la plupart des pollens ont visiblement une plus grande Bluntness moyenne (0,94 à 0,96) et plus grande Straightness (supérieure à 0,985). Le sable de silice a également une Straightness (environ 0,985) et Bluntness élevée (0,92 à 0,94), mais un Area Diameter moyen beaucoup plus élevé (environ 150  $\mu\text{m}$ ). Les matières organiques, en particulier les échantillons carbonisés, ont des Area Diameter moyen très variables (entre 15 et 100  $\mu\text{m}$ ), une faible Bluntness (moins de 0,91) et une Straightness variable (la plupart des échantillons ont une valeur inférieure à 0,98). L'échantillon de tourbe a un Area Diameter moyen plus important que ceux des autres échantillons de matière organique (environ 75 à 100  $\mu\text{m}$ ).

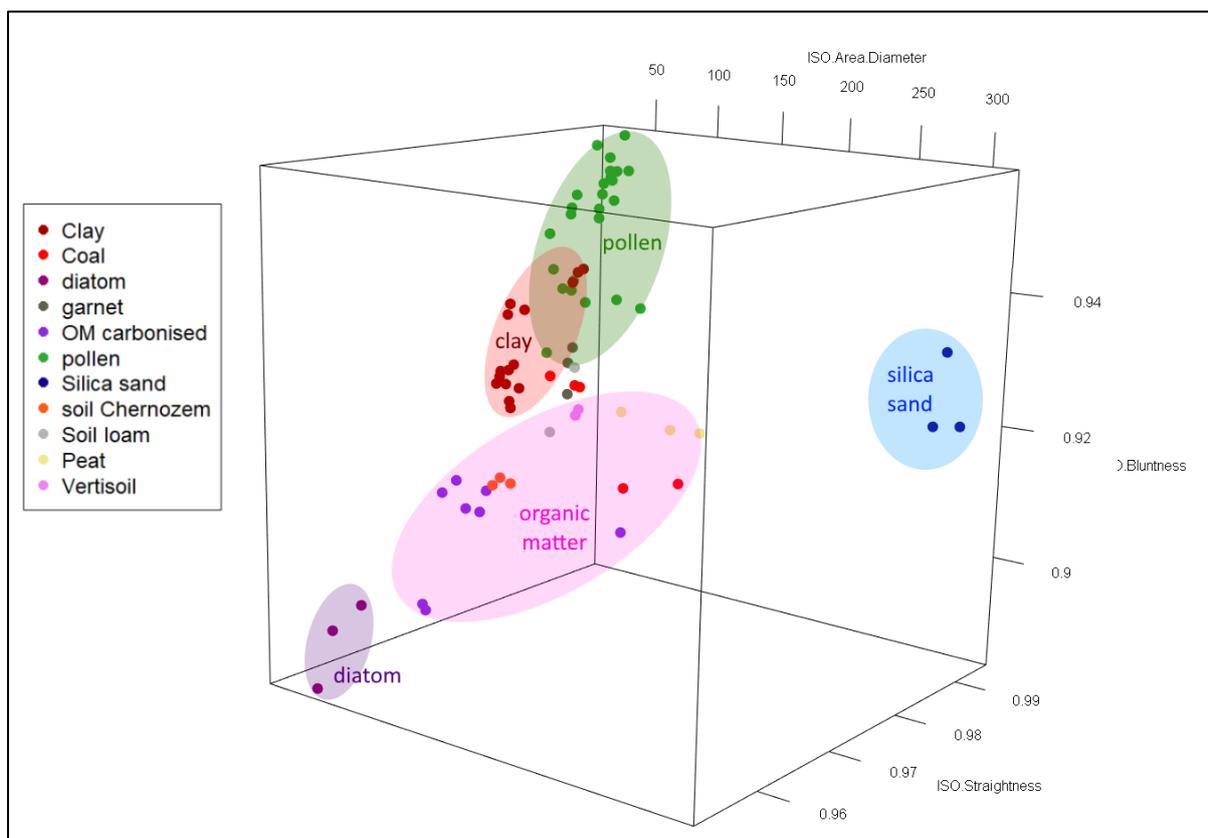


Figure 40 : Diagramme 3D des échantillons de nature et préparation unique

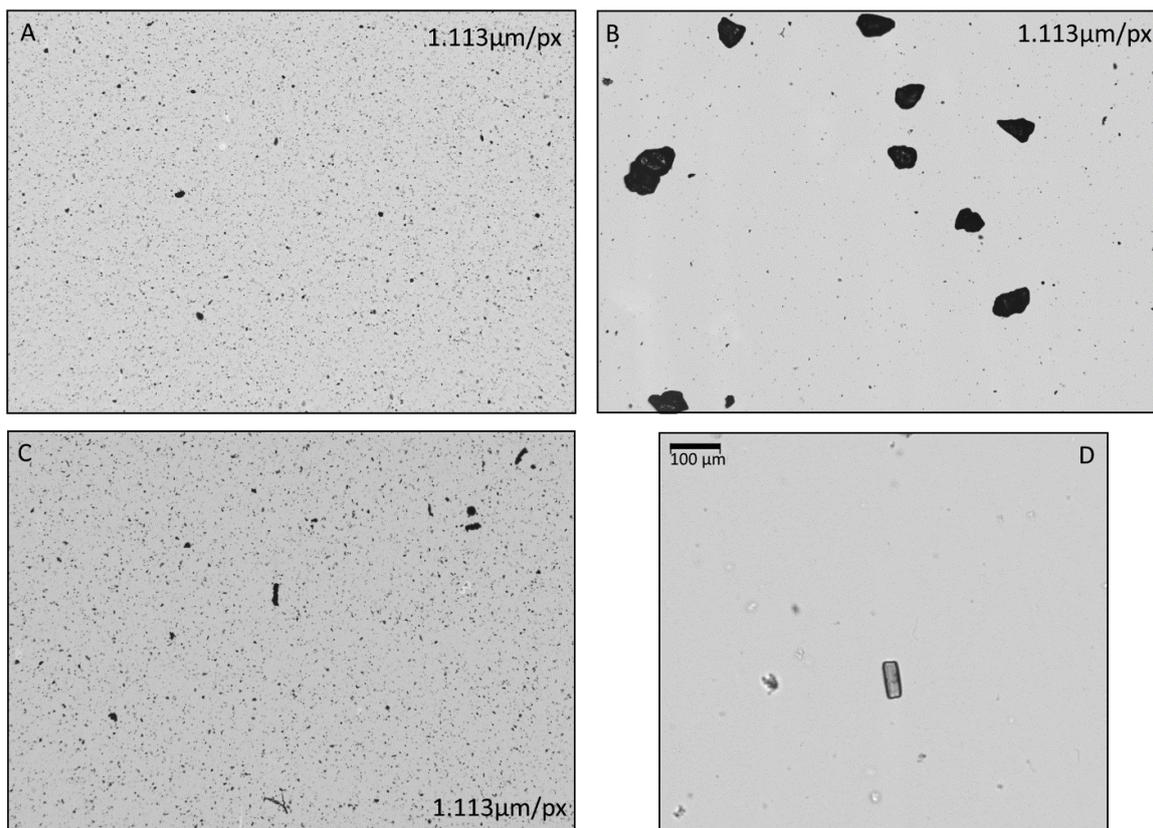


Figure 41 : Images prises par le morphogranulomètre sur lesquels l'analyse d'image a été réalisée. A : Illite Rouge ; B : Sable Siliceux ; C : Bois carbonisé ; D : Diatomée *Pinnularia Neomajor*.

Sur les images des échantillons de matière organique, les particules ont des tailles très hétérogènes et des formes très rugueuses et irrégulières, en particulier pour les échantillons carbonisés (Figure 41C). Cela illustre bien leurs valeurs moyennes basses en Straightness et en Bluntness et leur Area Diameter variable, comme le montre le diagramme 3D (Figure 40). De même, les images de sable (Figure 41B, Area Diameter, Straightness et Bluntness élevés) et d'argile (Figure 41A, Area Diameter faible, Bluntness élevée et Straightness variable) correspondent bien aux résultats présentés sur le graphique. Le grand diamètre trouvé sur l'échantillon de tourbe (Peat) est probablement dû à la formation d'agrégats de particules lors de la mise en suspension de la poudre. La forme très atypique mais régulière des diatomées est bien illustrée à la figure 14D.

## 2) Modèle prédictif de la nature des échantillons selon ses formes

Pour valider la classification avec la projection 3D, un lot sédimentaire test connu est analysé pour vérifier la capacité du modèle à prévoir la nature des sédiments tests selon les 3 paramètres utilisés. Lorsque les échantillons de validation sont ajoutés au diagramme 3D (Figure 43), ils se retrouvent dans des zones cohérentes. Les sables marins et éoliens ont des valeurs proches de celles du sable siliceux standard. Les sols et les argiles sableuses, qui sont des échantillons de natures mélangées, se trouvent entre les argiles et la matière organique, avec une valeur d'Area Diameter faible et une Straightness et une Bluntness variables. La vase (river mud) est située dans la zone de matière organique du graphique.

Une analyse factorielle discriminante (AFD) a été réalisée pour vérifier le nombre d'échantillons concordant avec ce modèle de classification (Figure 42). Les résultats montrent une compatibilité de 80.4% (19,6% de recombinaisons, Tableau 7) avec la classification basée sur leur nature (figure dans les données supplémentaires).

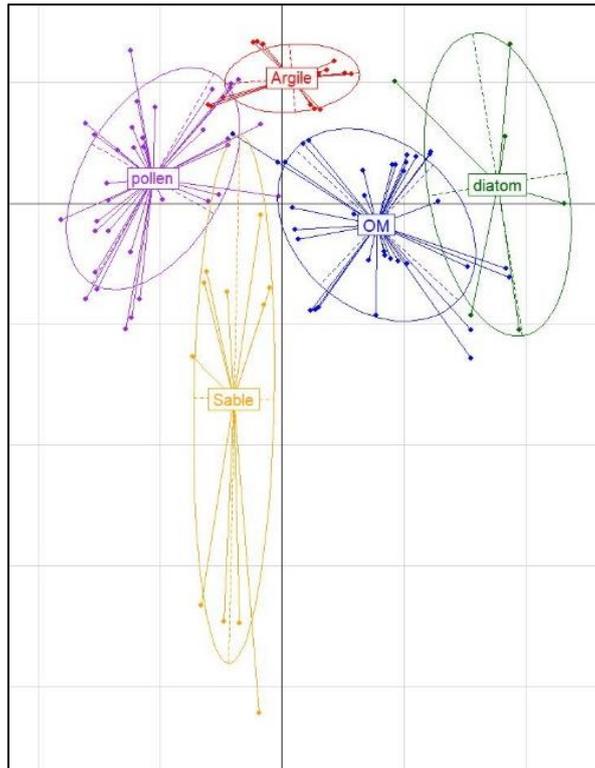


Figure 42 : Projections des individus dans le plan défini par les axes de l'AFD sur les 3 paramètres Area Diameter, Straightness et Bluntness

Tableau 7 : Recombinaisons entre les prédictions du modèle de l'AFD et les échantillons de classification et de validation avec les 3 paramètres Area Diameter – Straightness - Bluntness

fac	Argile	diatom	OM	pollen	Sable
Argile	14	0	0	3	0
diatom	0	5	2	0	0
OM	4	0	31	1	0
pollen	4	0	1	30	0
Sable	0	0	1	5	6

Les 29,9% de recombinaisons trouvés pour les échantillons locaux montrent que ces nouveaux échantillons ne concordent pas parfaitement dans le modèle. Cela peut être lié aux limites du modèle de classification, mais également au fait que certains des échantillons non classés sont de nature mixte (comme les sols et les vases) ou ont une nature différente des échantillons utilisés pour la classification (comme les spores et le rhizopus). Certaines diatomées sont classées dans la matière organique, ce qui peut être lié au fait que, pour certains échantillons, les diatomées ont été broyées, sous forme de débris, ayant ainsi une forme similaire à celle des particules organiques.

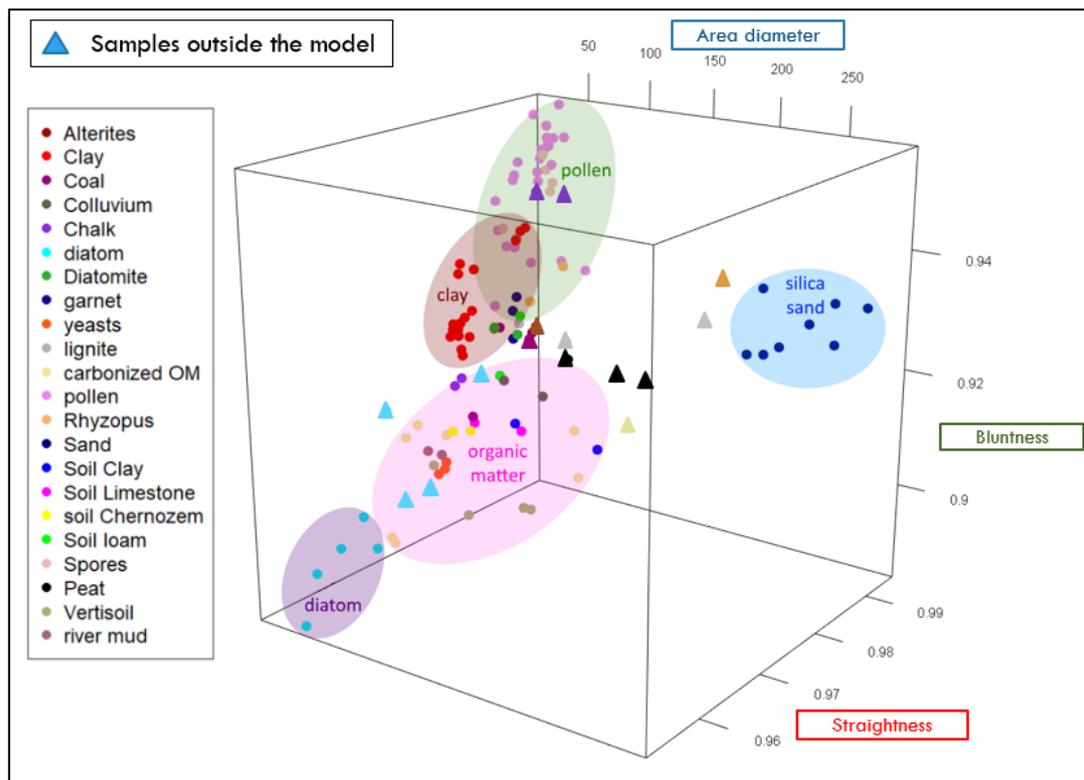


Figure 43 : Diagramme 3D des échantillons de calibration et de vérification

### 3) Distributions morphométriques : choix de l'indice statistique de paramètre central

Afin de résumer les données, toutes les observations de cette étude sur les échantillons de nature et processus uniques ont été faites sur les moyennes. Mais pour vérifier si les informations traduites par ce paramètre suffisent à expliquer toute la distribution, il paraît nécessaire de regarder les distributions complètes des paramètres clefs que l'on a pu identifier (Figure 44, Figure 45, Figure 46).

Pour le paramètre Area Diameter (Figure 44), on observe des distributions plutôt unimodales pour tous les échantillons à l'exception de la matière organique. Dans le cas de distribution normale telle qu'observée, la moyenne est généralement un bon outil d'interprétation. Ceci peut être constaté avec la grande taille de l'échantillon de sable et la petite taille des argiles. Les pollens et diatomées sont également unimodaux et ont des tailles intermédiaires (entre sables et argiles). Comme pour les analyses sur les moyennes, certains échantillons semblent difficiles à discriminer uniquement avec la taille, notamment entre certains échantillons d'argile et de matière organique.

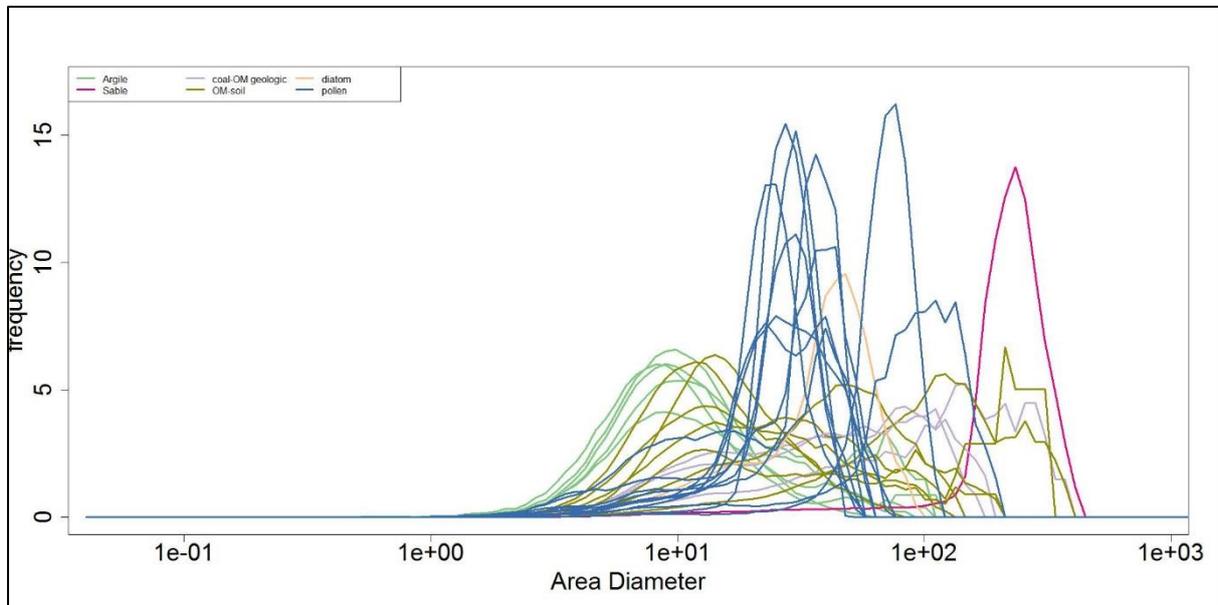


Figure 44 : Distribution des fréquences de taille (Area Diameter) sur les échantillons de nature et préparation uniques

Pour la Bluntness (Figure 45) les distributions ne sont pas unimodales. Les courbes suivent des variations très proches. Ces variations sont liées à certains seuils de Bluntness en rapport à l'émoussé du contour face au nombre de pixels qui le décrivent. Malgré ces variations liées uniquement à la méthode, on constate des différences notables entre chaque groupe d'échantillon. Les pollens et les argiles présentent des fréquences plus faibles mais une gamme de valeurs étendue à l'inverse des sables et MO qui présentent des fréquences plus élevées et une gamme plus restreinte. Tous les échantillons d'un même groupe présentent des courbes très proches, distinguables des autres groupes.

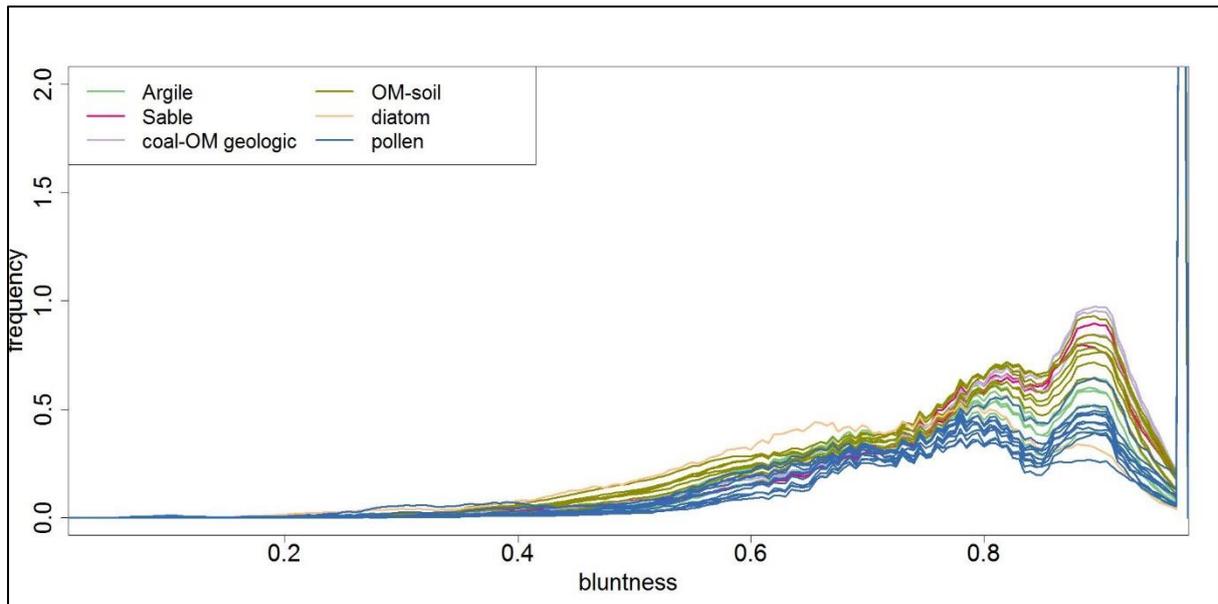


Figure 45 : Distribution des fréquences de Bluntness sur les échantillons de nature et préparation uniques

Pour la Straightness (Figure 46) les distributions ne sont pas unimodales non plus. On constate à nouveau des différences notables entre chaque groupe d'échantillon. Les matières organiques et les argiles présentent des fréquences élevées, alors que les pollens et le sable présentent les moins élevées. Les diatomées se détachent fortement du reste avec une plus grande étendue associée à des fréquences élevées. Ces différences sont moins marquées et le classement est différent de celui de la Bluntness. Par exemple sur la Straightness, l'échantillon de sable semble avoir une distribution proche des échantillons de pollen, alors que sur la Bluntness il est plus proche de ceux de matière organique.

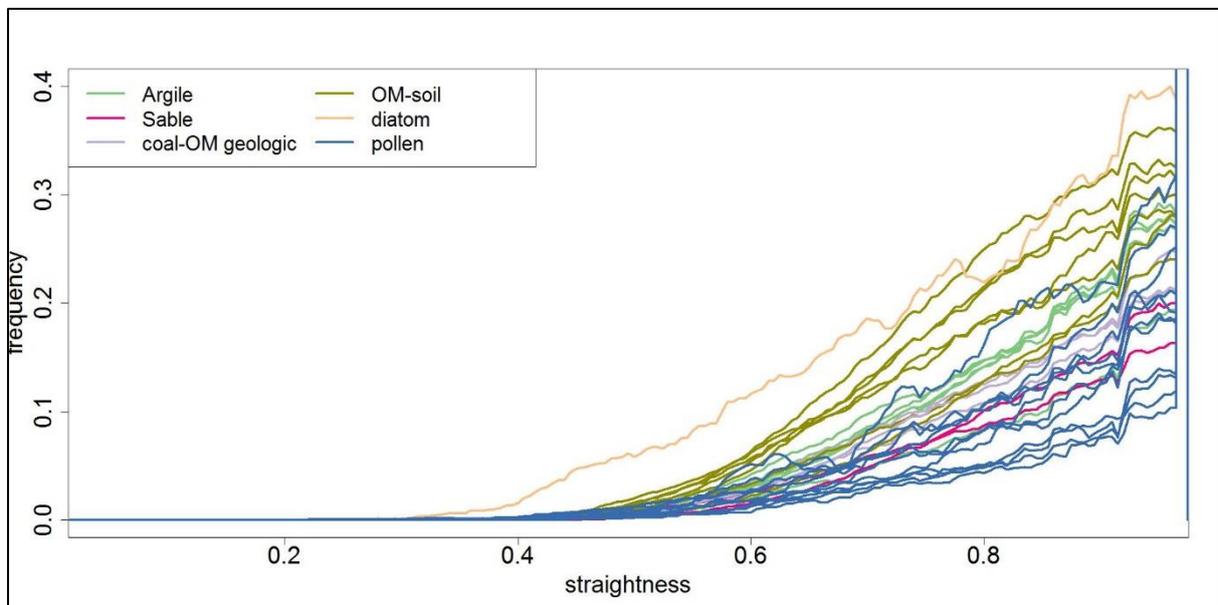


Figure 46 : Distribution des fréquences de Straightness sur les échantillons de nature et préparation uniques

La médiane est moins sensible aux valeurs extrêmes que la moyenne. Même si les tests sur la moyenne permettent de discriminer les groupes, pour la majorité des paramètres de forme (à l'exception d'Elongation et Eccentricity), les distributions ne suivent pas une loi normale. Dans ces

conditions, l'utilisation de la médiane comme indice statistique de paramètre central est moins biaisée (Saporta, 2011).

## G. EST-IL POSSIBLE DE QUANTIFIER LES PROPORTIONS D'UN MELANGE ?

### 1) Sur toutes les particules

Trois groupes d'échantillons contrastés utilisés précédemment ont été pris pour réaliser ces tests de mélange (Tableau 8) : les argiles broyées (Clay), la matière organique (OM) et le sable (Sand). Chaque mélange est composé de deux échantillons dont le pourcentage a été calculé en fonction de leur concentration volumique dans le volume total de particules mélangées. Différents mélanges avec différentes proportions ont donc été mesurés afin de réaliser un gradient progressif.

Tableau 8 : liste des échantillons et proportion de chaque nature

type	Xsand	Xclay	XOM	nature	detail
mix1	36	0	64	OM+Sand	sable std+woodchar
mix2	0	50	50	OM+Clay	smectite+woodchar
mix3	13	0	87	OM+Sand	sable cayeux+woodchar
mix4	22	78	0	Sand+Clay	sable cayeux+Illite rouge
mix5	0	50	50	OM+Clay	kaolinite+hexane SOOT
mix6	34	66	0	Sand+Clay	kaolinite+sable Stbrevin
mix1	82	0	18	OM+Sand	sable std+woodchar
mix2	0	50	50	OM+Clay	smectite+woodchar
mix3	69	0	31	OM+Sand	sable cayeux+woodchar
mix4	89	0	11	Sand+Clay	sable cayeux+Illite rouge
mix5	0	50	50	OM+Clay	kaolinite+hexane SOOT
mix6	93	7	0	Sand+Clay	kaolinite+sable Stbrevin
mix10	50	50	0	Sand+Clay	kaolinite+sable std
mix10	75	25	0	Sand+Clay	kaolinite+sable std
mix11	50	50	0	Sand+Clay	Illite rouge+sable std
mix12	50	50	0	Sand+Clay	smectite+sable std
mix13	50	50	0	Sand+Clay	smectite+sable std
mix13	75	25	0	Sand+Clay	smectite+sable std
mix14	50	50	0	Sand+Clay	Illite+sable std
pure	0	100	0	Clay	kaolinite
pure	0	100	0	Clay	Illite rouge
pure	0	100	0	Clay	Illite jaune
pure	0	100	0	Clay	Illite verte
pure	0	100	0	Clay	smectite
pure	100	0	0	Sable	sable std
pure	0	0	100	OM	Grass
pure	0	0	100	OM	coal
pure	0	0	100	OM	grasschar
pure	0	0	100	OM	hexane SOOT
pure	0	0	100	OM	woodchar

Pour observer les variations des paramètres de taille et de forme mesurés en fonction des variations des proportions de chaque échantillon mélangé, une ACP sur les médianes des échantillons pour chaque paramètre a été réalisée (Figure 47). Les paramètres Xclay, Xsand et XOM (proportion de chacun des pôles) ont été rajoutés avec les paramètres de taille et de forme du morphogranulomètre pour observer leurs relations avec la matrice des paramètres (Figure 47B).

Cette ACP a été réalisée uniquement sur les 12 paramètres sélectionnés dans le chapitre II.F.1) ainsi que les taux de sable, argile et Matière Organique (OM).

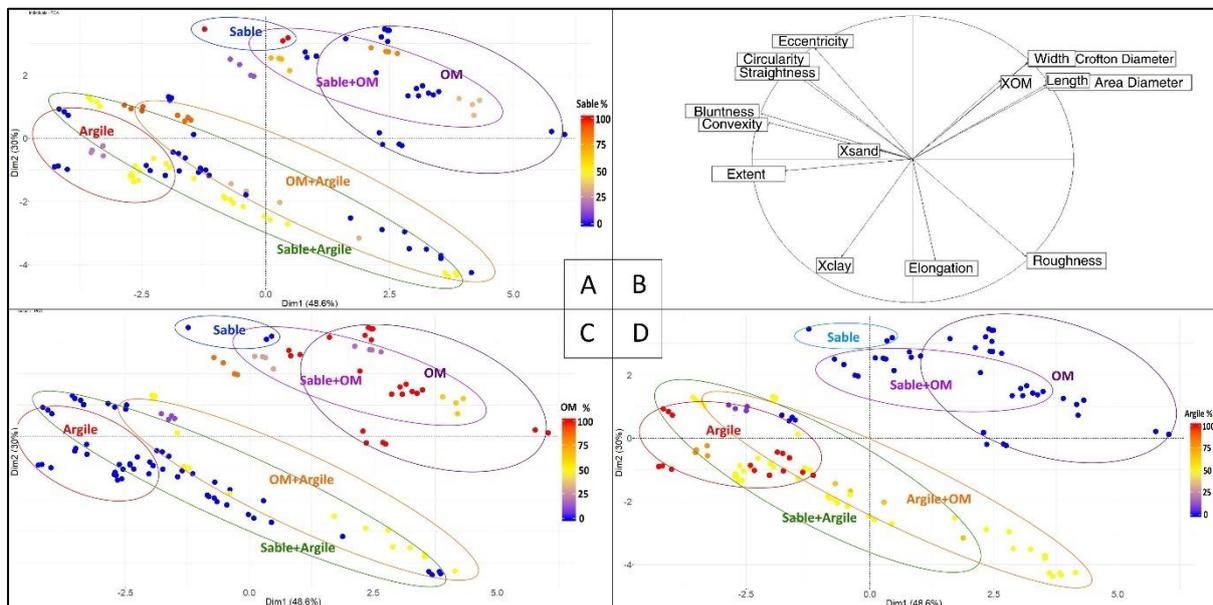


Figure 47 : Représentation des échantillons mélangés sur les axes 1 et 2 de l'ACP (72% de la variabilité) suivant leur valeur des paramètres morphogranulométriques ; A : échantillons classés par préparation et colorés en fonction de la proportion de sable ; B : paramètres de taille et de forme ; C : échantillons colorés en fonction de la proportion de matière organique ; D : échantillons colorés en fonction de la proportion d'argile

Sur une combinaison des axes 1 et 2 positifs, corrélés avec les paramètres de taille (Area Diameter, Crofton Diameter, Figure 47B), deux pôles purs sont bien identifiés (Figure 47A) : un pôle Argile et un pôle Matière Organique (OM), avec les mélanges (OM+Argile et Sable+Argile) plutôt proches du pôle argile. On observe d'ailleurs une bonne corrélation entre les pourcentages XOM et Xclay et le paramètre Area Diameter. La combinaison des axes 1 négatif et 2 positif, corrélés avec la plupart des paramètres de forme (Bluntness, Convexity, Straightness, etc, Figure 47B), distingue le pôle matière organique du pôle sable avec les mélanges (Sable+OM) assez bien répartis entre les deux (Figure 47A). Il semble qu'un gradient de mélange apparaisse entre les deux pôles. Sur cette même combinaison, on distingue une partie des échantillons de mélange contenant de l'argile (OM+Argile et Sable+Argile, Figure 47C et D) qui se détachent du pôle argileux (négatif sur l'axe 1 et nul sur l'axe 2). Ces mélanges tendent vers un pôle négatif sur l'axe 2 et positif sur l'axe 1. Ce pôle n'est caractérisé par aucun des échantillons purs testés.

Ce pôle, lié aux valeurs d'élongation et de paramètres de forme (Circularity, Straightness, Roughness et Eccentricity) sur les mélanges contenant de l'argile, indique que ces mélanges présentent des particules plus irrégulières. L'argile est un matériau cohésif, il pourrait donc servir de liant à des agrégats de particules de formes irrégulières se distinguant des particules pures. Ces agrégats pourraient être considérés comme une forme très simplifiée de floccs/agrégats composites que l'on observe en milieu naturel et qui sont composés d'un mélange organo-minéral (Ongley and Bynoe 1982 ; Sinawi and Walling 1996 ; Droppo 2001).

Sur les axes 2 et 3 (Figure 48), les trois pôles purs (Sand, OM et Clay) sont bien identifiés. Sur l'axe 2, toujours la matière organique et l'argile, et sur l'axe 3, le sable corrélé avec le paramètre Extent et l'élongation. On note toutefois que Xsand est bien corrélé sur l'axe 3 mais les autres paramètres sont peu corrélés avec cet axe. Les paramètres de taille et de forme ne sont donc pas capables d'expliquer la totalité des variations de proportion du sable.

Afin de réduire ce biais, la fréquence de photographie et la vitesse de la pompe ont été ajustées, mais cet effet n'a pas pu être complètement compensé. Il se pourrait donc que le pourcentage de sable soit moyennement corrélé avec les mesures au morphogranulomètre à cause de ce biais de mesure sur les mélanges à faibles pourcentages de sable ; rendant la probabilité de rencontrer une particule sableuse plus faible.

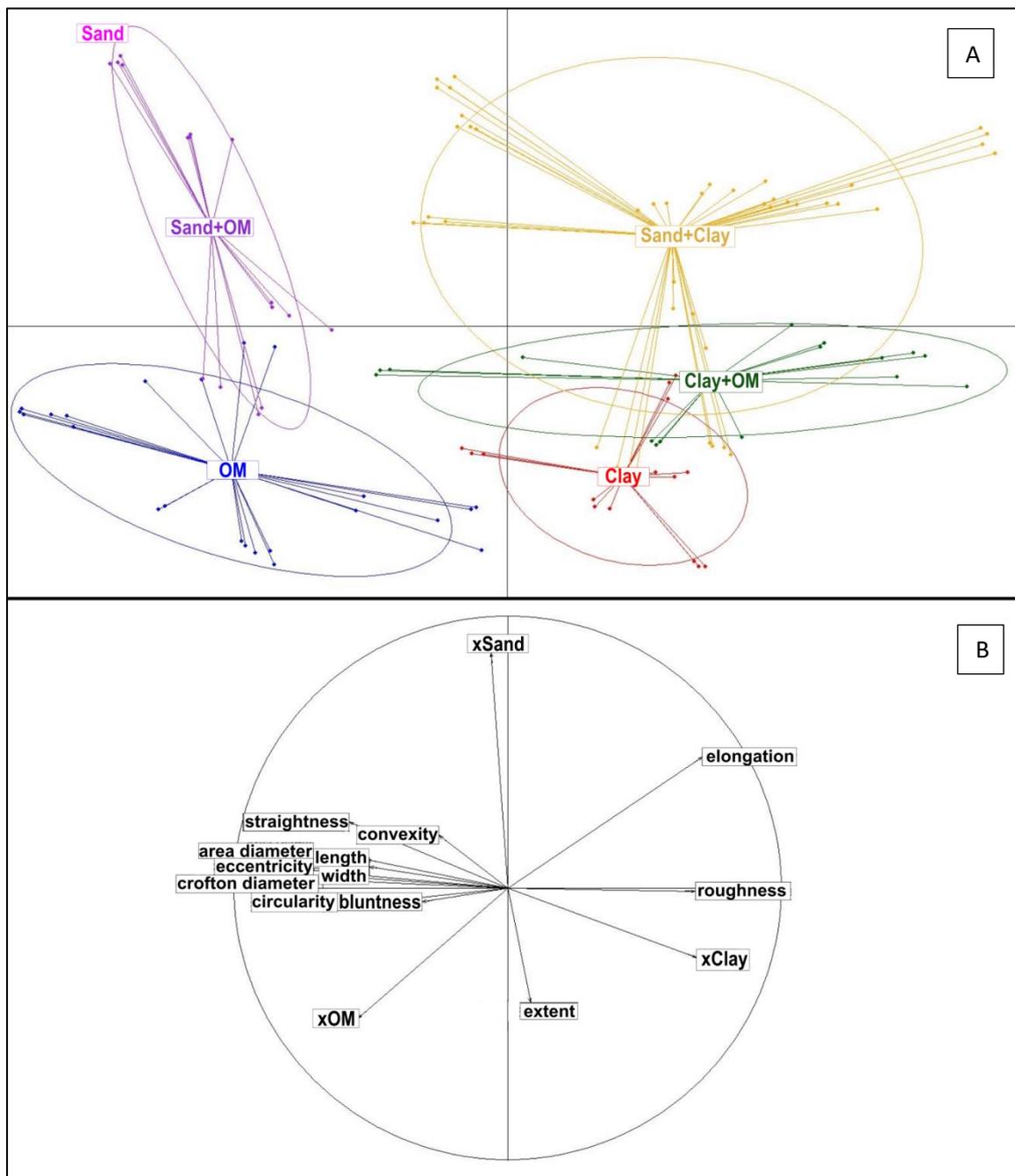


Figure 48 : Représentation des échantillons mélangés sur les axes 2 et 3 de l'ACP suivant leur valeur des paramètres morphogranulométriques ; A : échantillons classés par préparation ; B : paramètres de taille et de forme

En replaçant ces échantillons de mélange dans le diagramme 3D, la plupart se retrouvent entre les différents pôles, la création d'un modèle de mélange pour quantifier les proportions de chaque pôle pourrait donc fonctionner.

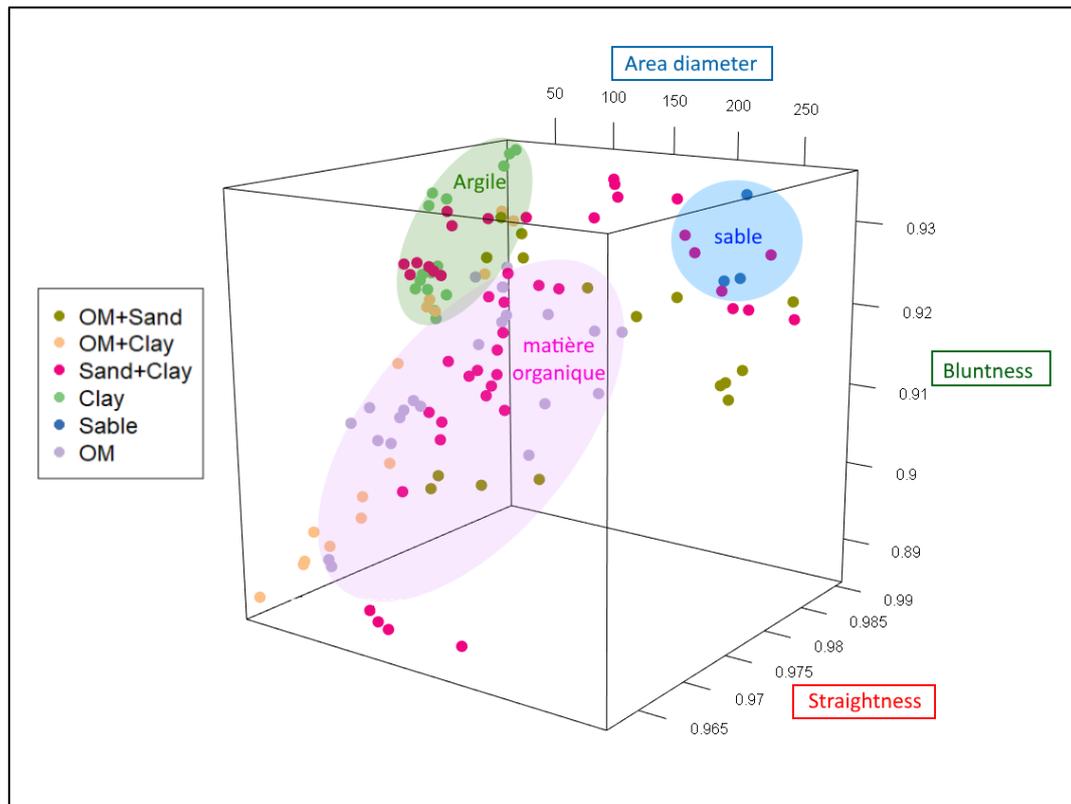


Figure 49 : Diagramme 3D des échantillons de mélange

## 2) Sur les particules supérieures à 20 µm

Pirard et al. 2005 constate que des paramètres comme la Bluntness sont très dépendants de la taille et doivent donc être analysés sur de petites fourchettes de taille. De plus, pour de petites tailles, le faible nombre de pixels représentant la particule peut conduire à de fortes incertitudes sur les paramètres (Pirard et al., 2005).

Afin d'éliminer ce biais potentiel, un test de la capacité du morphogranulomètre à différencier les pôles et les mélanges avec uniquement les particules supérieures à 20 µm a été effectué (les particules inférieures à ce seuil ont été retirées du jeu de donnée). Une ACP uniquement sur les particules supérieures à 20µm des échantillons de mélange est présentée ci-dessous (Figure 50).

Comme pour l'ACP sur toutes les particules, sur l'axe 2, corrélés avec les paramètres de taille et l'élongation (Figure 50B), deux pôles purs sont bien identifiés (Figure 50A) : un pôle Argile et un pôle Matière Organique. On observe toujours une bonne corrélation entre les pourcentages XOM et Xclay et le paramètre Area Diameter. L'axe 1 est corrélé avec la plupart des paramètres de forme (bluntness, convexity, straightness, etc). Il distingue de nouveau une partie des échantillons de mélange contenant de l'argile qui se détachent des pôles que l'on a associés précédemment aux agrégats composites. Enfin, on observe que le pourcentage Xsand est très peu corrélé avec les axes 1 et 2 et l'est probablement plus avec les autres axes.

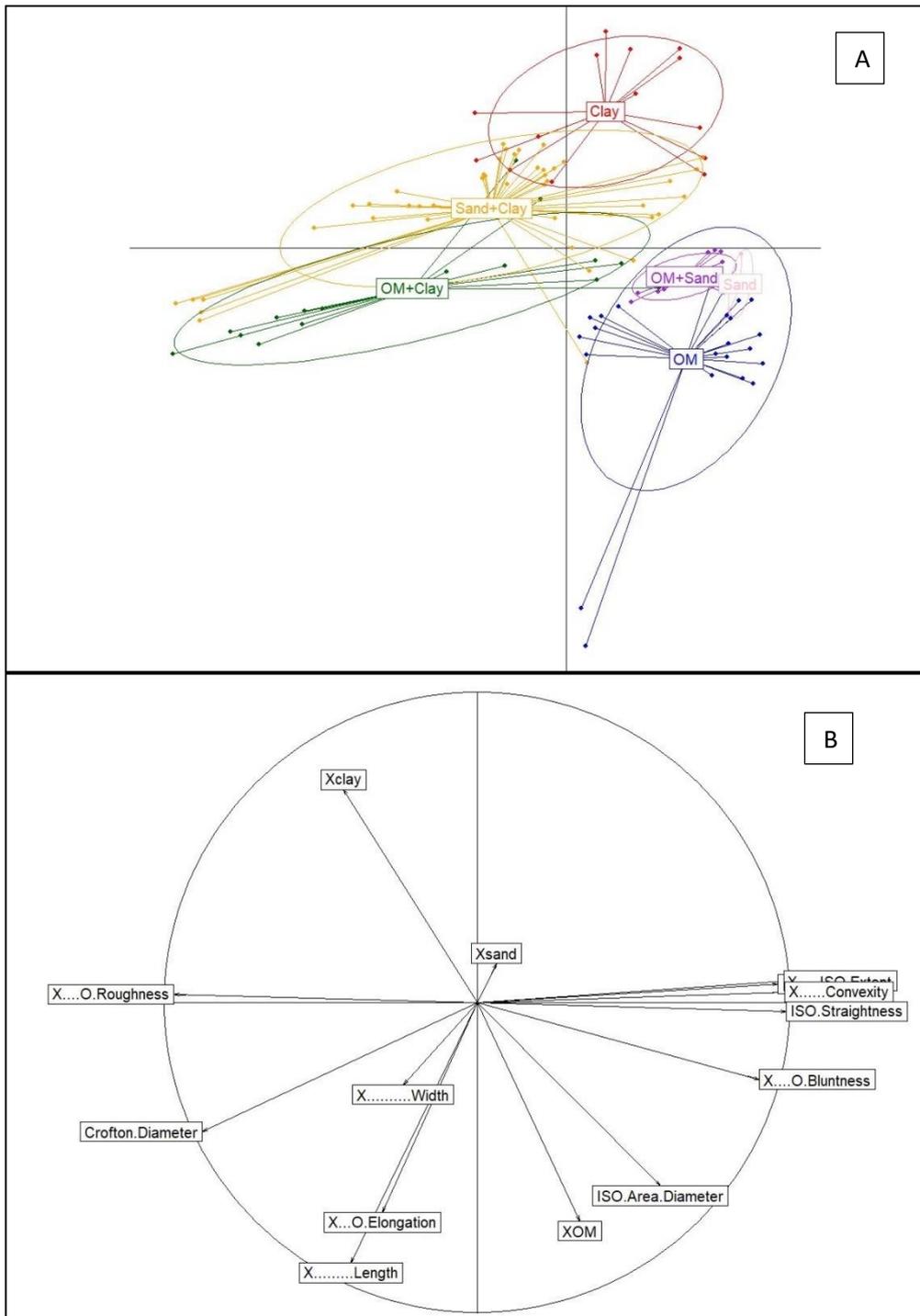


Figure 50 : ACP sur les médianes des mélanges uniquement avec des particules supérieures à  $20\mu\text{m}$ , dimension 1 et 2 ; A : échantillons classés par préparation ; B : paramètres de taille et de forme

Sur les axes 3 et 4, le sable se détache des autres pôles. Sur l'axe 3, le sable corrélé avec la largeur (Width) et l'élongation. On note toutefois que Xsand est mieux corrélé mais il reste toujours une part de sa variabilité qui n'est pas expliquée ici. C'est avec l'axe 4 (Figure 51) que la proportion en sable est la mieux corrélée, c'est d'ailleurs le seul paramètre à y être bien corrélé. Les paramètres de taille et de forme ne sont donc pas capables d'expliquer la totalité des variations du sable, comme précédemment.

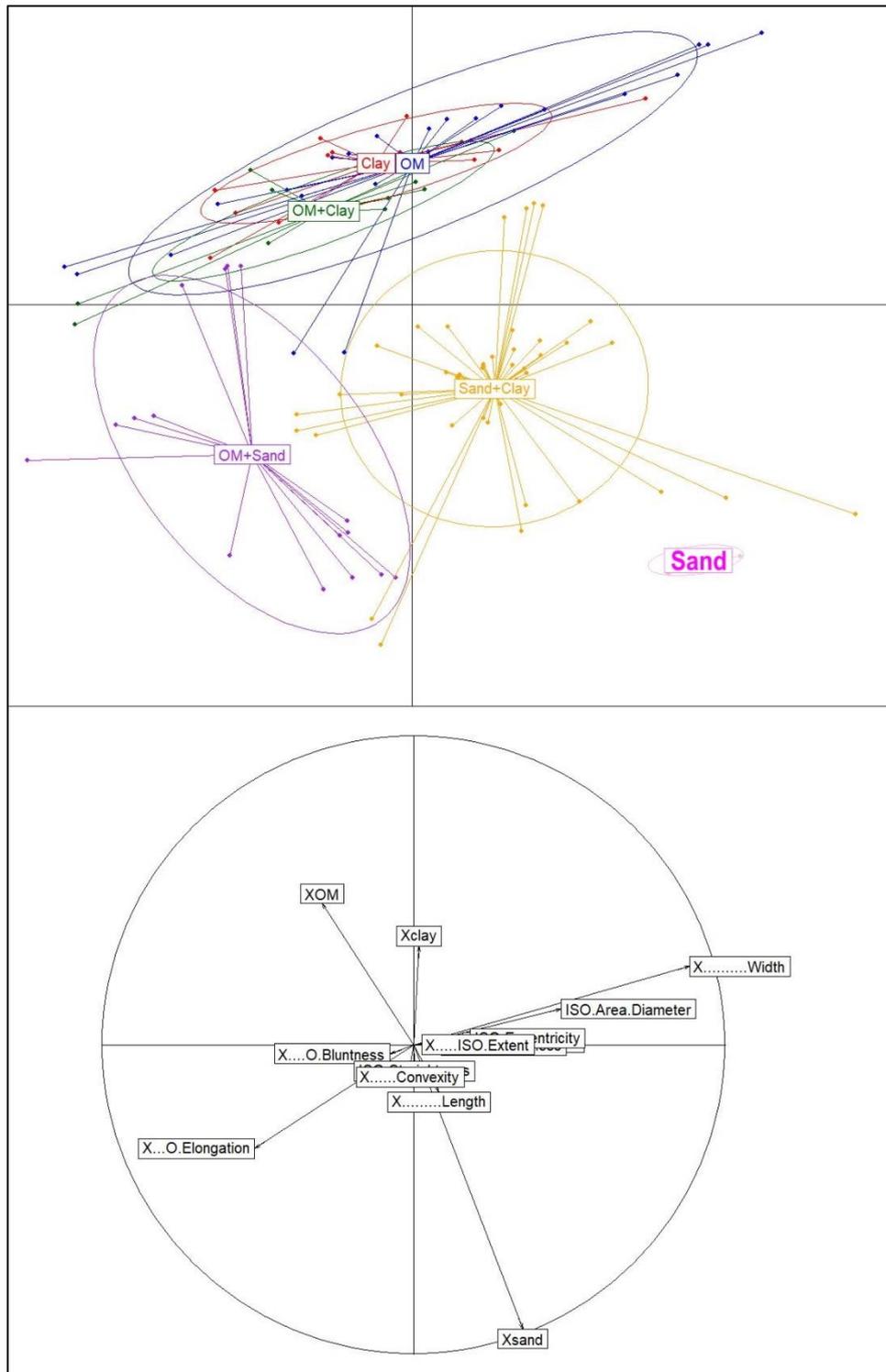


Figure 51 : Représentation des échantillons mélangés sur les axes 3 et 4 de l'ACP suivant leur valeur des paramètres morphogranulométriques, particules supérieures à 20µm ; A : échantillons classés par préparation ; B : paramètres de taille et de forme

On retrouve donc les mêmes observations que ce soit avec la totalité des particules ou uniquement celles supérieures à 20 µm. Comme il ne semble pas y avoir de perte d'information et que cela permet d'éviter le biais de la représentativité de la mesure de la forme sur les petites particules, toutes les analyses suivantes seront réalisées sur les particules supérieures à 20µm.

### 3) Prédiction et quantification des sources Argile-Sable

#### a) Comparaison des prédictions entre le modèle Sed\_SAT et l'analyse factorielle discriminante (AFD) avec les médianes

Dans le chapitre II.F.2) et , l'AFD a permis de prédire l'appartenance d'échantillon pure (une seule population) à un groupe d'échantillons défini par la classification défini en chapitre II.F.1). Ici, on va utiliser la même méthode pour prédire au sein d'un seul échantillon contenant plusieurs populations, la proportion de particules de chacune de ces populations. Pour débiter, seule deux populations seront testées : les argiles avec ultrasons et les sables. Une AFD similaire est donc réalisée sur les 5 premiers axes de l'ACP sur les médianes des particules de taille supérieur à 20 µm des échantillons de sables et argiles purs afin de définir le modèle. Ce dernier ne montre aucune recombinaison Tableau 9. Le modèle discrimine donc très bien les échantillons purs.

Tableau 9 : Matrice de confusion de l'AFD sur l'ACP des médianes des échantillons purs d'argile et sable

AFD	Clay	Sable
Clay	15	0
Sable	0	3

L'équation du modèle est la suivante :

$$score = -0.411 \times Axis1 - 0.521 \times Axis2 + 0.452 \times Axis3 + 0.027 \times Axis4 + 0.617 \times Axis2 + C$$

Ce modèle est utilisé pour prédire les contributions en sable et argile dans les mélanges à partir des valeurs de l'ACP effectuée sur les médianes des échantillons mélanges. Le Tableau 10 compare les résultats de la prédiction du modèle avec les proportions réelles des mélanges.

Tableau 10: Comparaison des pourcentages volumiques réels avec les pourcentages prédits avec le modèle de l'AFD sur les médianes des mélanges argile-sable

AFD mediane	prediction		real proportion		
	clay	sand	%.sand	%.clay	
sand cayeux+illite rouge	55	45	50	50	mix4_50-50
kaolinite+sand StBrevin	54	46	50	50	mix6_50-50
sand cayeux+illite rouge	75	25	89	11	mix4_test
kaolinite+sand StBrevin	65	35	93	7	mix6_test
kaolinite+sand Std	57	43	50	50	mix10
kaolinite+sand Std	63	37	25	75	mix10_75-25
Illite rouge + sand Std	64	36	50	50	mix11
smectite + sand Std	62	38	50	50	mix12
smectite + sand Std	72	28	75	25	mix13_50-50
smectite + sand Std	61	39	75	25	mix13_75-25
Illite + sand Std	83	17	75	25	mix14

Pour vérifier l'efficacité de ce modèle, le même jeu de données a été utilisé pour prédire les contributions avec la procédure statistique Sed\_SAT (présentée au chapitre I.C.2)f) (Gorman Sanisaca et al., 2017)). Après les différents tests pour vérifier si les paramètres et les données sont univariés et conservatifs (outlier test et bracket test) une AFD est également réalisée. La matrice de confusion (Tableau 11) donne 11% de recombinaison, ce qui reste correct. Les prédictions du modèle sont présentées sur le Tableau 12.

Tableau 11 : Matrice de confusion de l'AFD réalisée par la procédure statistique Sed\_SAT

Sed SAT	Clay	Sand
Clay	13	0
Sand	2	3

Tableau 12 : Comparaison des pourcentages volumiques réels avec les pourcentages prédits avec le modèle créé avec Sed SAT sur les médianes des mélanges argile-sable

Sed SAT	prediction		real proportion		
	clay	sand	%.sand	%.clay	
sand cayeux+illite rouge	98	2	50	50	mix4_50-50
kaolinite+sand StBrevin	26	74	50	50	mix6_50-50
sand cayeux+illite rouge	100	0	89	11	mix4_test
kaolinite+sand StBrevin	85	15	93	7	mix6_test
kaolinite+sand Std	100	0	50	50	mix10
kaolinite+sand Std	0	100	25	75	mix10_75-25
Illite rouge + sand Std	100	0	50	50	mix11
smectite + sand Std	72	28	50	50	mix12
smectite + sand Std	100	0	75	25	mix13_50-50
smectite + sand Std	53	47	75	25	mix13_75-25
Illite + sand Std	100	0	75	25	mix14

La Figure 52 montre la régression linéaire entre prédiction des 2 modèles et pourcentage réel de sable dans les mélanges. Dans les deux cas, on observe des relations non proportionnelles et non linéaires ( $R^2$  de 0.30 et 0.29 respectivement). Ces modèles montrent des capacités de prédictions pauvres. Cela peut être lié à la nature des données d'entrées. L'utilisation d'un paramètre résumant une distribution tel que la médiane n'est pas pertinent dans le cas de distribution avec plusieurs populations (ici 2). Il serait donc plus pertinent de réaliser le modèle en y entrant la distribution complète pour chaque paramètre. Le modèle Sed\_SAT ne permet que d'entrer une valeur par paramètre pour chaque échantillon, cela est lié au fait qu'il est principalement utilisé sur des données hydrochimiques et isotopiques qui prennent ce format.

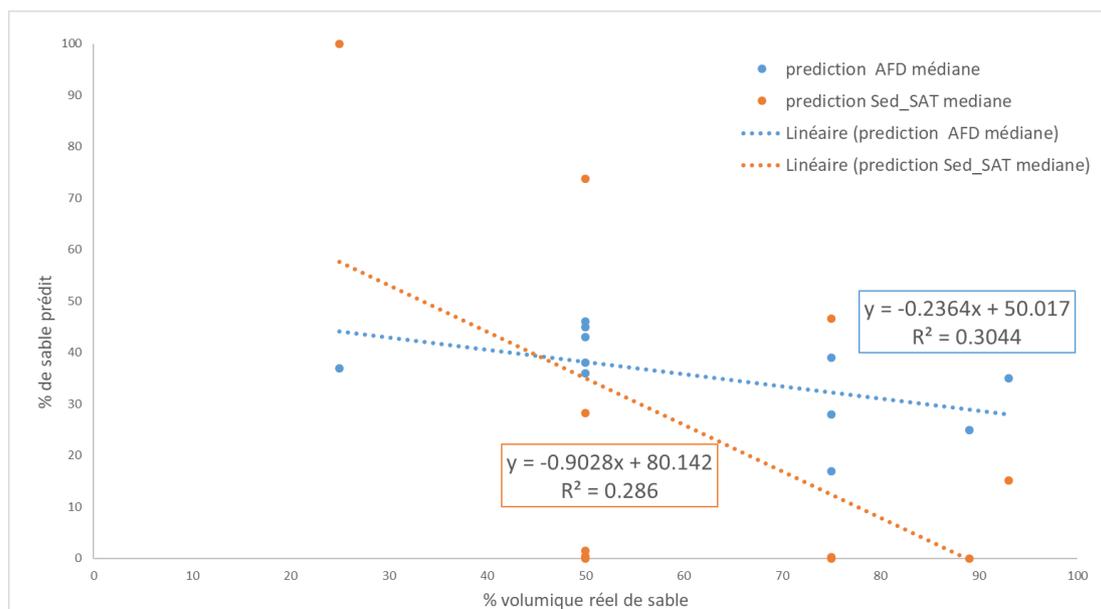


Figure 52 : Graphique du pourcentage de sable prédit en fonction du pourcentage réel dans les mélanges argile-sable

### b) Prédiction de l'AFD avec toutes les particules

Contrairement aux analyses discriminantes précédentes, il n'est donc pas possible de prédire les proportions des mélanges simplement avec les médianes, qui permettent de résumer le signal global d'un échantillon. Mais il est possible d'utiliser la totalité des distributions morphogranulométriques puisque dans le cas d'un échantillon mélangé, on recherche à décomposer ce signal global en autant de groupes que de sources connues présentes dans le mélange.

L'AFD a donc été appliquée sur les résultats de l'ACP des distributions complètes des échantillons purs de sable et d'argile (les ACP précédentes (Figure 47, Figure 48, Figure 50 et Figure 51) sont faites sur les médianes). Les échantillons de matière organique seront rajoutés à posteriori pour complexifier le modèle progressivement.

La matrice de confusion indique un taux de recombinaisons de 34%. Ce taux peut paraître élevé mais compte tenu du très grand nombre d'individus (plus de 4000), ce taux est acceptable.

Tableau 13 : Matrice de confusion de l'AFD sur les distribution complètes des échantillons purs d'argile et sable

fac	Clay	Sable
Clay	1533	640
Sable	798	1228

Pour la prédiction, les distributions complètes des mélanges ont été rentrées dans le modèle de l'AFD. Le Tableau 14 compare les proportions de mélanges prédites vs réelles pour chaque combinaison. Les prédictions ne semblent pas exactes à 100%. Pour calculer leur précision, la Figure 53 montre la régression linéaire entre prédiction et réalité (Figure 53).

Tableau 14 : Comparaison des pourcentages volumiques réels avec les pourcentages prédits avec les données morphogranulométriques pour les mélanges argile-sable

	prediction		proportion réelle	
	%sable	%argile	%sable	%argile
sable cayeux+illite rouge	49	51	50	50
sable StBrevin+kaolinite	21	79	50	50
sable cayeux+illite rouge	91	9	89	11
sable StBrevin+kaolinite	89	11	93	7
sable Std+kaolinite	54	46	50	50
sable Std+kaolinite	21	79	25	75
sable Std+illite rouge	56	44	50	50
sable Std+smectite	61	39	50	50
sable Std+smectite	80	20	75	25
sable Std+smectite	57	43	50	50
sable Std+illite	92	8	75	25

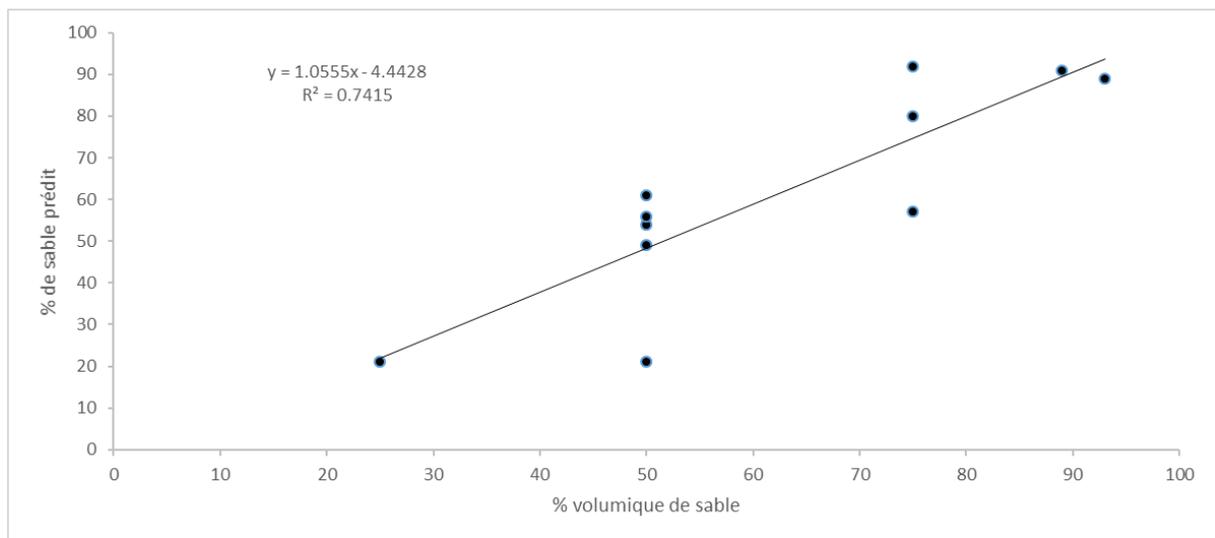


Figure 53 : Graphique du pourcentage de sable prédit en fonction du pourcentage réel dans les mélanges argile-sable

La régression linéaire (Figure 53) montre une pente proche de 1, un  $R^2$  de 0.74 et une p-value de 0.00066. On observe donc qu'avec 2 natures différentes dans un mélange, on obtient des prédictions plutôt bonnes avec toutefois des incertitudes. Ces incertitudes peuvent être liées à la formation potentielle d'agrégats composites comme mentionné précédemment.

Lorsque la prédiction est réalisée avec les 3 natures de mélange, on observe cette fois-ci des incohérences beaucoup plus flagrantes dans le modèle de départ : il réalise beaucoup de recombinaison (Tableau 15). La plupart des particules est finalement classée dans le pôle matière organique.

Tableau 15 : Matrice de confusion des échantillons purs d'argile, matière organique et sable

	Clay	OM	Sable
Clay	2	2171	0
OM	1	17633	63
Sable	2	1909	115

Le Tableau 16 montre donc sans surprise de très mauvaises performances pour la prédiction, ce qui est illustré dans la Figure 54 pour les sables. Ceci peut être expliqué par le fait que plusieurs échantillons de matière organique ont des signatures morphogranulométriques hétérogènes (voir graphe 3D, Figure 40). L'établissement de la matière organique comme pôle reste contestable en soit au vu de la diversité de ce qui peut être classé comme « matière organique ».

Tableau 16 : Comparaison des pourcentages volumiques réels avec les pourcentages prédits avec les données morphogranulométriques pour les mélanges argile-sable, argile-matière organique et sable-matière organique

nature	prediction			proportion réelle		
	Clay	OM	Sable	X.clay	X.OM	X.sand
sable std+woodchar	57	32	11	0	64	36
smectite+woodchar	49	36	15	50	50	0
sable cayeux+woodchar	53	21	25	0	87	13
sable cayeux+illite rouge	49	38	12	78	0	22
kaolinite+hexane SOOT	36	62	2	50	50	0
kaolinite+sable StBrevin	46	43	10	66	0	34
sable std+woodchar	57	35	8	0	18	82
smectite+woodchar	40	58	2	50	50	0
sable cayeux+woodchar	59	31	10	0	31	69
sable cayeux+illite rouge	45	52	2	0	11	89
kaolinite+hexane SOOT	61	32	7	50	50	0
kaolinite+sable StBrevin	49	47	4	7	0	93
kaolinite+sable Std	50	40	9	50	0	50
kaolinite+sable Std	42	54	4	50	0	50
Illite rouge + sable Std	53	36	11	50	0	50
smectite + sable Std	46	51	3	50	0	50
smectite + sable Std	50	48	3	50	0	50
smectite + sable Std	45	51	4	50	0	50
Illite + sable Std	56	40	4	50	0	50

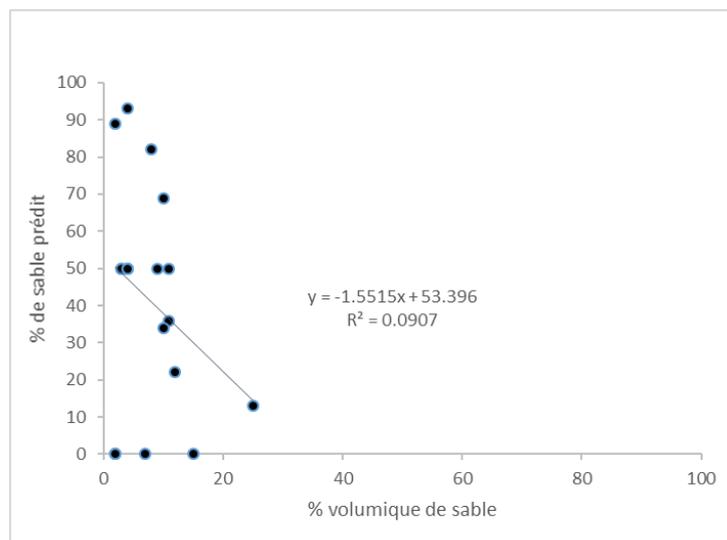


Figure 54 : Graphique du pourcentage de sable prédit en fonction du pourcentage réel dans les mélanges argile-sable-matière organique

## H. PROTOCOLE METHODOLOGIQUE DE MESURE

Ces tests méthodologiques ont permis de montrer que :

- Le morphogranulomètre peut mesurer avec fiabilité la taille de 5  $\mu\text{m}$  à 1 mm et la forme de 20  $\mu\text{m}$  à 1 mm.
- Le séchage et la centrifugation provoque une agrégation des particules altérant leur forme principalement.
- Le broyage altère principalement la taille et homogénéise la forme.
- Les ultrasons altèrent la taille et la forme en cassant les liens des particules cohésives.
- Il est possible d'identifier avec une bonne répétabilité une signature de taille et de forme pour des échantillons de particules ayant une nature et une altération homogènes.
- Lorsque l'on mélange ces échantillons purs, le mélange a une signature située entre les signatures des deux sources.
- La proportion de chaque source est modélisable avec une fiabilité correcte dans le cas d'un mélange avec deux sources connues différentes.
- Lors d'un mélange, les résultats semblent identifier des éventuelles transformations de la forme (agrégats).

Les limites de la méthode sont que :

- Les échantillons cohésifs utilisés ont été broyés et ne permettent pas de faire de lien direct avec les échantillons naturels prélevés lors d'une étude de cas.
- La présence d'agrégats lors des mélanges complexifie leur analyse et la restitution. Le fait que la forme des échantillons cohésifs ne soit pas conservative est un biais systématique qu'il n'est pas possible d'éliminer.
- La quantification des proportions dans un mélange semble limitée lorsqu'il y a plus de deux nature/altérations mélangés. Les tests n'ont toutefois pas été concluants en partie dû à la nature du troisième pôle qui présentait de grandes hétérogénéités de forme.

D'autres travaux sur la méthode peuvent encore être réalisés :

- Prendre des échantillons plus adaptés avec des formes plus homogènes pour réaliser des mélanges plus complexes et vérifier la capacité du morphogranulomètre à quantifier la part de chaque source/nature dans les mélanges.
- Augmenter le nombre d'échantillons purs pour étoffer la base de données de signatures morphométriques.

Une fois toutes ces considérations méthodologiques adressées et malgré les limites rencontrées, le morphogranulomètre semble apte à différencier et quantifier les variations de taille et de forme entre différents échantillons de sédiments en suspension. Il paraît donc pertinent de le mettre à l'épreuve face à des échantillons naturels dans le cadre d'études de transferts de sédiments. Pour cela, et avec l'aide des conclusions précédentes, il est nécessaire de mettre en place un protocole de mesure et d'analyse de données.

La mesure suivra le protocole présenté en Annexe 3 et la préparation des échantillons et l'analyse de données morphogranulométriques respecteront les conditions suivantes :

La résolution utilisée sera de 1.113  $\mu\text{m}/\text{px}$ , le zoom le plus large. Les tests sur la taille avec les différentes résolutions ont démontré qu'il constitue le meilleur compromis pour des sédiments présentant des gammes de taille variées, tout en gardant une précision acceptable.

Autant que possible, aucune préparation ne sera effectuée au-delà d'une simple dispersion mécanique par agitation magnétique. Tous les tests sur le broyage, les ultrasons et la centrifugation semblent indiquer une déformation causée par la préparation, il paraît donc nécessaire de réduire autant que possible toute altération de la forme originale entre le prélèvement et la mesure.

Les données morphogranulométriques seront filtrées à 20 µm pour éviter les biais de calcul de l'analyse d'image sur les particules fines présentant peu de pixels comme discuté dans le chapitre II.G.2). Comme démontré dans ce chapitre, la présence de cette sélection de données ne semble pas effacer les observations faites sans filtrage.

Comme observé sur les distributions de fréquence, les distributions des paramètres de formes et parfois de taille sont non-normales (chapitre II.F.3)), l'utilisation de la médiane comme indice statistique central est le plus approprié (Saporta, 2011). Ce sont donc à partir de ces médianes que les ACP, AFD et autres tests statistiques seront appliqués lorsque nécessaire.

La Figure 55 illustre le traitement statistique appliqué sur les distributions morphogranulométriques. L'ACP sera utilisée pour l'exploration des données. Une fois cette exploration faite et après avoir identifié les liens entre échantillons, une AFD pourra être utilisée pour confirmer les groupements observés par ACP. Cette AFD permettra de mettre en place un modèle linéaire qui pourra servir à prédire l'appartenance aux groupes définis pour de nouveaux échantillons.

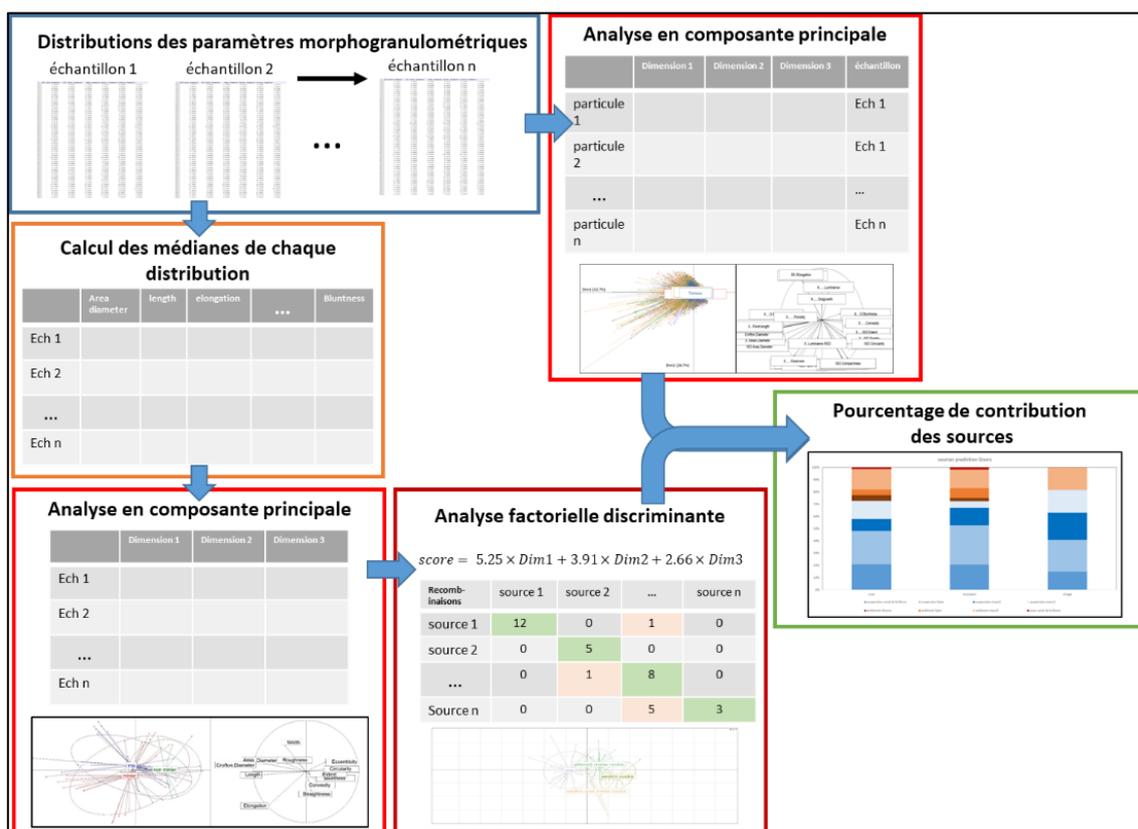


Figure 55 : schéma conceptuel du traitement des données morphogranulométriques pour la réalisation d'un modèle de prédiction des contributions des sources sédimentaires

Ce protocole sera utilisé sur différentes données environnementales :

- Une analyse spatiale sur des échantillons d'un bassin versant minier en Nouvelle-Calédonie (chapitre III).
- Plusieurs analyses spatio-temporelles sur un bassin versant karstique en Normandie (chapitre IV).
- Une utilisation sociétale pour la détermination de l'origine de la turbidité à un captage d'alimentation en eau potable (chapitre V).

### III. SUIVI SOURCE TO SINK D'UN BASSIN VERSANT CONTRASTE : CAS DE THIO

---

#### A. INTRODUCTION

##### 1) Contexte et Problématique

Le fleuve Thio se situe en Nouvelle Calédonie (Figure 56) et possède un bassin versant avec une géologie bien particulière (Figure 57). A l'ouest, sur la rive gauche, le substrat est principalement composé de roches volcano-sédimentaires (en beige et rose sur la carte) tandis que sur sa rive droite (sud-est) et en aval (nord-est), elle reçoit des apports d'affluents s'écoulant sur des roches métamorphiques (en vert sur la carte). Le climat tropical de la Nouvelle Calédonie a provoqué une altération latéritique locale (en rouge sur la carte) de ces roches conduisant à la formation d'importantes réserves de minerai de nickel.

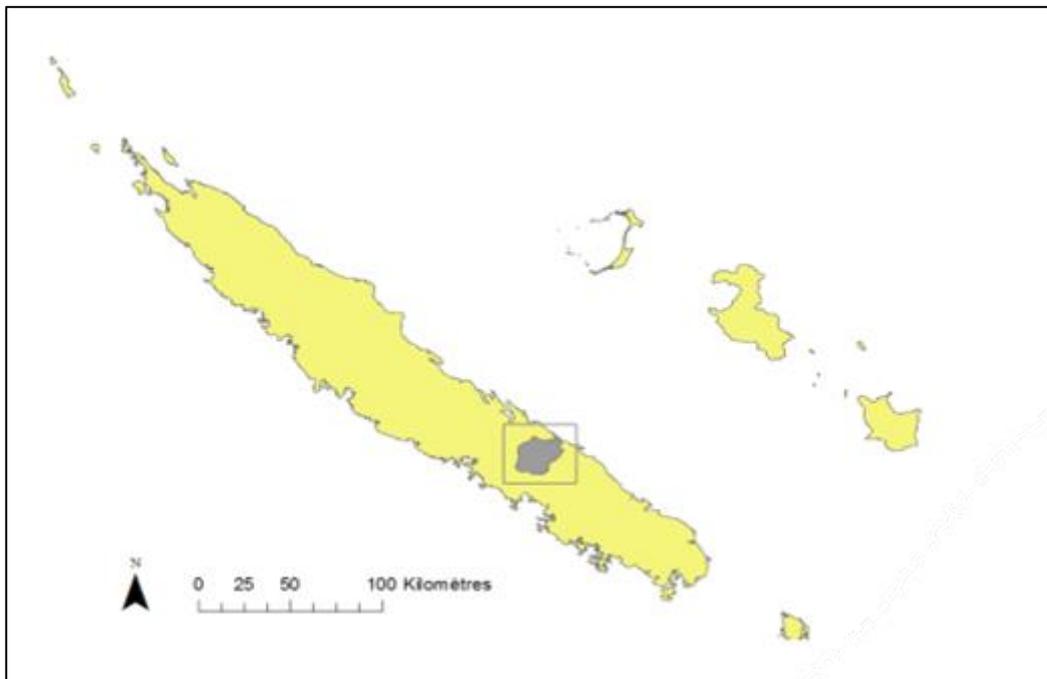


Figure 56 : localisation du site de Thio sur l'île principale de Nouvelle Calédonie

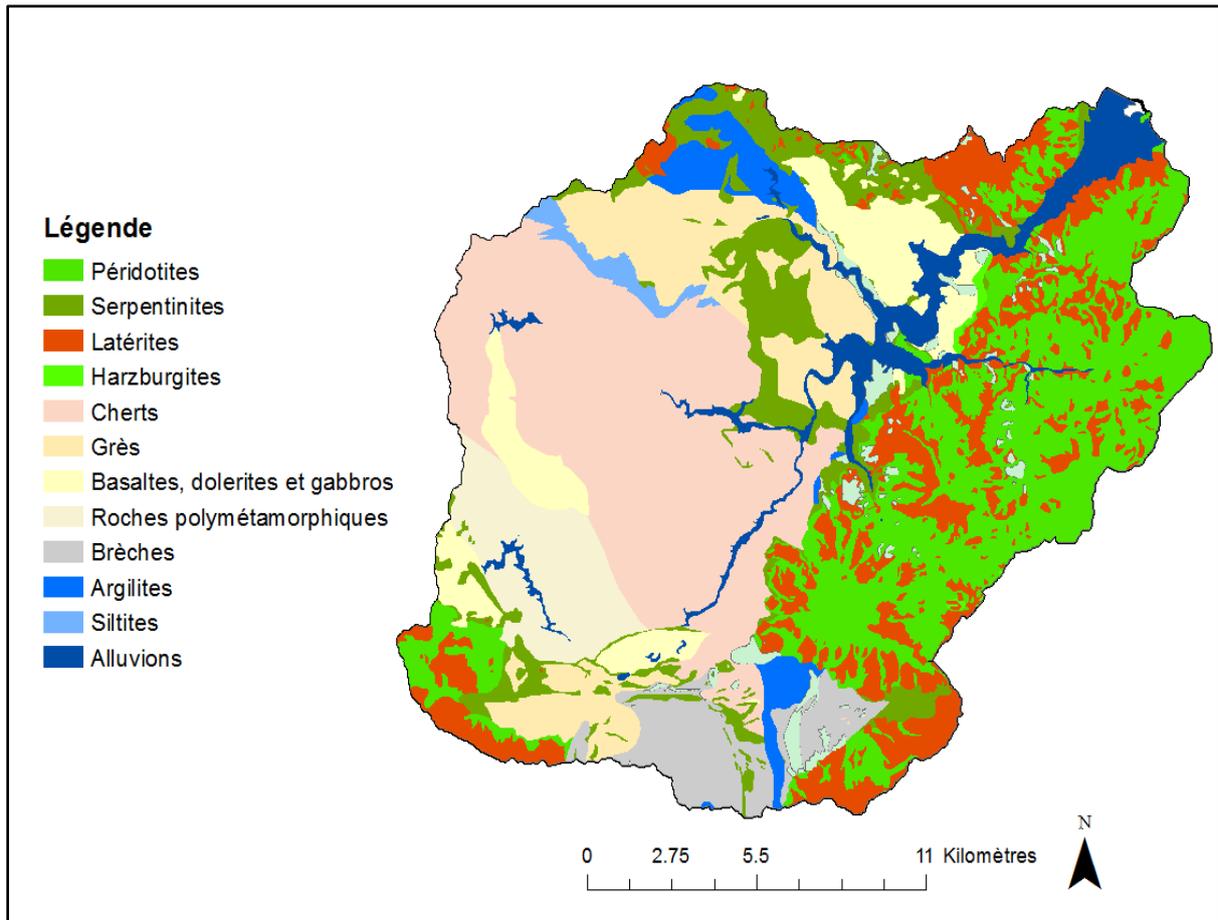


Figure 57 : carte géologique du bassin versant du fleuve Thio (BRGM, 2018)

Ces réserves sont exploitées dans plusieurs mines à ciel ouvert (couvrant 3.2% de la surface du bassin versant) depuis 1920, et certains sites sont désormais abandonnés (Zizette, Bornet, etc). Deux sites restent actifs à ce jour : Camps des Sapins au sud (amont du fleuve), Thio Plateau au nord (aval du fleuve). Les mines abandonnées ont laissé un stock important de latérites sur les versants depuis désormais plusieurs décennies. Les mines encore actives disposent d'un bassin de rétention qui devraient limiter l'apport des fines liées à leur activité vers l'aval. Ces mines sont à l'origine d'une érosion importante (principalement le stock de latérites abandonnés, mais aussi la création de pistes, la circulation des véhicules, etc) dont les apports dans le flux sédimentaire du fleuve restent à quantifier. L'apport en sédiment du bassin versant « non minier » (roches sédimentaires) est principalement lié à l'érosion causée par des glissements de terrain souvent superficiels, des incendies et du surpâturage. Des tempêtes tropicales régulières sont à l'origine du déplacement d'une grande partie de la masse de sédiments érodés dans les deux parties du bassin versant (minier et non minier).

Ce site d'étude fait l'objet d'une thèse en cours (Virginie Sellier, LSCE, Gif-sur-Yvette) dont l'objectif est de développer des techniques de traçage des sources sédimentaires (sediment fingerprinting ; Koiter et al. 2013) à partir de mesures des propriétés géochimiques et colorimétriques des particules (Sellier et al., 2020). La présente étude se focalise, elle, sur les échantillons prélevés dans le cadre de ce projet et s'inscrit dans le même objectif : discriminer les types de sources sédimentaires qui apportent des matériaux au fleuve. Plus spécifiquement, le but ici est de démontrer si la mesure de la taille et de la forme des particules permet de déterminer l'origine des sédiments et si la morphogranulométrie constitue donc une technique pertinente pour le traçage sédimentaire. Dans

un second temps, la possibilité d'utiliser ces signatures morphométriques sera vérifiée pour établir des lois de mélanges sédimentaires pour la rivière du Thio.

## 2)Echantillonnage et préparation

Les mesures ont été réalisées sur plusieurs prélèvements de laisses de crue effectués en 2015. Les échantillons ont été prélevés dans les différents affluents du fleuve et dans le fleuve lui-même (Figure 58, Tableau 17). Chaque échantillon a été analysé 3 fois (3 réplicats, 100 000 à 200 000 particules par réplicat) suivant le protocole présenté dans le paragraphe précédent (chapitre II.H).

Les laisses de crue analysées dans le cadre de cette étude ont été tamisées à 500  $\mu\text{m}$  (qui est comme on l'a vu au chapitre II.D, la taille maximum mesurable par le morphogranulomètre) puis simplement mises en suspension par agitation magnétique pour la durée de la mesure. Tout comme pour les échantillons utilisés dans le chapitre précédent (chapitre 1 : Analyse Méthodologique), la suspension a d'abord été mesurée en 3 réplicats par le morphogranulomètre puis récupérée et analysée au granulomètre laser. Cette méthodologie va permettre de comparer les données du granulomètre laser à celles du morphogranulomètre, et de voir si la mesure de la forme apporte réellement une valeur ajoutée par rapport à la mesure de taille classiquement obtenue avec le granulomètre laser et utilisée comme proxy dans les études sédimentaires.

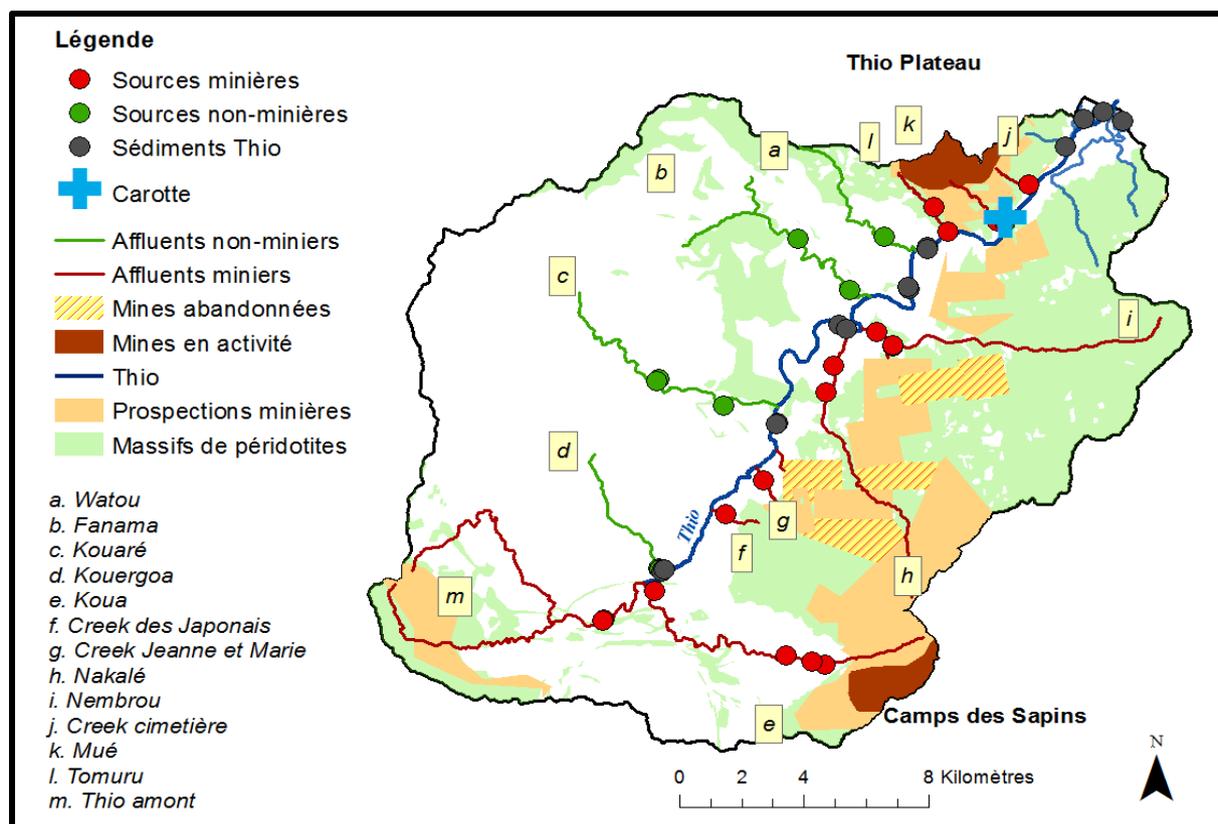


Figure 58 : localisation des points de prélèvement des laisses de crues du fleuve Thio et de ses affluents (sources)

Tableau 17 : liste des échantillons et nomenclature

ech	type	activité	localisation	position	geologie
TLA773	Affluent	minier	Creek cimetièr	aval	altered meta rocks
TLA775	Affluent	minier	Mué	aval	altered meta rocks
TLA778	Affluent	minier	Koua	amont	altered meta rocks
TLA779	Affluent	minier	Koua	amont	altered meta rocks
TLA793	Affluent	non minier	Kouaré	amont	sedim rocks
TLA794	Affluent	non minier	Kouaré	amont	sedim rocks
TLA798b	Affluent	minier	Nakalé	amont	altered meta rocks
TLA798	Affluent	minier	Nakalé	amont	altered meta rocks
TLA799	Affluent	minier	Nakalé	amont	altered meta rocks
TLA800	Affluent	minier	Nembrou	aval	altered meta rocks
TLA802	Affluent	minier	Nembrou	aval	altered meta rocks
TLA809	Affluent	minier	Tomuru	aval	altered meta rocks
TLA810	Affluent	minier	Tomuru	aval	altered meta rocks
TLA816	Rivière Principale	mix	ThioavalA	aval	mix
TLA823	Affluent	non minier	Fanama	aval	sedim and meta rocks
TLA824	Affluent	non minier	Fanama	aval	sedim and meta rocks
TLT774A	Rivière Principale	mix	ThioavalA	aval	mix
TLT789	Rivière Principale	mix	Thioamont	amont	mix
TLT803	Rivière Principale	mix	ThioavalA	aval	mix
TLT804b	Rivière Principale	mix	ThioavalA	aval	mix
TLT804	Rivière Principale	mix	ThioavalA	aval	mix
TLT807	Rivière Principale	mix	ThioavalA	aval	mix
TLT813	Rivière Principale	mix	ThioavalB	aval	mix
TLT814	Rivière Principale	mix	ThioavalB	aval	mix
TLT815	Rivière Principale	mix	ThioavalB	aval	mix
TLT820	Rivière Principale	mix	Thioamont	amont	mix
TLT825	Rivière Principale	mix	ThioavalA	amont	mix

## B. CAPACITE DE LA GRANULOMETRIE A L'IDENTIFICATION DE L'ORIGINE SEDIMENTAIRE

Dans un premier temps, on va observer les distributions de taille des particules. Comme le granulomètre laser mesure le diamètre du cercle d'aire équivalente, il est possible de confronter ces résultats avec la mesure de taille du morphogranulomètre (Figure 59 et Figure 60), tout comme cela a pu être fait dans le chapitre précédent.

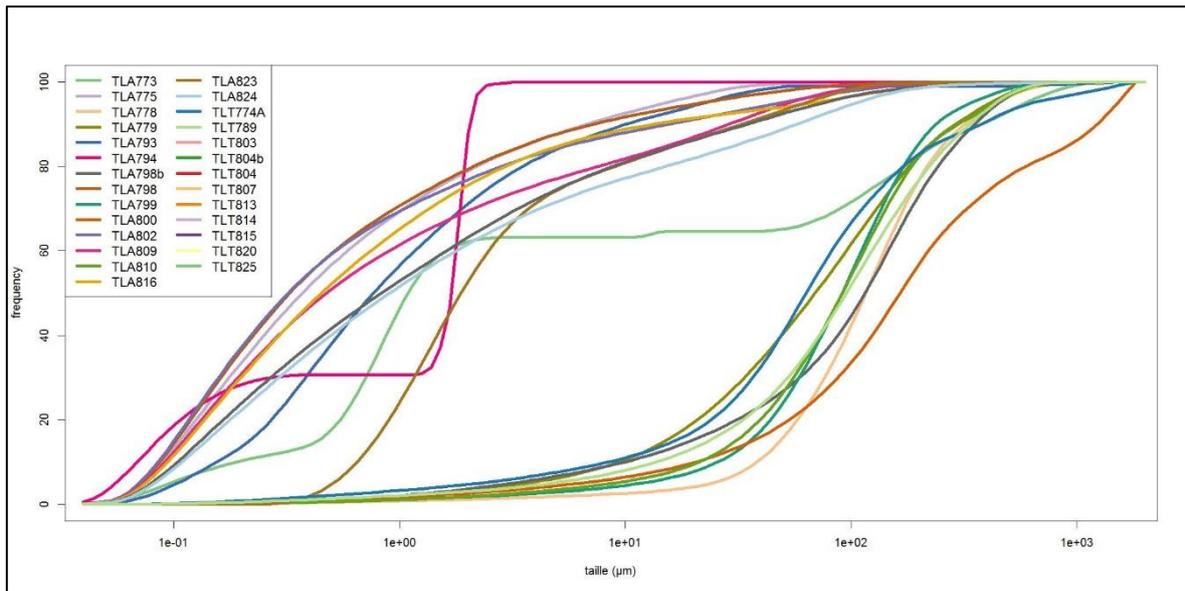


Figure 59 : Distributions granulométriques des échantillons de la rivière Thio et des affluents mesurées au granulomètre laser

On constate à nouveau les différentes gammes de mesures des deux techniques : le granulomètre laser mesurant du submicron ( $0,04 \mu\text{m}$ ) à  $2 \text{ mm}$  tandis que le morphogranulomètre mesure de  $5$  à  $500 \mu\text{m}$  (avec une résolution minimale de  $20 \mu\text{m}$  pour les paramètres de forme). Au granulomètre laser, on observe deux groupes principaux parmi tous les échantillons (Figure 59) : un avec des échantillons présentant  $80\%$  de particules fines inférieures à  $10 \mu\text{m}$  et un autre avec des échantillons présentant des particules plus grossières : plus de  $90\%$  sont supérieures à  $20 \mu\text{m}$ . Par contre, avec le morphogranulomètre (Figure 60), on observe uniquement les particules plus grossières ; les fines étant en dessous de la taille minimale qui peut être capturée avec la résolution de l'appareil ( $5 \mu\text{m}$ ). Avec le granulomètre laser, certains échantillons semblent n'avoir que des « fines », d'autres ne présentent que des particules « grossières ».

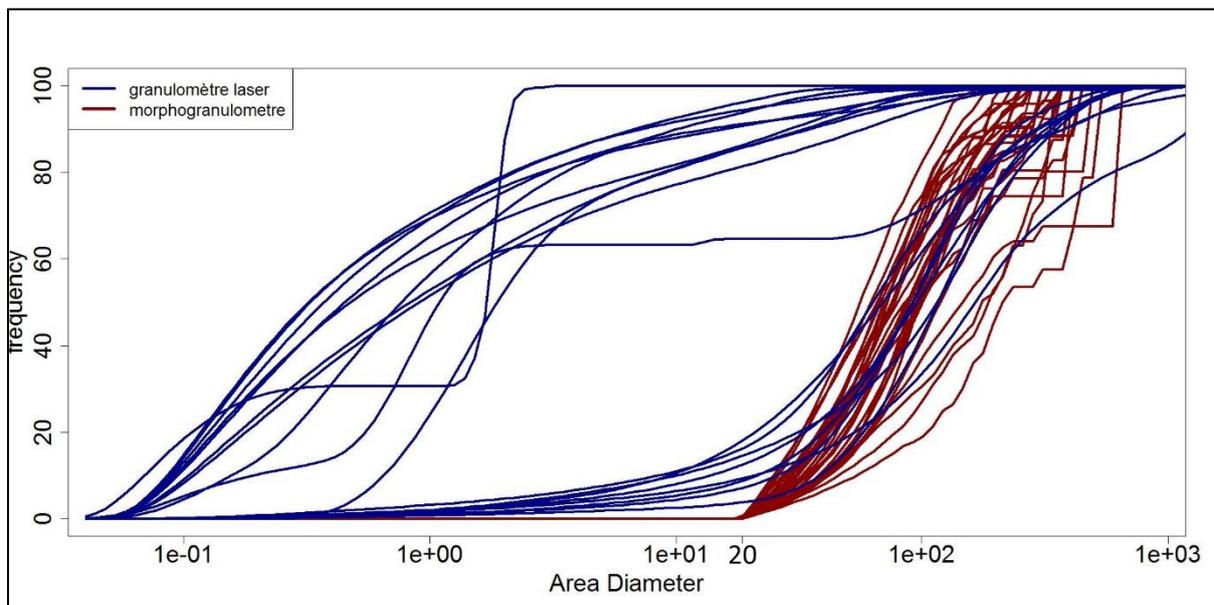


Figure 60 : Distributions granulométriques des échantillons de la rivière Thio et affluents mesurées au morphogranulomètre

Cette différence se retrouve avec la Figure 61 sur les barres en jaunes qui correspondent à la classe granulométrique des argiles (Clay), classe des particules les plus fines. Les échantillons présentant des courbes avec de nombreuses particules fines sur la Figure 59 présentent systématiquement de fortes proportions d'argile. On voit que quasiment tous les échantillons non-miniers présentent au moins 50% d'argile, tout comme plusieurs échantillons miniers. D'autres échantillons miniers présentent des proportions très faibles (moins de 10%). Ces différences entre échantillons miniers se retrouvent parfois sur des échantillons d'un même affluent (TLA800 et TLA802 sont sur le Nembrou, TLA809 et TLA810 sur le Tomuru, TLA798 et TLA799 sur le Nakalé). Parfois c'est l'échantillon aval qui présente le plus d'argile (sur le Nakalé), parfois c'est l'amont (sur le Tomuru). Ces affluents ont des bassins relativement homogènes dans leur géologie (roches métamorphiques altérées).

On n'observe donc pas de répartition claire des distributions en fonction de l'activité minière, de la géologie ou des affluents. On n'observe pas non plus de gradient amont-aval. Il est possible que ces différences proviennent des conditions hydrodynamiques locales au lieu de prélèvement.

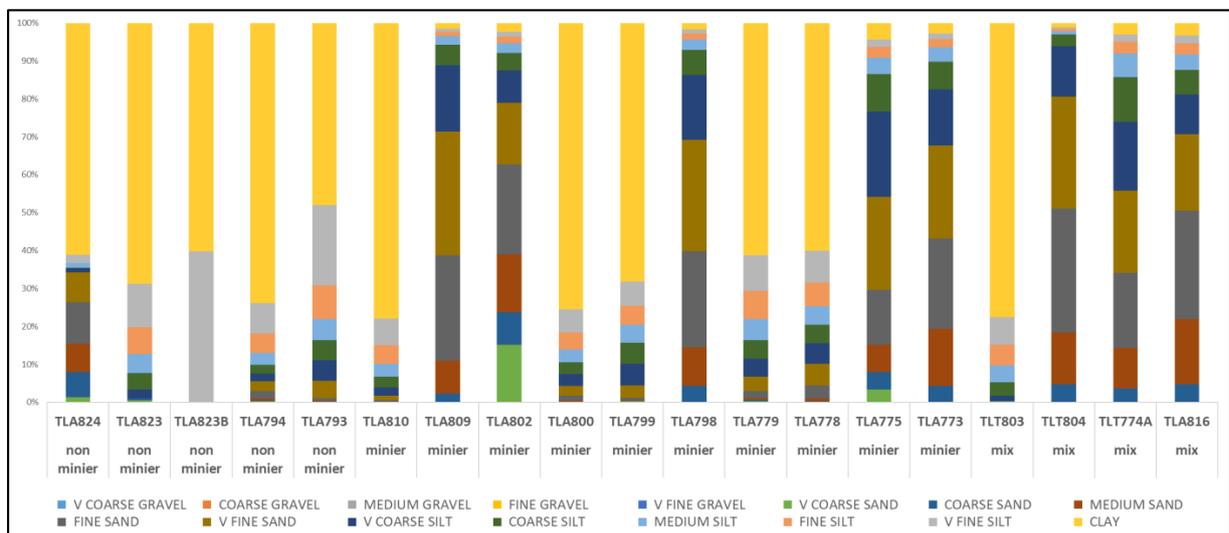


Figure 61 : barplot empilé des différents classements granulométriques de Folk calculé par Gradistat (Blott and Pye, 2001)

Afin de faire une analyse exhaustive des paramètres statistiques calculables à partir d'une distribution de taille, une ACP a été réalisée sur ces échantillons et les paramètres calculés par Gradistat (Blott et al. 2001) à partir des distributions obtenues avec le granulomètre laser (Figure 62 et Figure 63).

Sur la Figure 62, on observe la plupart des paramètres corrélés à l'axe 1 de cette ACP (58% de la variabilité), à l'exception des paramètres de tri (« Sorting ») et des rapports « D75/D25 », « D75-D25 », « D90/D10 » et « D90-D10 » qui sont fortement corrélés avec l'axe 2 (18% de la variabilité).

Sur la Figure 63, on observe la répartition des échantillons suivant différents facteurs :

- En haut à gauche, le facteur est l'activité minière avec les affluents miniers et non miniers ainsi que les mélanges (« mix ») des deux dans les échantillons du fleuve Thio. Les échantillons non miniers sont positifs sur l'axe 1, tandis que les échantillons miniers sont très hétérogènes et présentent des valeurs extrêmes positives et négatives. Enfin, les échantillons « mix » sont négatifs. Avec la granulométrie, les « mix » ne semblent pas

correspondre à un mélange des deux autres pôles, la granulométrie n'est pas conservative sur ces facteurs. De plus la distinction minier/ non minier n'est pas très claire.

- Même chose pour la géologie (en haut à droite), les échantillons d'affluents présentant un mélange de roche sédimentaire et métamorphique (« sedim et meta ») sur leur bassin versant ne se retrouvent pas vraiment entre les deux pôles sédimentaires (« sedim ») et métamorphiques (« altered meta »). Le pôle métamorphique est d'ailleurs très hétérogène et présente des valeurs extrêmes négatives et positives sur l'axe 1, rendant difficile la distinction entre sédimentaire et métamorphique. Le groupe « mix », correspond aux échantillons de la rivière principale. On observe, comme avec l'activité minière, que ces échantillons ne semblent pas correspondre à un mélange des apports des affluents.
- Pour la distinction amont/aval (en bas à gauche), on ne retrouve quasiment aucune distinction entre les deux groupes.
- Et enfin, lorsque les affluents sont en facteur (en bas à droite), on observe quelques affluents bien discriminés sur les axes 1 et 2 (Nakalé, Mué, Kouaré, Creek Cimetièrre) mais d'autres affluents montrent une très grande hétérogénéité (Tomuru, Fanama, Nembrou, Koua) qui rend difficile la distinction des différents affluents avec seulement les données granulométriques.

On n'observe donc pas de séparation claire suivant l'activité minière, suivant un gradient amont-aval, suivant la géologie, ou suivant les affluents sur les deux premiers axes de l'ACP. Une grande variabilité de taille entre échantillons très proches géographiquement est observable et les échantillons de mélanges ne sont pas toujours conscrits entre les différents pôles, ce qui implique un biais de conservativité du traceur.

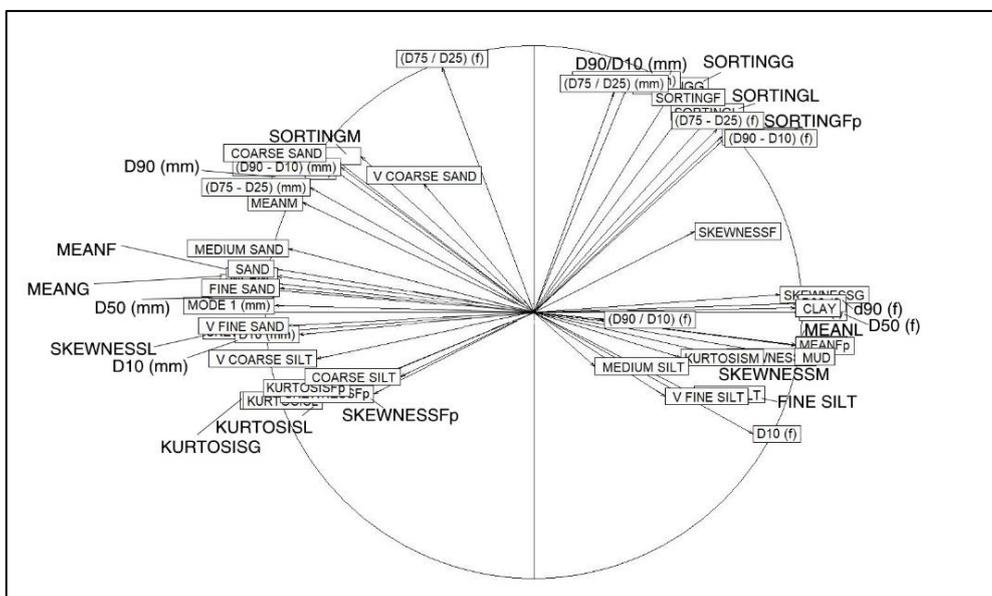


Figure 62 : cercle de corrélation des paramètres statistiques calculés avec Gradistat (Blott and Pye, 2001) sur les axes 1 et 2 l'ACP sur les échantillons de laisses de crue du bassin versant (58 et 18 % de variabilité expliquée) ; suffixe « f » ou « F » : calculé par la méthode de Folk et Ward arithmétique ; suffixe « M » ou « mm » : méthode des moments arithmétique ; suffixe « G » : méthode des moments géométrique ; suffixe « L » : méthode des moment Logarithmique ; suffixe « Fp » : méthode de Folk et Ward logarithmique (Blott and Pye, 2001)

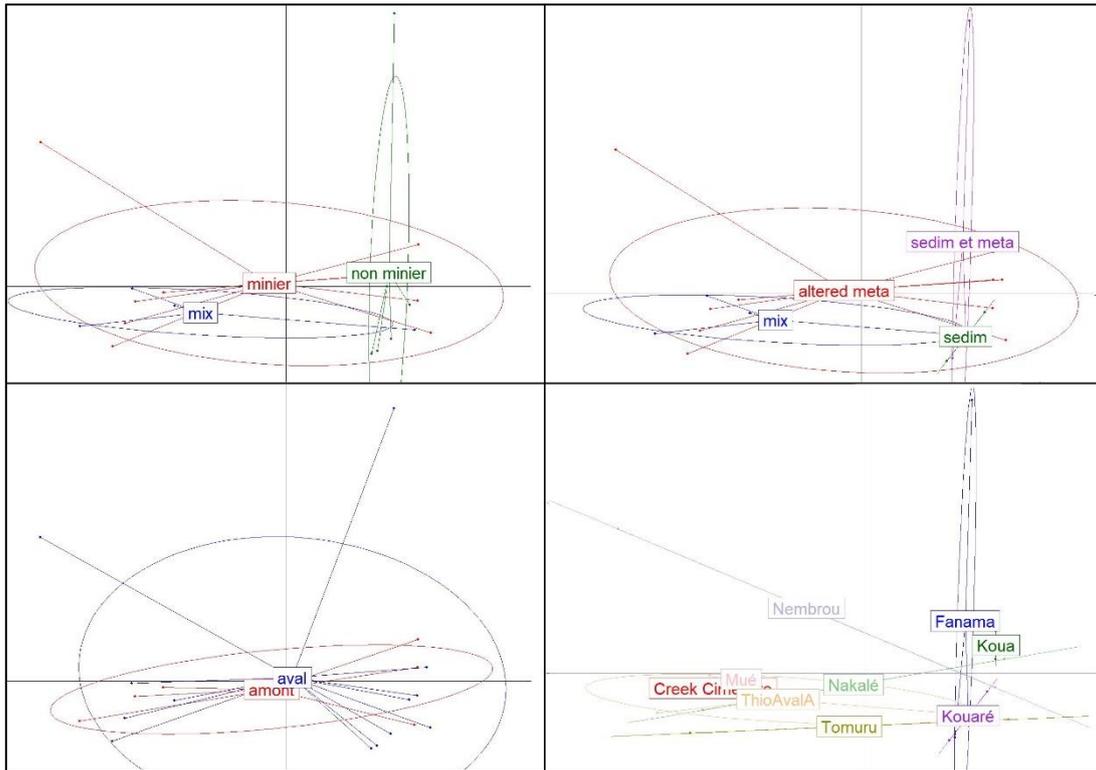


Figure 63 : Représentation des échantillons de laisses de crue du bassin versant sur les axes 1 et 2 de l'ACP suivant leur valeur sur les paramètres statistiques calculés avec Gradistat (Blott and Pye, 2001) ; A : plan des individus groupés selon leur activité ; B : plan des individus groupés selon leur géologie ; C : plan des individus groupés selon leur position amont/aval ; D : plan des individus groupés selon leur affluent

Le granulomètre laser ne semble donc pas permettre d'observer de différence notable entre les échantillons suivant l'activité minière, la géologie, la localisation amont/aval ou les différents affluents. L'hypothèse que ces variations proviennent de conditions hydrodynamiques locales est finalement la plus plausible. Dans ce cas pratique, la granulométrie ne semble pas fournir un outil adéquat pour tracer les sources sédimentaires.

## C. APPORT DE LA MORPHOGRANULOMETRIE A L'IDENTIFICATION DE L'ORIGINE SEDIMENTAIRE

### 1) Distributions de fréquence

Lorsque l'on regarde les distributions de fréquences sur les 4 paramètres présentés (Bluntness, Convexity, Elongation, Straightness) selon les structurations spatiales (activités minières, amont-aval, sous bassins-versants) respectivement Figure 64, Figure 65, Figure 66, on observe que les courbes des différents échantillons semblent se détacher les unes des autres, au moins de manière ponctuelle. L'Elongation semble même montrer que les échantillons suivent différents modes et sont donc bien distinguables les uns des autres. Pour l'activité minière (Figure 64), il semble y avoir une séparation entre les mélanges (mix) et le reste sur les paramètres Bluntness et Convexity. Toutefois, on ne distingue pas les échantillons « miniers » des « non miniers » sur ces paramètres. Sur la différence amont/aval (Figure 65), on n'observe pas non plus de discrimination.

Il semble que, suivant un classement par affluent (Figure 66), les différentes couleurs semblent assez bien se distinguer sur chaque paramètre. Malgré tout, compte tenu du grand nombre d'affluents, cette représentation graphique n'est pas la plus simple pour distinguer les associations de proximité

entre affluents parmi la grande quantité de courbes sur chaque paramètre mesuré. Si l'on observe de telles différences au niveau des distributions, la médiane de chaque échantillon devrait rendre compte de ces différences, tout en synthétisant l'information. Cela devrait donc permettre de caractériser plus aisément nos échantillons.

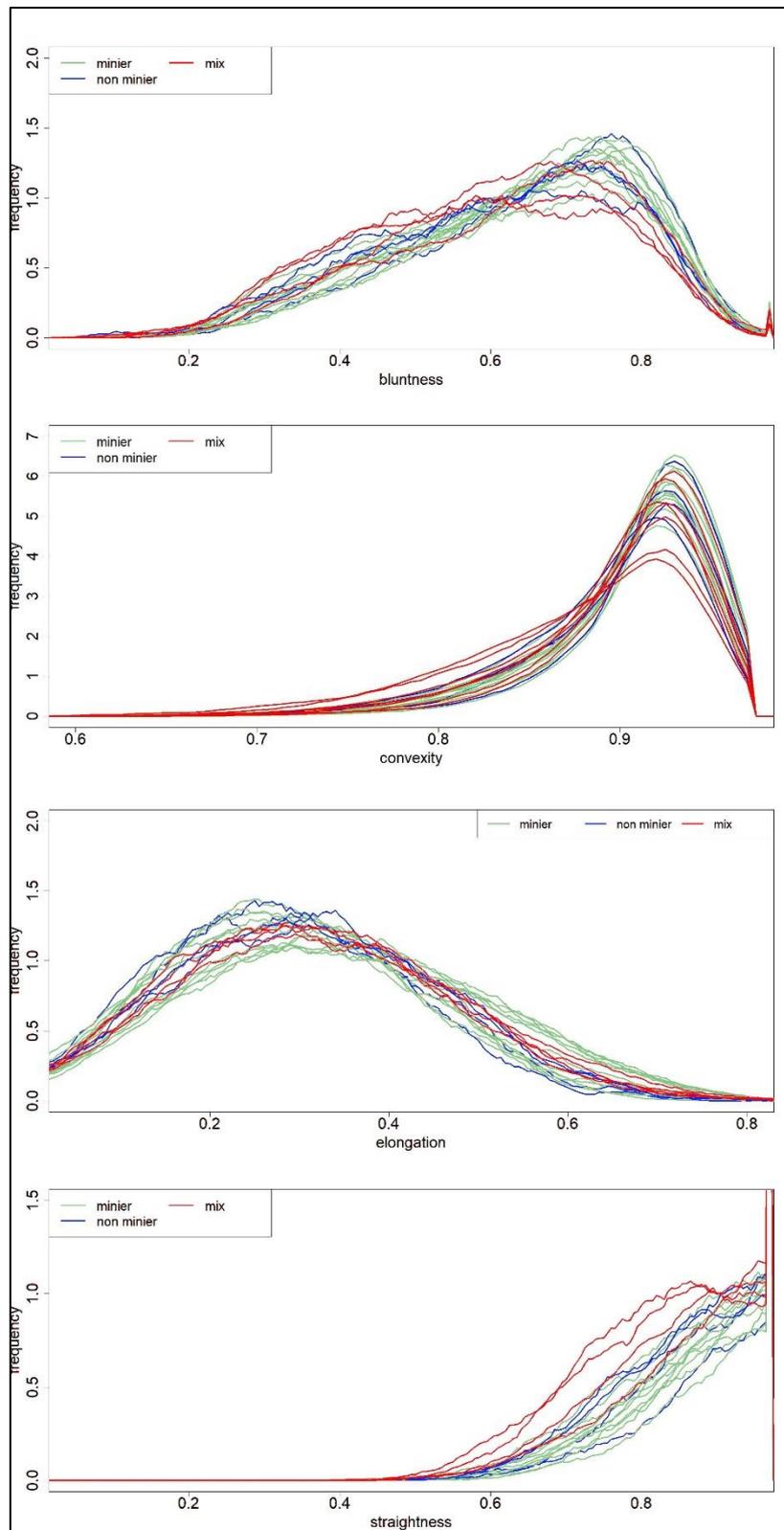


Figure 64 : Distributions des fréquences des particules pour chaque échantillon sur plusieurs paramètres (Bluntness, Convexity, Elongation et Straightness), les courbes sont colorées en fonction de l'activité minière

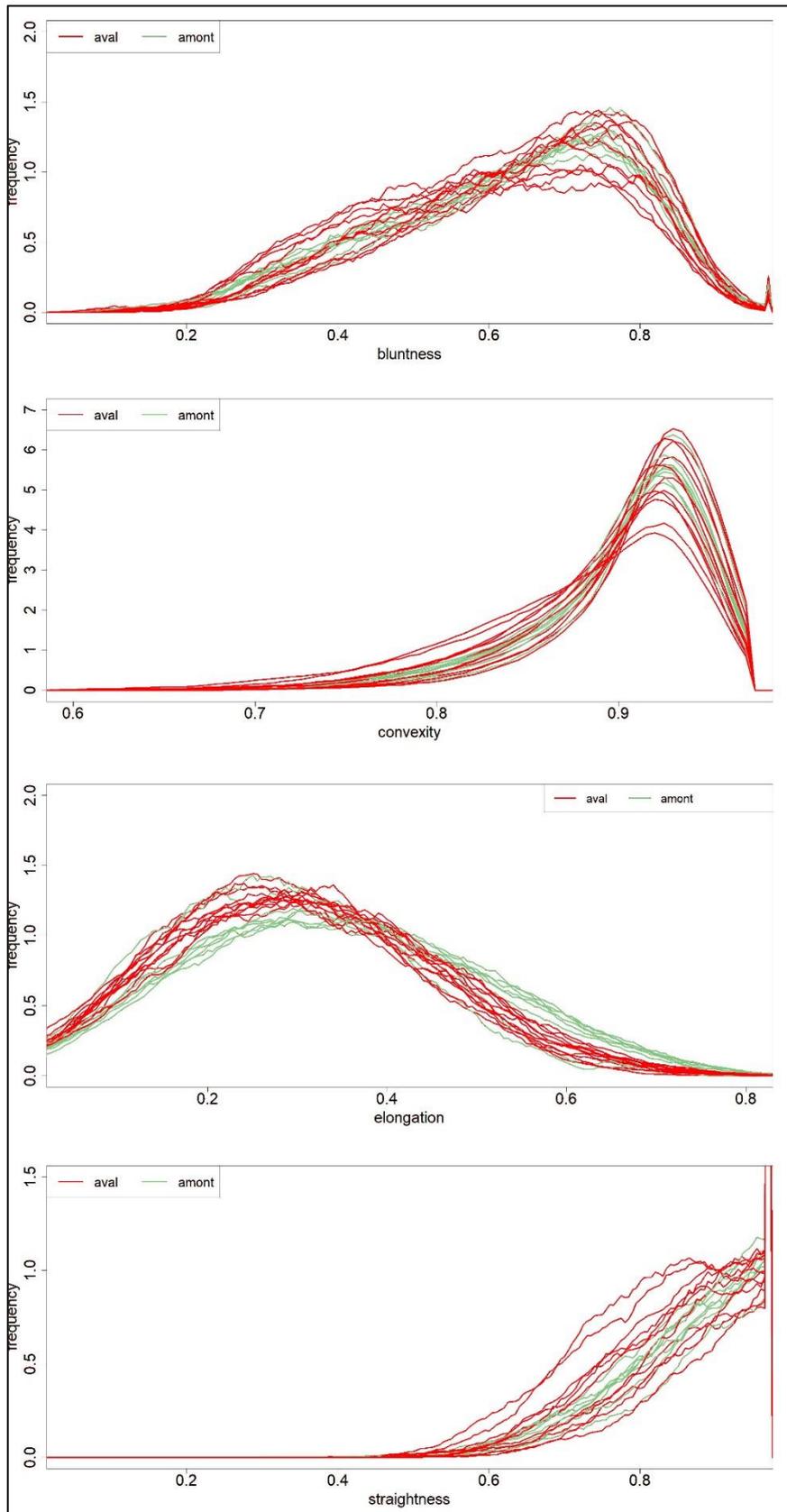


Figure 65 : Distributions des fréquences des particules pour chaque échantillon sur plusieurs paramètres (Bluntness, Convexity, Elongation et Straightness), les courbes sont colorées en fonction de la localisation amont/aval

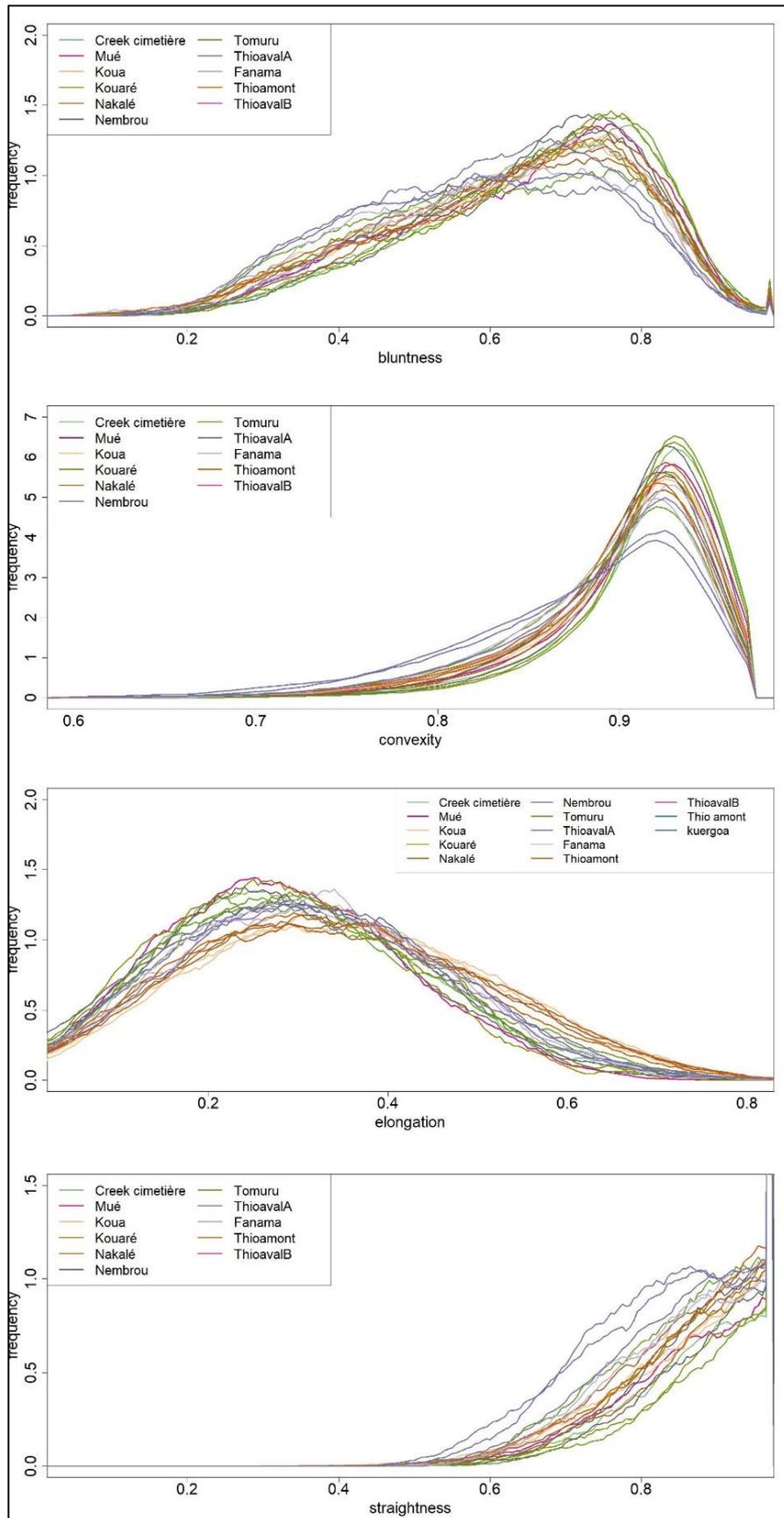


Figure 66 : Distribution des fréquences des particules pour chaque échantillon sur plusieurs paramètres (Bluntness, Convexity, Elongation et Straightness), les courbes sont colorées en fonction de leur affluent

## 2) Etude sur les médianes

Après avoir testé plusieurs paramètres statistiques (moyenne, écart type, Skewness, max, min), la médiane semble être le paramètre le plus concluant pour transcrire les observations sur les distributions, d'une part parce que les distributions ne sont pas normales et que d'autre part la médiane est un estimateur du paramètre central moins biaisé que la moyenne dans ces cas-là (chapitre II.F.3), Saporta, 2011).

Une ACP sur les médianes des distributions de chaque échantillon est donc réalisée (Figure 67, Figure 68). L'axe 1 de cette ACP (64% de la variabilité, Figure 67) est corrélé avec la plupart des paramètres de formes (Eccentricity, Convexity, Circularity, Bluntness, Straightness, Extent en négatif et roughness en positif). L'axe 2 (24% de variabilité, Figure 67) est anticorrélé avec les paramètres de taille (Area Diameter, Length, Crofton Diameter) et l'Elongation. L'axe 3 (9% de la variabilité, Figure 68) est principalement anticorrélé avec l'Elongation.

La répartition des échantillons dans le plan factoriel des individus peut être observée selon différents facteurs.

### a) Facteur par activité minière

En prenant l'activité minière comme facteur (Figure 67, Figure 68), on note d'abord peu de distinctions entre minier et non minier selon la dimension 1 (Figure 67). Certains échantillons du groupe de mélange « mix » se distinguent toutefois sur cet axe, présentant une forme plus irrégulière. La distinction des 2 pôles (minier/non minier) se fait selon l'axe 2, avec la taille, avec des échantillons miniers plus grossiers.

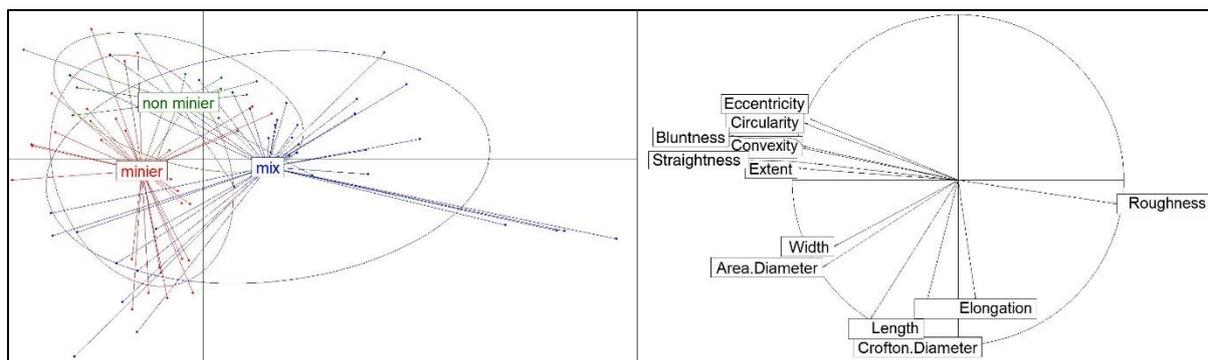


Figure 67 : Représentation des médianes des échantillons du bassin de Thio sur les axes 1 et 2 de l'ACP (respectivement 64 et 24% de la variabilité) suivant leur valeur des 12 paramètres morphogranulométriques avec l'activité minière en facteur

La dimension 3 (9% de la variabilité) ne permet pas d'observer des différences plus nettes (Figure 68). Il semble y avoir les deux groupes « minier » et « non minier » qui se rejoignent ensemble au niveau du groupe « mix », qui ici pourrait former un mélange des deux.

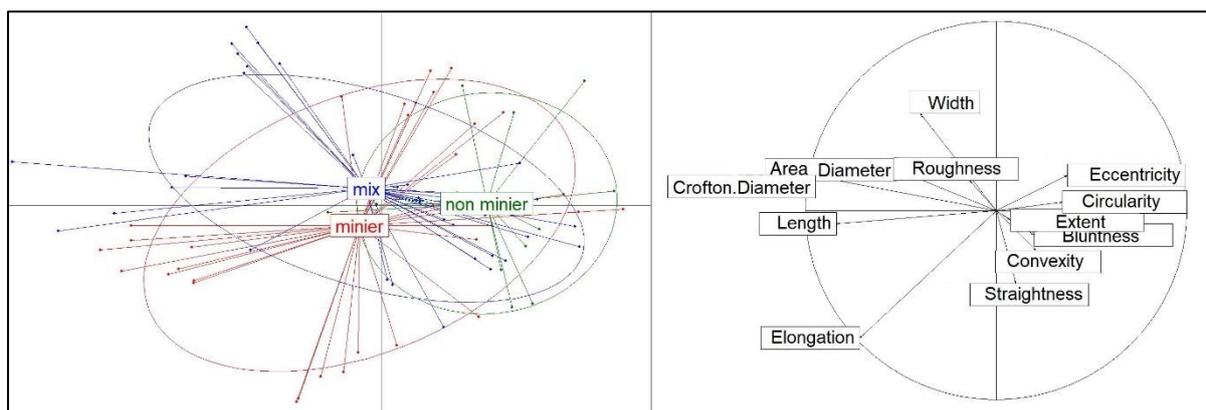


Figure 68 : Représentation des médianes des échantillons du bassin de Thio sur les axes 2 et 3 de l'ACP (respectivement 24 et 9% de la variabilité) suivant leur valeur des 12 paramètres morphogranulométriques avec l'activité minière en facteur

Ces observations visuelles ne montrent donc pas de différences franches. Le Tableau 18 illustre les recombinaisons de l'AFD sur les résultats de l'ACP et va permettre de vérifier si les échantillons se classent correctement selon les 3 groupes définis. On constate sur ce tableau que les échantillons « miniers » et « non miniers » sont confondus avec les échantillons de mélange « mix » (35% de recombinaison).

Tableau 18 : Recombinaisons sur l'AFD entre les 2 bassins versants et la rivière (mix)

fac	minier	mix	non minier
minier	27	4	2
mix	12	23	1
non minier	6	3	3

En supprimant le groupe « mix » pour ne garder que les individus sources, on obtient le Tableau 19 :

Tableau 19 : Recombinaisons sur l'AFD entre les 2 bassins versants

fac	minier	non minier
minier	30	3
non minier	9	3

La plupart des échantillons « non minier » sont classés dans le mauvais groupe à nouveau (27% de recombinaison). Les taux de recombinaison sont moyens, il semble que d'autres facteurs que l'activité minière seule entrent en jeu.

### b) Facteur par géologie

En définissant chaque échantillon en fonction de la géologie de l'affluent sur lequel il se trouve, on observe la répartition sur la Figure 69. Il semble avec ce facteur que les centres des ellipses des groupes géologiques définis semblent bien se distinguer mais, tout comme pour l'activité minière, les ellipses se chevauchent ce qui pourrait amener à d'éventuelles recombinaisons dans un modèle prédictif.

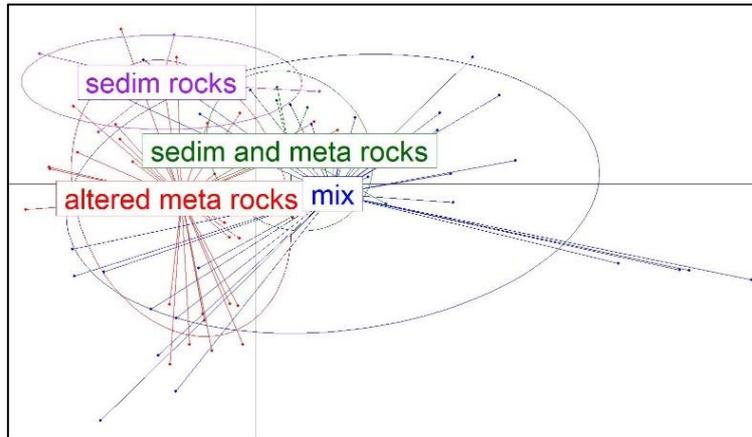


Figure 69 : Représentation des médianes des échantillons du bassin de Thio sur les axes 1 et 2 de l'ACP suivant leur valeur des 12 paramètres morphogranulométriques avec leur géologie en facteur

En projetant les individus sources sur les axes de l'AFD en fonction de leur score sur cette dernière on obtient la Figure 70. Il semble que les groupes soient bien détachés et bien définis, mais la prédiction indique que, même en enlevant les échantillons de mélange, les recombinaisons (Tableau 20) restent moyennes (29%).

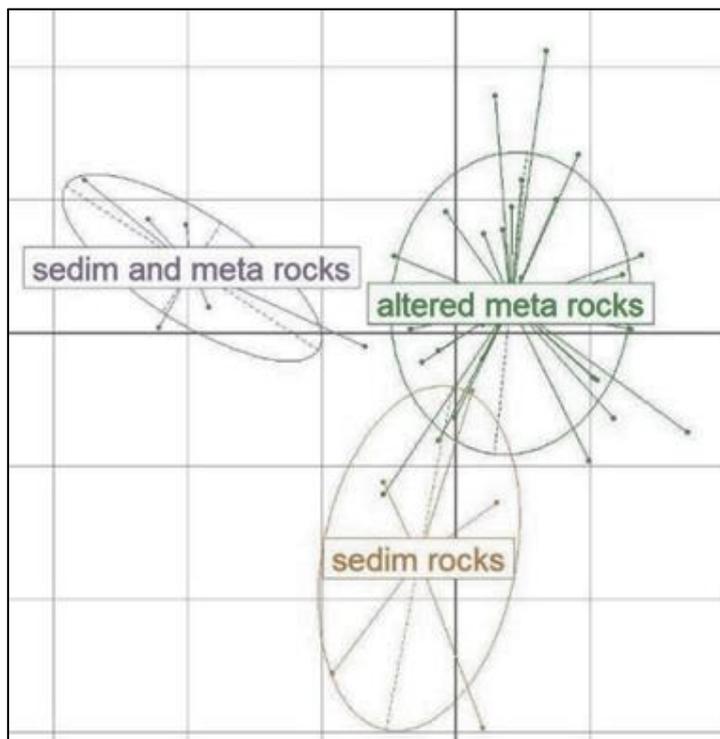


Figure 70 : Projection des scores des individus sur les axes de l'AFD avec la géologie en facteur

Tableau 20 : Recombinaisons sur l'AFD entre les différentes géologies

fac	altered meta rocks	sedim and meta rocks	sedim rocks
altered meta rocks	31	2	0
sedim and meta rocks	5	1	0
sedim rocks	5	1	0

### c) Facteur par affluents

En utilisant les affluents comme facteur sur les plans factoriels F1F2 et F2F3 (Figure 71 et Figure 72), on observe de claires différences entre les médianes des échantillons des différents affluents suivant la dimension 2 (Elongation, Width, Length). Notamment les affluents Koua et Nakalé qui ont des particules de taille plus grande et plus allongée que les autres. Au contraire, les affluents Kouaré et Creek Cimetière ont une taille et une élongation plus petite que le reste. Fanama Tomuru, Nembrou et Mué se situent entre ces deux pôles.

La dimension 1 (Circularity, Convexity, etc) montre peu de différences entre les affluents, mais permet de différencier les tronçons de la rivière Thio de l'amont vers l'aval. Ces tronçons sont spatialisés sur la carte à la Figure 73. Les échantillons aval présentent des formes plus petites et émoussées que les échantillons amont. Ceci est probablement le fait de l'usure causée par un transport plus long pour les particules au fur et à mesure qu'elles se retrouvent à l'aval.

La dimension 3 est principalement corrélée à l'élongation, elle discrimine donc à nouveau Koua et Nakalé (particules très allongées) de Kouaré, Creek Cimetière et Mué (peu allongées). Les échantillons de Thio et des autres affluents se retrouvent sur des valeurs intermédiaires.

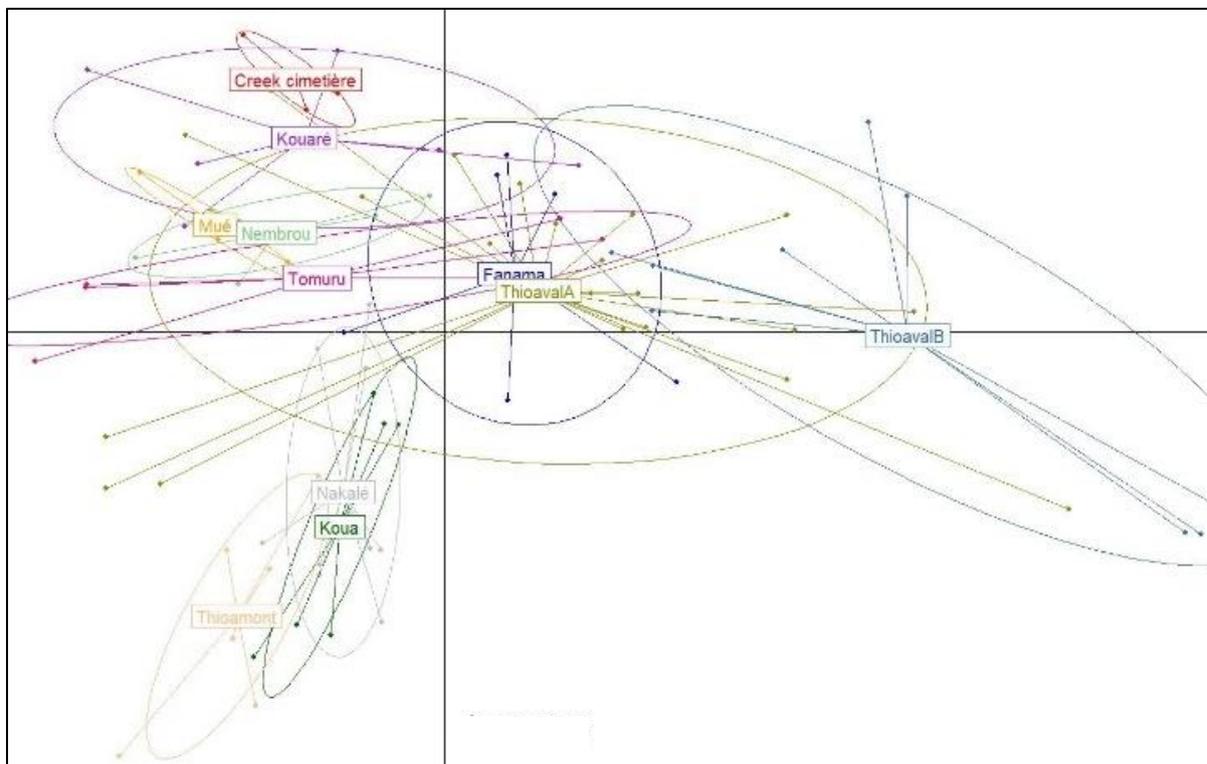


Figure 71 : Représentation des médianes des échantillons du bassin de Thio sur les axes 1 et 2 de l'ACP suivant leur valeur des 12 paramètres morphogranulométriques avec les différents affluents en facteur

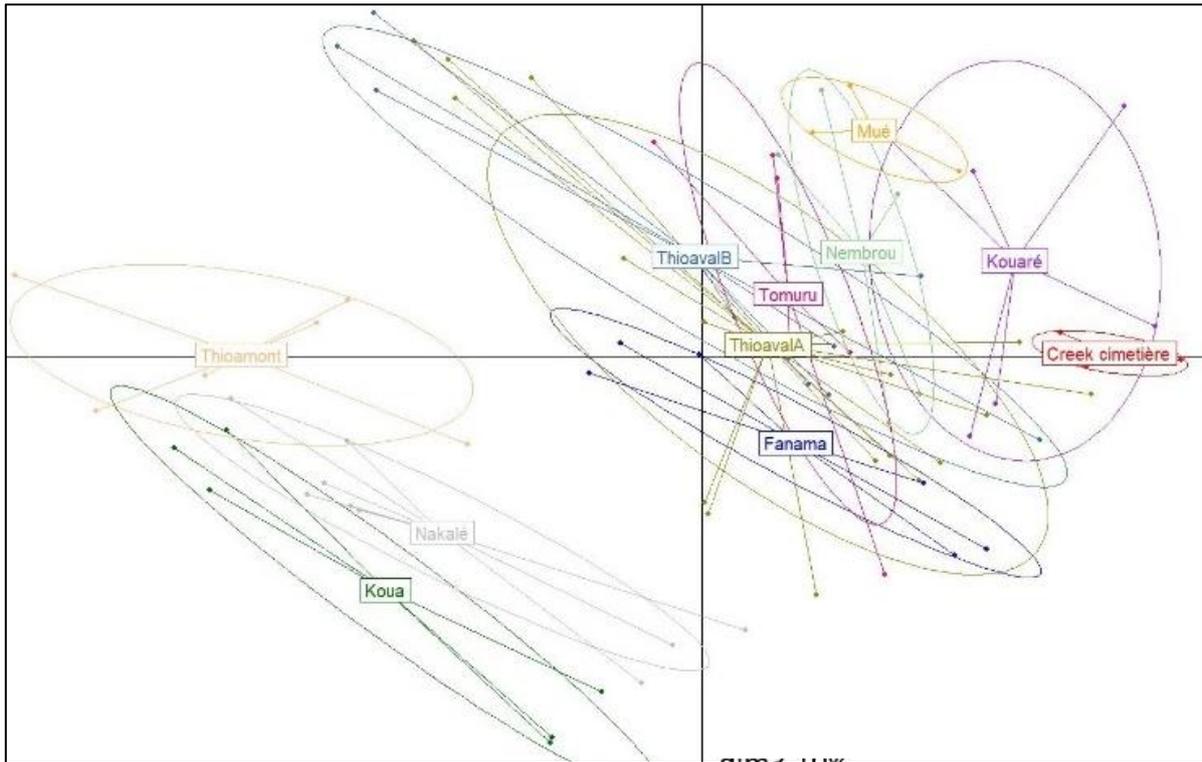


Figure 72 : Représentation des médianes des échantillons du bassin de Thio sur les axes 2 et 3 de l'ACP suivant leur valeur des 12 paramètres morphogranulométriques avec les différents affluents en facteur

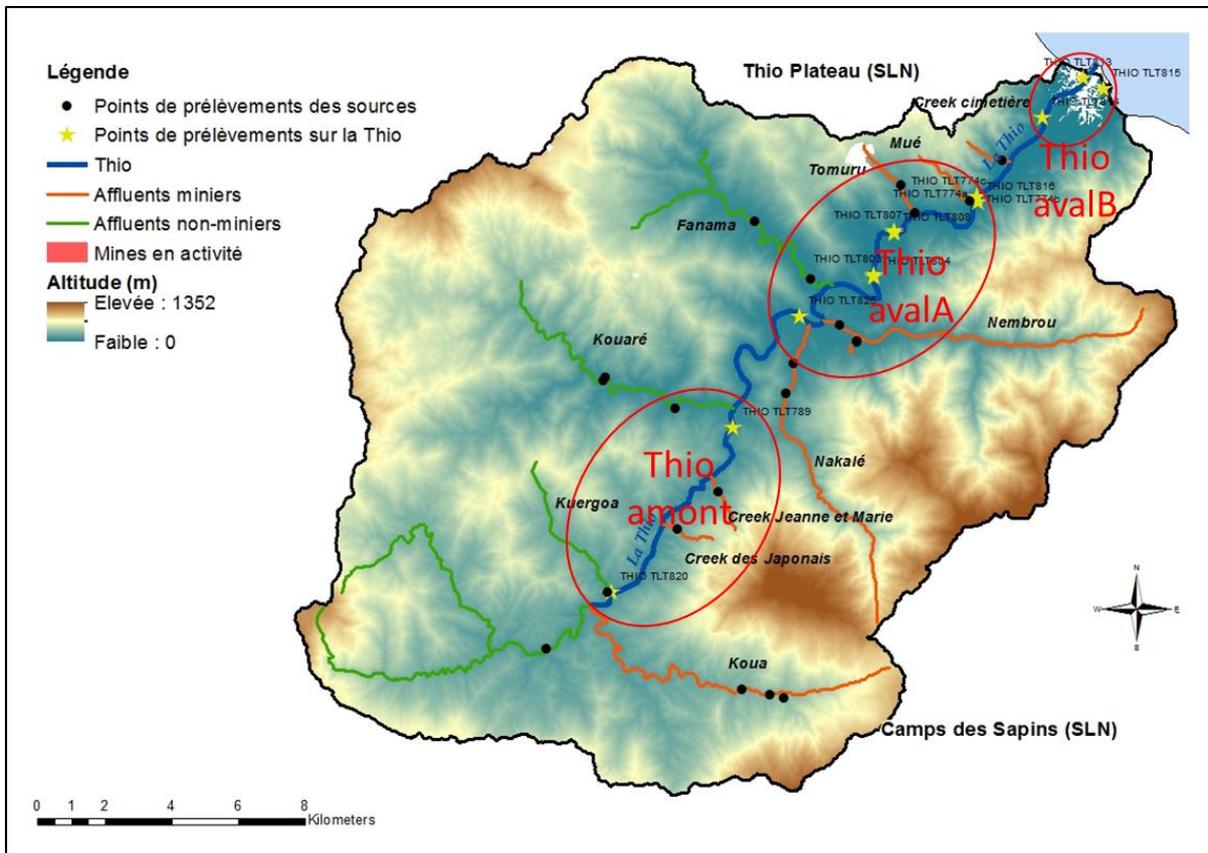


Figure 73 : Carte de l'échantillonnage illustrant les groupes amont/aval pour les échantillons du fleuve Thio

Contrairement à l'analyse granulométrique (Figure 63), ici les différents affluents sont isolés en groupes mieux circonscrits, avec moins de variabilité intra-groupe. Pour vérifier la validité de cette classification par affluents avec les paramètres morphogranulométriques, une AFD a été réalisée à partir des résultats de l'ACP des médianes. La projection (Figure 74) semble représentative des résultats de l'ACP. On constate 36% de recombinaisons (Tableau 21) entre tous les groupes mais la plupart de ces mélanges se font par secteur géographique (Thio aval A avec Fanama, Kouaré, Nembrou, Tomuru) Les groupes Thio étant des groupes « mélanges », si on les retire afin d'observer uniquement les sources, on n'observe plus que 13% de recombinaison là encore par secteur géographique (Fanama vs Tomuru, Nakalé vs Koua) (Tableau 22). Cette classification semble donc plus pertinente que les précédentes.

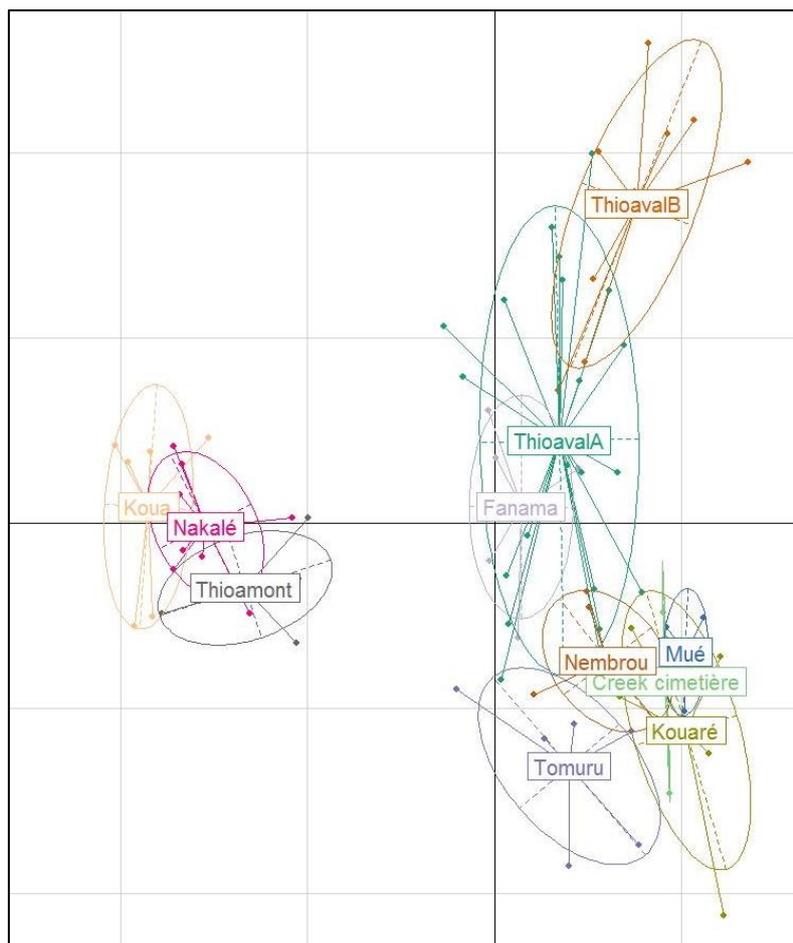


Figure 74 : Projection des scores des individus sur les axes de l'AFD avec les affluents en facteur

Tableau 21 : Recombinaisons sur l'AFD entre les affluents et le fleuve Thio

fac	Creek cimetiére	Fanama	Koua	Kouaré	Mué	Nakalé	Nembrou	Tomuru	Thioamont	Thioava1A	ThioavalB
Creek cimetiére	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
Fanama	0	1	0	0	0	0	0	0	0	5	0
Koua	0	0	5	0	0	1	0	0	0	0	0
Kouaré	0	0	0	4	0	0	0	0	0	2	0
Mué	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0
Nakalé	0	0	1	0	0	8	0	0	0	0	0
Nembrou	0	0	0	0	0	0	4	0	0	2	0
Tomuru	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	0
Thioamont	0	0	1	0	0	2	0	0	3	0	0
Thioava1A	1	3	0	0	0	0	0	3	0	12	2
ThioavalB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6

Tableau 22 : Recombinaisons sur l'AFD entre les affluents

fac	Creek cimetièr	Fanama	Koua	Kouaré	Mué	Nakalé	Nembrou	Tomuru
Creek cimetièr	3	0	0	0	0	0	0	0
Fanama	0	5	0	0	0	0	0	1
Koua	0	0	4	0	0	2	0	0
Kouaré	0	0	0	5	1	0	0	0
Mué	0	0	0	0	3	0	0	0
Nakalé	0	0	0	0	0	9	0	0
Nembrou	0	0	0	0	1	0	4	1
Tomuru	0	1	0	0	0	0	0	5

L'élongation étant le paramètre principal contrôlant les dimensions 1 et 3 de l'ACP (Figure 71, Figure 72), il est possible de distinguer les affluents avec un simple graphique XY en traçant le rapport élongation médiane-taille médiane (Figure 75). Les résultats sont très proches de ce que l'on observe avec l'ACP.

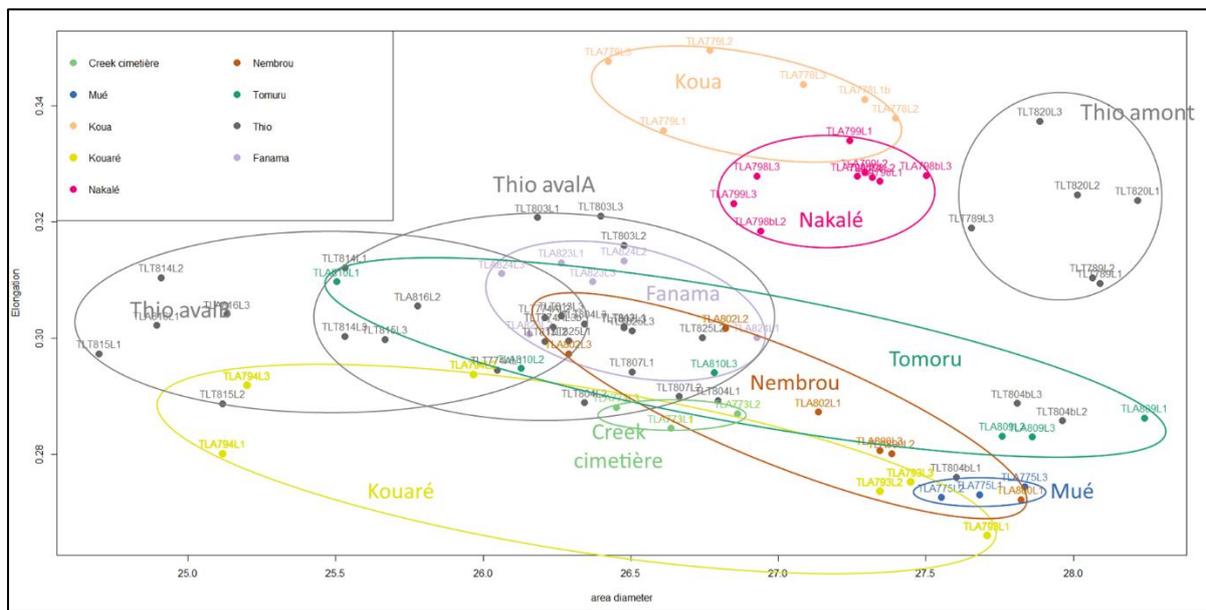


Figure 75 : Graphique XY des médianes des paramètres Area Diameter et Elongation

On retrouve à nouveau Koua et Nakalé à l'écart des autres échantillons. Ce sont deux affluents miniers, leur signature pourrait provenir de cette activité, les particules plus allongées en seraient alors un marqueur. Le fait que les autres affluents miniers (Creek Cimetièr, Mué, Tomuru et Nembrou) n'ont pas cette signature serait alors un signe que l'activité minière sur ces 2 affluents génère des apports de sédiments qui ne se retrouvent pas dans les autres. Les différentes mines de la région ont chacune un historique et des pratiques différentes. Koua draine la mine encore active de Camp des Sapin, et est donc équipée de bassins de rétention qui devraient limiter l'apport des fines vers l'aval. Nakalé draine la mine abandonnée de Zizette. Les observations de terrains ne permettent pas de tirer de conclusion définitive sur le fait que l'activité minière soit liée à cette différence de signature morphométrique entre affluents, les résultats d'autres tests avec différents traceurs pourraient permettre d'approfondir cette question.

### 3) Facteurs combinés et modèle de mélange

Certains affluents ont donc des signatures très proches, difficilement distinguables entre elles. Il paraît donc justifier de les regrouper. Cinq critères ont été utilisés pour cela : (1) selon la présence de recombinaison sur les AFD précédentes ; (2) selon la présence d'activité minière ou non sur leur

bassin ; (3) selon leur proximité sur l'ACP ; (4) selon leur position amont/aval et (5) selon la géologie de leur bassin versant.

- Koua + Nakalé = groupe « Minier amont » (le groupe le plus évident, ce sont les deux affluents miniers les plus amonts, ils présentent tous les deux une taille plutôt grande et une très haute élongation qui les distingue du reste sur l'ACP et ils s'écoulent sur des roches métamorphiques altérées).
- Nembrou + Tomuru = groupe « Minier aval » (ce sont deux échantillons miniers aval présentant des valeurs d'élongations moyennes et des recombinaisons sur les AFD, leur bassin versant est composé de roches métamorphiques altérées également).
- Creek Cimetièrre + Kouaré + Mué = groupe « rive gauche » (ce sont trois échantillons présentant les plus faibles valeurs d'Elongation et ont des recombinaisons entre eux sur l'AFD, Kouaré n'a pas d'activité minière sur son bassin alors que les deux autres ont la mine active de Thio Plateau, leur géologie varie également, les échantillons de Kouaré ont un bassin versant sédimentaire alors que Creek cimetièrre et Mué sont métamorphiques).
- Fanama (le seul échantillon au centre de toutes les ACP, il n'a pas d'activité minière sur son bassin et a une signature propre, son bassin versant contient des roches sédimentaires et des roches métamorphiques).

Des tests d'indépendance de Kruskal-Wallis ont été réalisés pour vérifier si ces groupes sont différenciés de manière significative par les paramètres morphométriques. Ces tests montrent que tous les groupes ont une différence entre eux statistiquement significative sur plusieurs paramètres (au moins 7 paramètres permettent de différencier chaque couple de groupe testé). La projection sur l'AFD (Figure 76) montre que ces 4 groupes sont bien détachés les uns des autres. Avec ces groupes, on observe seulement 3 recombinaisons sur les 45 mesures (7%, Tableau 23).

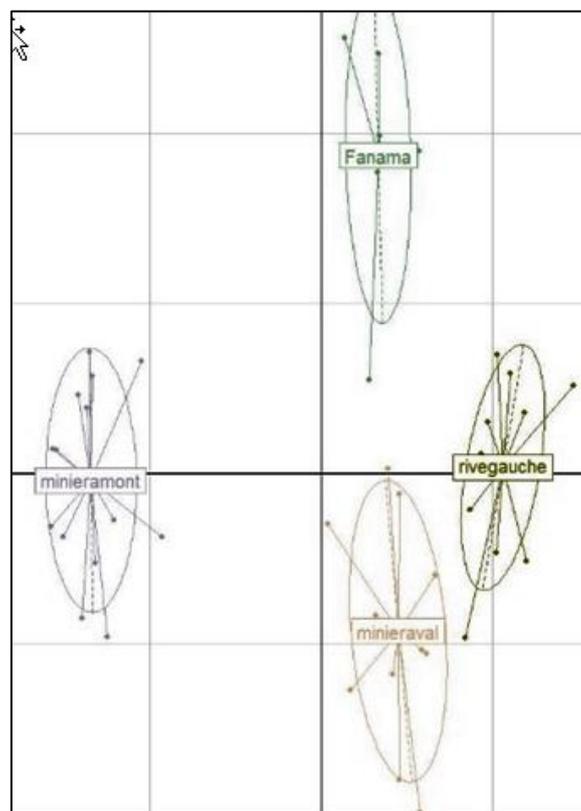


Figure 76 : Projection des scores des individus sur les axes de l'AFD avec les groupes en facteur

Tableau 23 : Recombinaisons sur l'AFD entre les groupes d'affluents

fac	Fanama	minieramont	minieraval	rivegauche
Fanama	5	0	1	0
minieramont	0	15	0	0
minieraval	1	0	10	1
rivegauche	0	0	0	12

Le modèle est à la fois un des plus simple avec seulement 4 groupes et le plus performant avec si peu de recombinaisons. Ce sera donc ce classement qui sera utilisé comme base pour le modèle de mélange sur les échantillons de la rivière Thio. Le modèle correspond donc à l'AFD réalisée sur les médianes des échantillons en fonction de leur appartenance aux groupes définis précédemment. Sa formule est : (Dimension 1, 2 et 3 sont les dimensions de l'ACP).

$$score = 11.05 \times Dimension1 + 2.20 \times Dimension2 + 0.66 \times Dimension3 + Constante$$

Ce modèle est utilisé afin de prédire dans quel groupe se situe chaque particule mesurée sur les échantillons du fleuve Thio. Pour cela la prédiction de l'AFD est utilisée sur l'ACP de toutes les particules (et non sur les médianes) des échantillons de mélange (environ 100 000 particules par réplicat). On peut ensuite regarder, pour chaque échantillon ou groupe d'échantillon, combien de particules (ou quelle proportion) sont attribuées à chaque groupe du modèle.

Tableau 24 : Proportions de particules prédites dans chaque groupe d'affluents par l'AFD pour chaque groupe amont/aval des échantillons du fleuve Thio

	minieramont	minieraval	rivegauche	Fanama
Thioamont	32	39	13	16
ThioavalA	23	42	17	18
ThioavalB	18	41	21	20

La Figure 77 illustre ces résultats de mélange. On y observe, de l'amont vers l'aval, une diminution progressive de la proportion en particules attribuées au groupe minier amont (de 32% à 18%) et une augmentation progressive du pourcentage pour les groupes rive gauche (de 13% à 21%) et Fanama (de 16% à 20%). Le groupe minier aval est celui ayant le plus gros pourcentage de particules attribuées, ce dernier varie peu (entre 39 et 42%).

Il n'est évidemment pas possible que les affluents des groupes rive gauche, Fanama et minier aval puissent contribuer à l'apport sédimentaire des échantillons du groupe Thio amont puisque la confluence entre ces affluents et le fleuve Thio se situe à l'aval des points de prélèvement des échantillons de Thio amont. Comme une partie des affluents à l'amont de ces points n'a pas été mesurés (Kuergoa, Creek des Japonais et Creek Jeanne et Marie), l'AFD a été réalisée avec les sources aval avec l'hypothèse que la signature des affluents amonts susmentionnés est proche de celle des affluents aval. Ceci afin d'avoir tout de même une idée des variations amont/aval des différents groupes.

Le fait que la proportion du groupe minier amont diminue de l'amont vers l'aval semble logique et confirmer que l'utilisation de l'AFD est cohérente pour observer les proportions de chaque source.

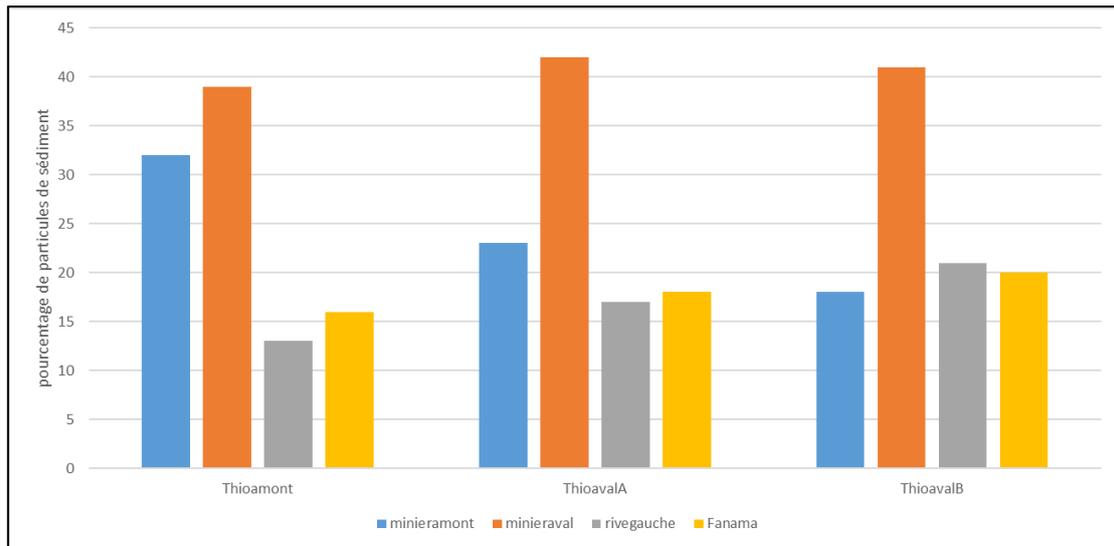


Figure 77 : Histogramme des proportions de particules prédites dans chaque groupe d'affluents par l'AFD pour chaque groupe amont/aval des échantillons du fleuve Thio

Toutefois, la simplification des différents échantillons de la rivière Thio en 3 groupes amont/aval peut masquer une partie du signal, c'est pourquoi une AFD sur chaque point de prélèvement sur cette rivière a été réalisée afin de voir si des variations plus fines sont visibles (Figure 78).

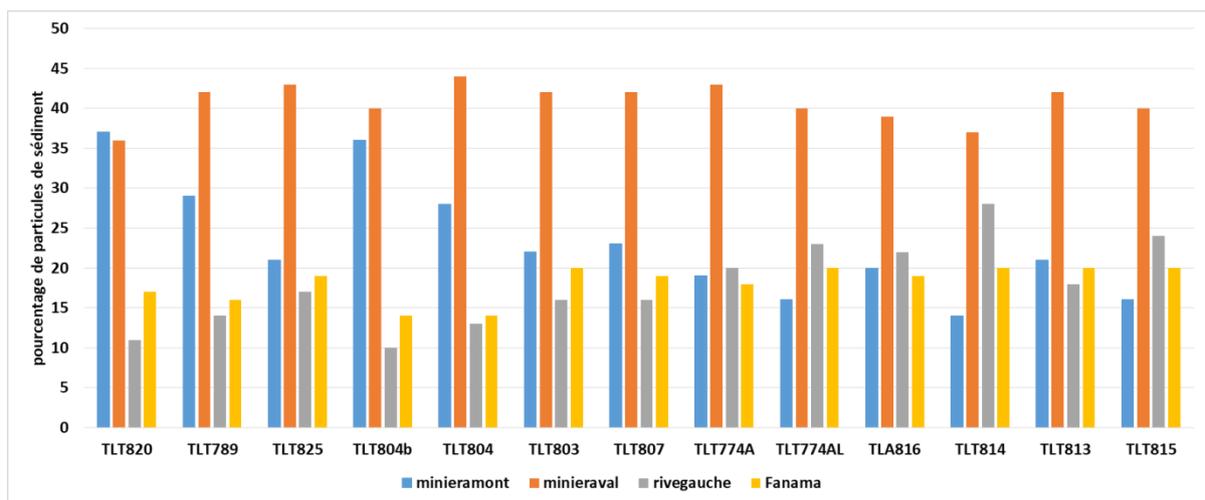


Figure 78 : Histogramme des proportions de particules prédites dans chaque groupe d'affluents par l'AFD pour chaque échantillon de la rivière Thio (les échantillons sont classés du plus amont (TLT820) vers le plus aval (TLT815))

On observe des résultats intéressants sur la proportion de particules attribuées au groupe minier amont puisque l'échantillon le plus amont TLT820 se situe tout près de la confluence avec l'affluent Koua (appartenant au groupe minier amont). 37% de particules sont attribuées à ce groupe, puis cette proportion diminue en allant vers l'aval (21%) puis remonte brutalement sur l'échantillon TLT804 avec 36% de particules alors que cet échantillon se trouve peu après la confluence avec Nakalé (autre affluent du groupe minier amont). La proportion diminue alors jusqu'à atteindre des valeurs entre 15 à 20% du nombre de particules total sur les échantillons les plus aval.

En ce qui concerne les autres groupes, on observe qu'à partir des points situés à l'aval de la confluence entre Fanama et Thio (TLT803), la proportion du groupe Fanama atteint les 20% et reste relativement stable vers l'aval. Pour le groupe rive gauche, on observe une légère augmentation à la confluence entre Kouaré et Thio (entre TLT789 et TLT825) qui redescend toutefois peu après pour

remonter suite à la jonction avec la Mué (TLT774A) et le Creek Cimetière (TLT814), c'est juste après la confluence entre ce dernier et Thio que l'on observe la plus forte proportion de cette source (28%).

Enfin, le groupe minier aval est relativement constant avec au moins 35% des sédiments attribués à ce groupe. Ici, les variations sont faibles et ne correspondent pas à la logique à laquelle on s'attendrait avec la succession des différentes confluences. Ce groupe est donc plutôt attribuable au « bruit de fond » et ne montre pas de signature particulière.

## D. SYNTHÈSE

Les différences entre les échantillons mesurés au granulomètre laser ne semblent pas permettre de discriminer les échantillons mais semblent davantage liés à des variations de conditions hydrodynamiques locales au lieu de prélèvement.

Le morphogranulomètre semble mieux discriminer les échantillons grâce à l'analyse de leur médiane sur 12 paramètres de taille et de forme clefs. Ces variations entre médianes semblent différencier certains affluents entre eux. Elles sont contrôlées par plusieurs forçages, l'activité minière et le transport amont/aval dans la rivière principale, semblent partiellement contrôler les variations observées. Cela ne suffit néanmoins pas pour expliquer certaines associations entre affluents.

Toutefois, une fois ces groupes d'affluents identifiés, ces derniers ont pu être utilisés comme sources contribuant au mélange de particules dans le fleuve principal. En utilisant une AFD comme modèle de mélange, il est possible d'évaluer les proportions des différentes sources potentielles à chaque point d'échantillonnage. Malgré le manque d'exhaustivité dans les sources mesurées, les résultats semblent cohérents avec des augmentations de proportions des différentes sources à la confluence des affluents correspondants.

Il semblerait donc que la proportion de sédiments de certains affluents aux matériaux transitant dans le cours d'eau principal est bien quantifiable grâce aux résultats morphogranulométriques.

Toutefois cette étude morphométrique des transferts sédimentaires a été réalisée à un temps T. Elle ne peut pas être interprétée comme la situation générale des transferts de sédiments sans analyser les évolutions temporelles. Sur ce site, la complexité de l'organisation des campagnes de terrain n'a pas permis de réaliser un suivi sur plusieurs campagnes pour la morphogranulométrie. C'est pourquoi ces aspects seront développés dans le chapitre suivant sur le site de Norville (chapitre IV).

## IV. SUIVI SOURCE TO SINK SURFACE-SOUTERRAIN DU TRANSFERT PARTICULAIRE EN CONTEXTE KARSTIQUE : APPLICATION AU SITE DE NORVILLE

### A. CONTEXTE ET ENJEUX

L'utilisation de la morphogranulométrie comme proxy dans le suivi source to sink du transfert particulaire entre les eaux de surface et souterraine va être étudiée sur le bassin versant karstique de Norville. Ce site fait partie de l'observatoire du karst de la craie du réseau SNO karst (Service National d'Observation de l'INSU). Le système karstique de Norville se situe au Nord de la commune de Norville sur la rive droite de la Seine à 40km de son embouchure (Figure 79). Situé dans les formations secondaires crayeuses de l'Ouest du Bassin de Paris, il s'agit d'un système perte-résurgence caractérisé par la présence d'une faille (faille de Triquerville). Cette faille met en contact des argiles peu perméables (Albien) avec la craie à Silex (Sénonien) fracturée et karstifiée (Figure 80).

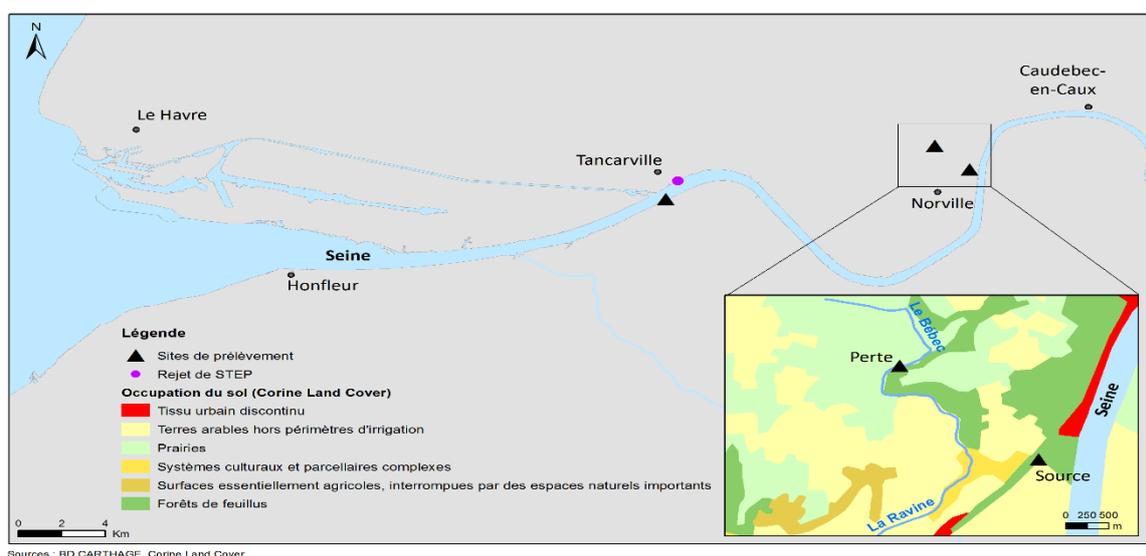


Figure 79 : Localisation géographique du site de Norville

Les formations géologiques du compartiment nord sont les suivantes : (Massei, 2001)

- Le Kimméridgien (Jurassique supérieur) affleure dans la région de Villequier sous la forme d'argiles gris-noir et de calcaires marneux.
- Le Crétacé inférieur transgressif sur le Kimméridgien débute par des sables argileux et se poursuit par des grès ferrugineux et des sables verts aquifères.
- L'Albien est représenté par des argiles noires de faciès Gault, très glauconieuses, constituant le mur imperméable de la nappe du Vraconien (Cénomaniens inférieur).
- Le Vraconien (Cénomaniens inférieur) est caractérisé par des silts gris micacés, siliceux et pyriteux.
- Le Cénomaniens est constitué par de la Craie à silex, ces derniers étant moins abondants dans la partie supérieure que dans la partie inférieure.
- Le Turonien correspond à de la Craie blanche tendre ou jaunâtre indurée souvent pauvre en silex.

La partie sud est moins complexe (Massei, 2001) : le compartiment sud est constitué par de la Craie blanche à silex du Coniacien. On distingue dans la partie inférieure 40 à 50 m de Craie blanche ou jaunâtre à zones limonitiques et argileuses localisées sur des fissures. Les bancs ont des tailles métriques et sont séparés par des bancs de silex noirs de taille centimétrique. La partie supérieure du compartiment sud est une Craie très blanche à grains de glauconie. Les bancs d'épaisseur métrique contiennent des silex libres ou en bancs plus épais que ceux de la partie inférieure.

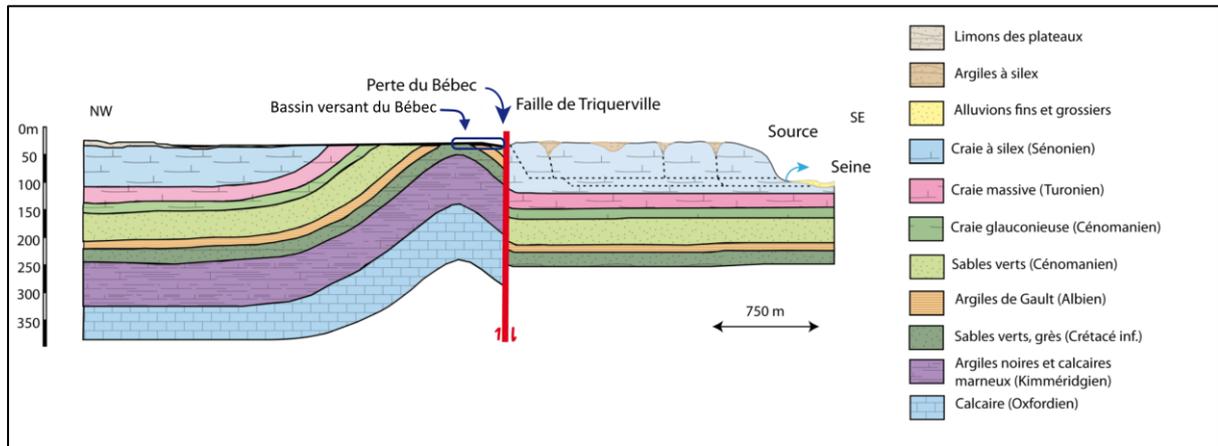


Figure 80: coupe géologique schématique du système karstique de Norville selon Pleuvret 1997 (Duran, 2015)

Le Nord de la faille est donc recouvert en partie par les argiles imperméables de l'Albien et est donc marquée par une dominance des écoulements de surface et peu d'infiltration, ce qui se traduit par la présence d'un ruisseau, le Bébéc. Le bassin versant du Bébéc (8,6km<sup>2</sup>) est donc principalement recouvert d'un substrat d'argiles et de formations superficielles, l'occupation des sols est en quasi-totalité dominée par des terres agricoles et forestières (Figure 79).

Le cours d'eau va s'infiltrer entièrement au niveau d'une bétoire (appellation locale d'une perte) lorsqu'il arrive sur les niveaux crayeux de la partie sud, mis en contact par la faille de Triquerville. Au Sud, de l'autre côté de la faille, toute la surface du plateau crayeux est marquée par une infiltration diffuse via les fissures de la craie sénonienne (Duran 2015). En pied de falaise, en bordure de la plaine alluviale de la Seine, la source du Hannetot restitue l'eau provenant de la bétoire et de l'infiltration diffuse (Figure 81). C'est une source de débordement qui ressort au contact entre la craie et les alluvions de la plaine alluviale de la Seine à la faveur d'un conduit karstique hérité du niveau de base flandrien (Fournier, 2006).

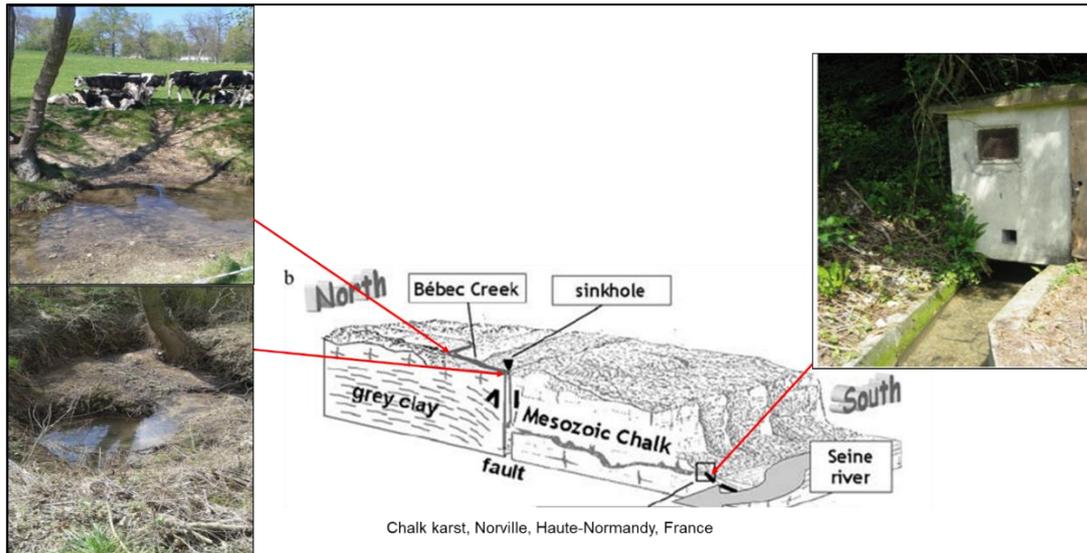


Figure 81 : représentation schématique du karst de Norville

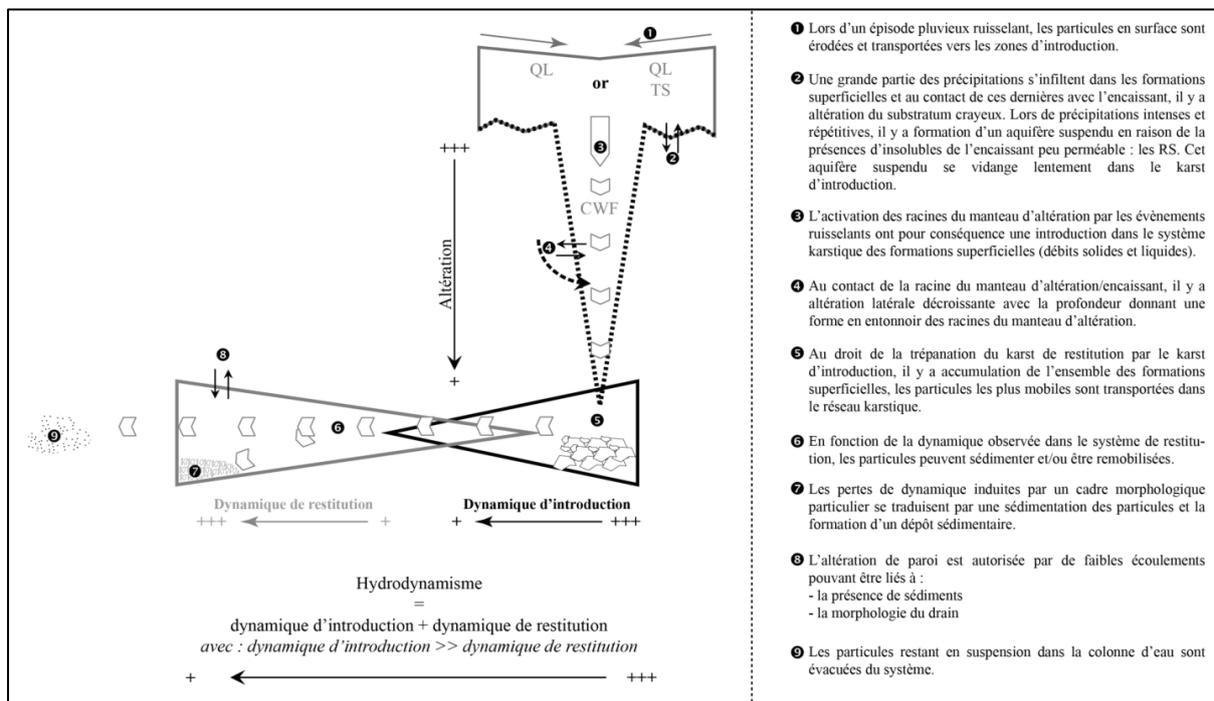
Le Bébec est alimenté par la nappe perchée du Cénomanien via un ensemble de sources diffuses à l'interface avec les argiles de l'Albien. C'est donc un ruisseau permanent mais il subit de grandes variations de débit. Il est alimenté par de nombreux vallons temporaires qui s'activent lors de pluies intenses. La géomorphologie du bassin versant (forte pente, densité de drainage élevée) induit un comportement hydrologique très réactif aux fortes précipitations (Massei, 2001). Son débit en étiage autour de 3l/s peut atteindre plus d'1m<sup>3</sup>/s lors de crues hivernales. A partir de 50l/s, la perte saturée (Massei, 2001), déborde et alimente une ravine qui va former un ruisseau s'écoulant vers le Sud pendant plus de 2km jusqu'à la Seine. Des aménagements sous la forme de trois bassins de rétention ont été mis en place dans les années 2000 avec l'objectif de contrôler ces débordements ; ce qui est partiellement le cas puisque ceux-ci sont moins nombreux et intenses.

La source du Hannetot a alimenté en eau potable les 4 communes à proximité (Triquerville, Norville, Saint-Maurice-d'Ételan et Petitville) de 1961 à 1992 (Fournier, 2006; Massei, 2001). Les pics réguliers de turbidité lors des crues dépassant les normes réglementaires ont poussé l'exploitant à réaliser un forage AEP (alimentation en eau potable) dans la plaine alluviale et crépiné dans la craie. Il se situe à 130m de la source et permet d'exploiter directement l'eau de la nappe, de meilleure qualité.

Ces pics de turbidité illustrent le fait que ces circulations d'eau souterraine sont les vecteurs d'un transfert particulaire conséquent. Fournier (Fournier, 2006) identifie les différents forçages contrôlant les variations dans ce transfert : (1) La pluviométrie influe sur la granulométrie des particules engouffrées à la perte ; (2) Le gradient hydraulique est défini par le niveau piézométrique et le marnage en Seine. Cette dernière draine l'aquifère du Hannetot suivant ses conditions de marnage et de flux. Lorsque le niveau de la Seine est bas, on observe un gradient plus fort entraînant plus de particules plus grosses. Le phénomène inverse se déroule lorsque le niveau de la Seine est haut ; (3) L'influence anthropique liée au pompage dans le forage AEP, qui fait également varier le gradient hydraulique.

Chedeville 2015 montre dans sa thèse que la plupart des sédiments s'introduisant à Norville et dans les réseaux karstiques voisins proviennent des formations superficielles environnantes (colluvions/limons/Lœss et Sables) et de la roche encaissante (craie). La Figure 82 illustre la dynamique sédimentaire à l'intérieur de ces systèmes : D'abord l'introduction dans le système des particules provenant de la surface lorsque l'eau s'infiltré dans les pertes et dolines (1-2). L'eau

provenant de la surface a également un pouvoir érosif provoquant le détachement de particules provenant de l'encaissant (3-4-8). Toutes ces particules peuvent se redéposer à l'intérieur du système, les plus mobiles sont transporté jusqu'en dehors du système (5-6-9).



- ❶ Lors d'un épisode pluvieux ruisselant, les particules en surface sont érodées et transportées vers les zones d'introduction.
- ❷ Une grande partie des précipitations s'infilte dans les formations superficielles et au contact de ces dernières avec l'encaissant, il y a altération du substratum crayeux. Lors de précipitations intenses et répétitives, il y a formation d'un aquifère suspendu en raison de la présence d'insolubles de l'encaissant peu perméable : les RS. Cet aquifère suspendu se vidange lentement dans le karst d'introduction.
- ❸ L'activation des racines du manteau d'altération par les événements ruisselants ont pour conséquence une introduction dans le système karstique des formations superficielles (débits solides et liquides).
- ❹ Au contact de la racine du manteau d'altération/encaissant, il y a altération latérale décroissante avec la profondeur donnant une forme en entonnoir des racines du manteau d'altération.
- ❺ Au droit de la trépanation du karst de restitution par le karst d'introduction, il y a accumulation de l'ensemble des formations superficielles, les particules les plus mobiles sont transportées dans le réseau karstique.
- ❻ En fonction de la dynamique observée dans le système de restitution, les particules peuvent sédimenter et/ou être remobilisées.
- ❼ Les pertes de dynamique induites par un cadre morphologique particulier se traduisent par une sédimentation des particules et la formation d'un dépôt sédimentaire.
- ❽ L'altération de paroi est autorisée par de faibles écoulements pouvant être liés à :  
- la présence de sédiments  
- la morphologie du drain
- ❾ Les particules restant en suspension dans la colonne d'eau sont évacuées du système.

Figure 82 : Modèle conceptuel de la dynamique sédimentaire du karst de l'Ouest crayeux du Bassin de Paris en fonction des critères d'introduction, de production, de transport et de sédimentation des éléments solides transportés par les fluides (Chedeville 2015, modifié de Rodet, Chedeville, and Laignel 2013)

Via l'analyse d'une carotte sédimentaire prélevée dans une zone de sédimentation au niveau de la résurgence de la source du Hannebot, Chedeville 2015 a réalisé une analyse hydrochimique des sources sédimentaires avec 3 sources : les sables de Lozère, la craie et ses insolubles, puis les loess. Il observe des variations de proportions de ces sources entre les différents faciès retrouvés sur cette carotte. Avec l'utilisation de la granulométrie et du diagramme de Passega (Passega, 1957), il a pu associer ces différents faciès avec des conditions hydrodynamiques de dépôts, correspondant à un milieu relativement agité.

Cette carotte ne correspond toutefois qu'à une seule partie des sédiments transitant à la source : ceux qui se sont déposés dans l'ancien bassin de captage de la source du Hannebot. Une partie des particules plus fines ne se dépose pas, elle reste en suspension et est transportée via le Hannebot jusqu'à la Seine, en particulier lors des événements de crue très turbides.

Plusieurs questions se posent en lien avec la morphogranulométrie des particules et le transfert sédimentaire dans ce réseau karstique : Peut-on identifier les différentes sources sédimentaires du bassin versant dans les particules en suspension à la perte du Bébéc et à la source du Hannebot avec la morphogranulométrie ? Y-a-t-il des différences entre les matières en suspension à la perte du Bébéc et celles à la source du Hannebot ? Y-a-t-il des variations temporelles dans les contributions des sources sédimentaires ? Retrouve-t-on les mêmes résultats dans une carotte sédimentaire prélevée à la résurgence du Hannebot ? Quels sont les forçages ?

Pour répondre à ces questions, plusieurs analyses sont réalisées. Tout d'abord, une étude spatiale des sources de sédiments du bassin versant pour réaliser un modèle de mélange de ces sources. Ce modèle est ensuite utilisé à des fins de prédiction sur des prélèvements mensuels réalisés depuis fin

2016 jusqu'en 2019 à la perte du Bébec et à la source du Hannetot. Les contributions de ces sources et les variations temporelles de ces transferts de sédiments peuvent être calculées. Les différences entre les particules à l'amont (perte) et à l'aval (source) du réseau karstique sont évaluées. Une carotte a également été prélevée à la source du Hannetot pour observer les dépôts antérieurs à 2016 et les mettre en perspective avec les observations sur les matières en suspension.

Enfin, une fréquence mensuelle de prélèvement étant trop ponctuelle pour observer la totalité des variations du transfert particulaire causées par les événements extrêmes (crues), deux suivis de crue avec des prélèvements horaires ont été réalisés. Le premier où une « crue » a été provoquée artificiellement par l'injection de grande quantité d'eau avec les moyens techniques des pompiers dans le cadre du projet OAK de l'ANSES, et le second correspondant à une crue réelle hivernale de période de retour annuelle ayant provoqué le débordement de la perte. Les résultats de ces analyses sont présentés dans les chapitres suivants.

## B. ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE DES SOURCES SEDIMENTAIRES DU BASSIN VERSANT

### 1) Discrimination des sources sédimentaires du bassin versant

Dans le but de faire un inventaire des différentes origines sédimentaires que l'on pourrait retrouver en suspension dans le système, entre la perte du Bébec et la source du Hannetot, plusieurs échantillons de sédiments et de sols ont été prélevés sur le bassin versant.

Cette partie a pour objectif de définir les différentes sources dans le but de pouvoir, dans les parties suivantes, quantifier leur contribution dans chaque échantillon prélevé en utilisant leur signature morphogranulométrique. Les échantillons de source ont été prélevés à différentes localisations suivant les formations superficielles et géologiques du bassin versant (Figure 83). Les points 9-10 et 13-14 se situent en dehors du bassin versant délimité sur la figure. Ils sont situés dans la ravine de débordement du Bébec. Lors des crues les plus intenses, le Bébec déborde dans la ravine et des pertes existant dans la ravine permettent d'envisager des introductions particulières amenées jusqu'à la source du Hannetot.

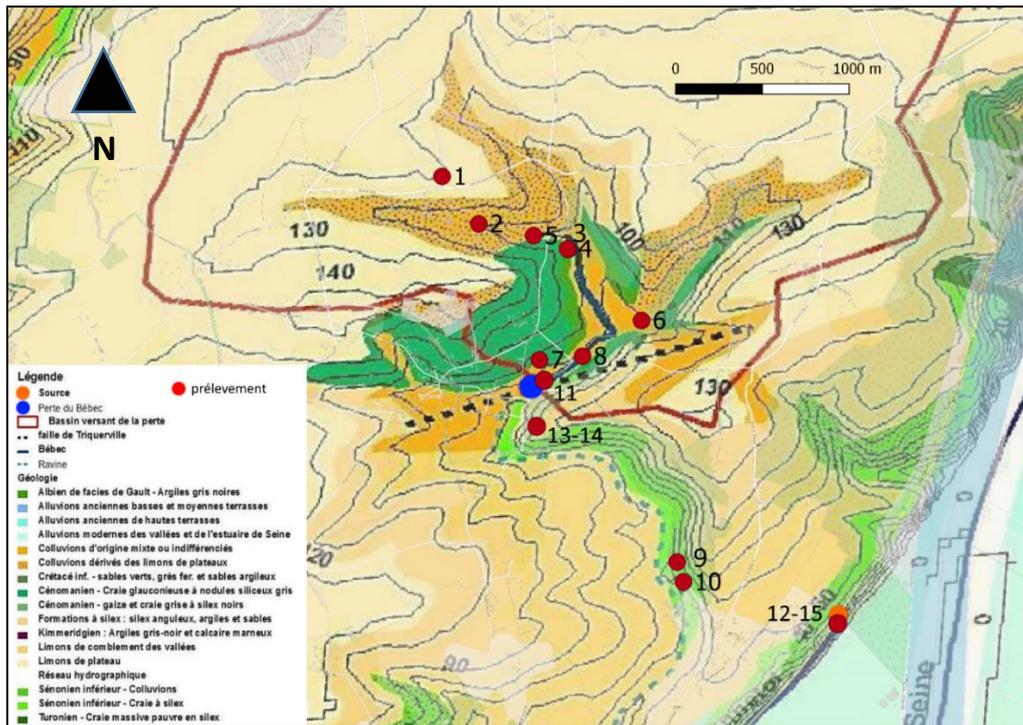


Figure 83: localisation des échantillons de sources sédimentaires prélevés sur fond de carte géologique adaptée à partir de Duran, 2015

Le Tableau 25 liste les échantillons et leur nature identifiés comme sources potentielles des sédiments transportés dans le système. Il y a 3 sources primaires (craie, colluvions, sols), à partir desquelles des sources secondaires dégradées sont formés (craie altérée, sol crayeux et silteux, argile à silex). Ensuite, les sources résultantes se répartissent en remplissage karstique et vases. En suivant la même méthodologie que précédemment, une ACP sur les médianes des paramètres morphogranulométriques sera réalisée, puis un modèle par AFD sera établi si les différents groupes sont bien discriminés.

Tableau 25 : liste des échantillons de sources sédimentaires prélevés sur le bassin versant

nom	nature	date	localisation
NBV_01 Limon	limon	27/02/2019	bassin versant Bèbec
NBV_02 Colluvions limon	colluvionsde limon	27/02/2019	bassin versant Bèbec
NBV_03 Colluvions mixte	colluvions mixtes	27/02/2019	bassin versant Bèbec
NBV_04 Vase Bebec source	vase	27/02/2019	lit du Bèbec
NBV_05 colluvions limon	colluvionsde limon	27/02/2019	bassin versant Bèbec
NBV_06 colluvions mixte	colluvions mixtes	27/02/2019	bassin versant Bèbec
NBV_07 Craie glauconieuse	sol crayeux	27/02/2019	bassin versant Bèbec
NBV_08 Vase Bebec delta	vase	27/02/2019	lit du Bèbec
NBV_09 Argile Silex contact craie	Argile à silex	27/02/2019	encaissant
NBV_10 Sol Craie silex	sol silteux	27/02/2019	bassin versant Bèbec
NBV_11 Vase Perte du Bèbec	vase	08/03/2017	Perte du Bèbec
NBV_12 vase source Hannetot	vase	08/03/2017	source Hannetot
NBV_13 Craie carriere	craie	08/03/2017	encaissant
NBV_14 Remplissage carriere	remplissage karstique	08/03/2017	encaissant
NBV_15 craie source Hannetot	craie altérée	08/03/2017	falaise source Hannetot

La Figure 84 illustre les distributions granulométriques de ces différentes sources. Toutes les distributions montrent un mode principal entre 50 et 100  $\mu\text{m}$  de diamètre à l'exception de la craie qui se décompose en 2 modes : un autour de 7-8  $\mu\text{m}$  et l'autre à 100  $\mu\text{m}$ , lié à différents degrés d'agrégation des coccolithes de la craie. Certains échantillons comme les argiles à silex, les limons, les colluvions de limons, colluvions mixtes et le sol silteux ont une asymétrie prononcée du côté des fines. Les vases montrent au contraire des distributions bien symétriques avec un mode à 80-100  $\mu\text{m}$ , tout comme les remplissages karstiques et le sol crayeux. Ce dernier se décompose toutefois en un deuxième mode grossier ( $\sim 500 \mu\text{m}$ ) potentiellement lié aux agrégations de la partie organique du sol.

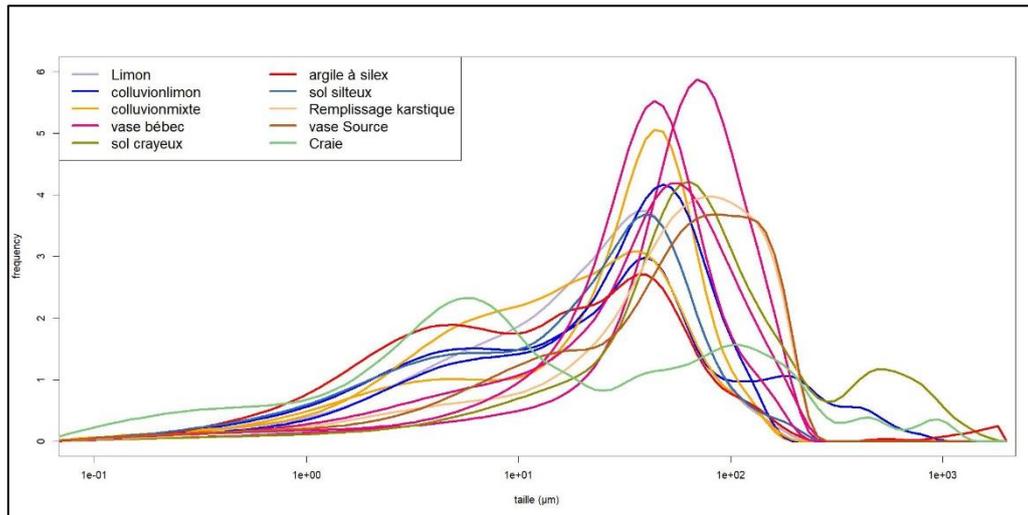


Figure 84 : Distributions granulométriques lasers des différents échantillons du bassin versant de la source du Hannetôt

Afin d'observer si ces différentes sources ont des signatures morphométriques différentes les unes des autres, une ACP a été réalisée sur les médianes des distributions des 12 paramètres morphogranulométriques sélectionnés.

La Figure 85 montre que l'ACP discrimine assez bien chaque source sur une combinaison de plusieurs paramètres. Les trois premiers axes représentent 98% de la variabilité. Les paramètres de forme sont corrélés avec l'axe 1 (73% de la variabilité totale) et permettent en particulier de distinguer plusieurs groupes : (1) les remplissages karstiques (KarstFilling) et le sol crayeux (Chalksoil) avec des formes très régulières (forte valeurs de Circularity, Convexity, Straightness, etc) ; (2) la vase du Bébec (mudbebec) et les colluvions et limons (colluvionsmixte, colluvionslimons et limon) ainsi que l'argile à silex (ArgileSilex) et la craie altérée (alteredchalk), produit d'altération de la craie à silex ont des valeurs moyennes sur l'axe 1 (la forme des particules a une régularité intermédiaire) ; et enfin (3) la craie (chalk), la vase du Hannetot (mudsource) et les sols silteux (Silts) montrent les formes les plus irrégulières (forte valeurs d'Elongation et Roughness).

La vase du Bébec montre une très grande variabilité, probablement liée à sa grande variabilité spatiale (elle a été prélevée en 4 points différents : 4, 8 et 11).

L'axe 2 (19% de la variabilité) est principalement corrélé avec les paramètres de taille (Area Diameter, Width, Length, Crofton Diameter) et permet de distinguer la craie altérée (alteredchalk) montrant des tailles plus petites que le reste du groupe 2 (avec des particules de taille commune) et la craie (chalk) montrant une taille plus faible que le reste du groupe 3.

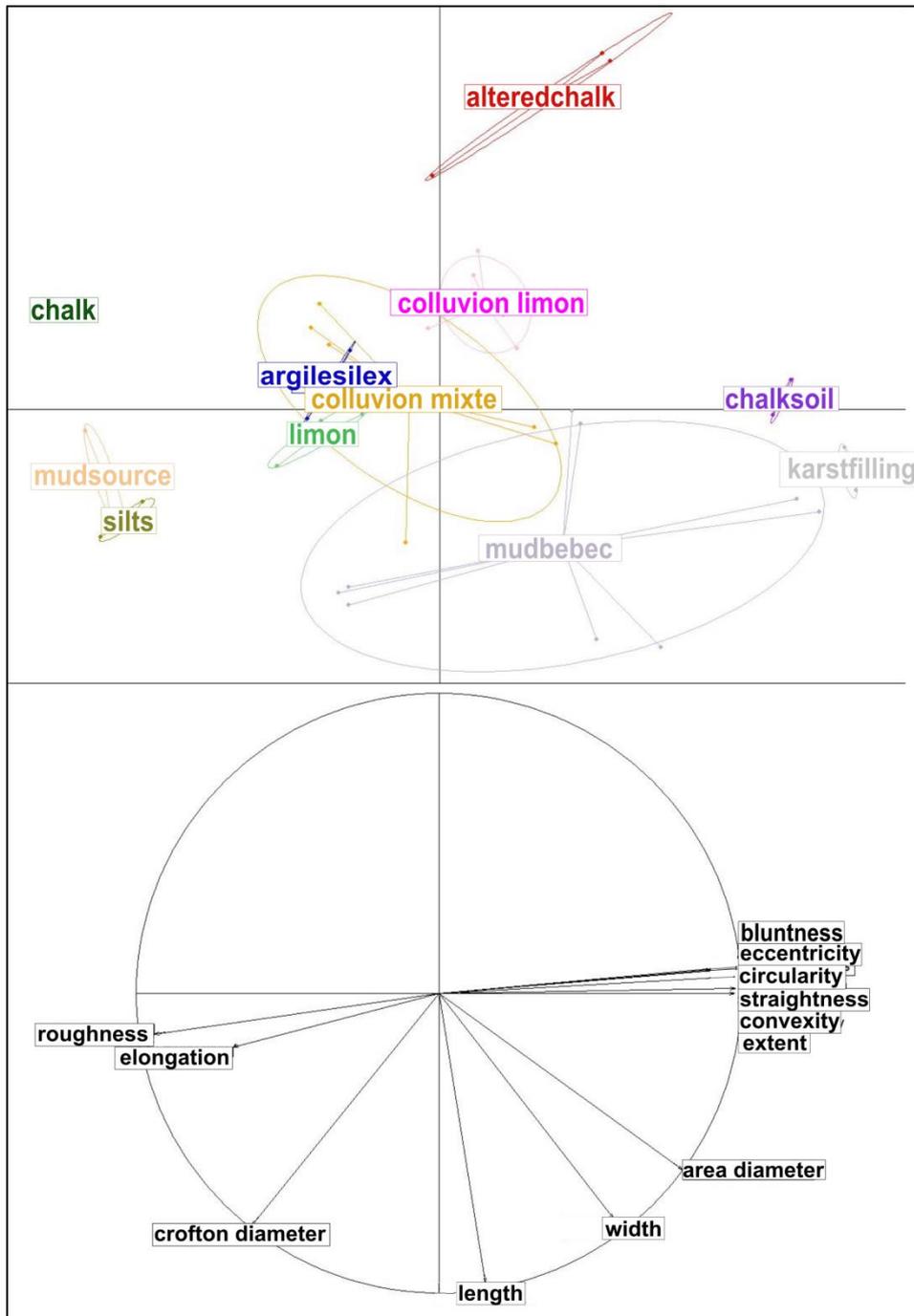


Figure 85 : Représentation graphique de l'ACP sur les échantillons prélevés sur le bassin versant, dim 1 et 2 (respectivement 73% et 19% de la variabilité)

L'axe 3 (6% de la variabilité, Figure 86) est corrélé avec l'Elongation. Il discrimine principalement la craie (chalk) (et dans une moindre mesure le sol crayeux (chalk soil)), qui montre des particules plus allongées que le reste des échantillons qui sont peu différenciés sur cet axe. A l'opposé sur cet axe, on trouve l'argile à silex et les sols silteux, qui eux montrent des particules moins allongées.

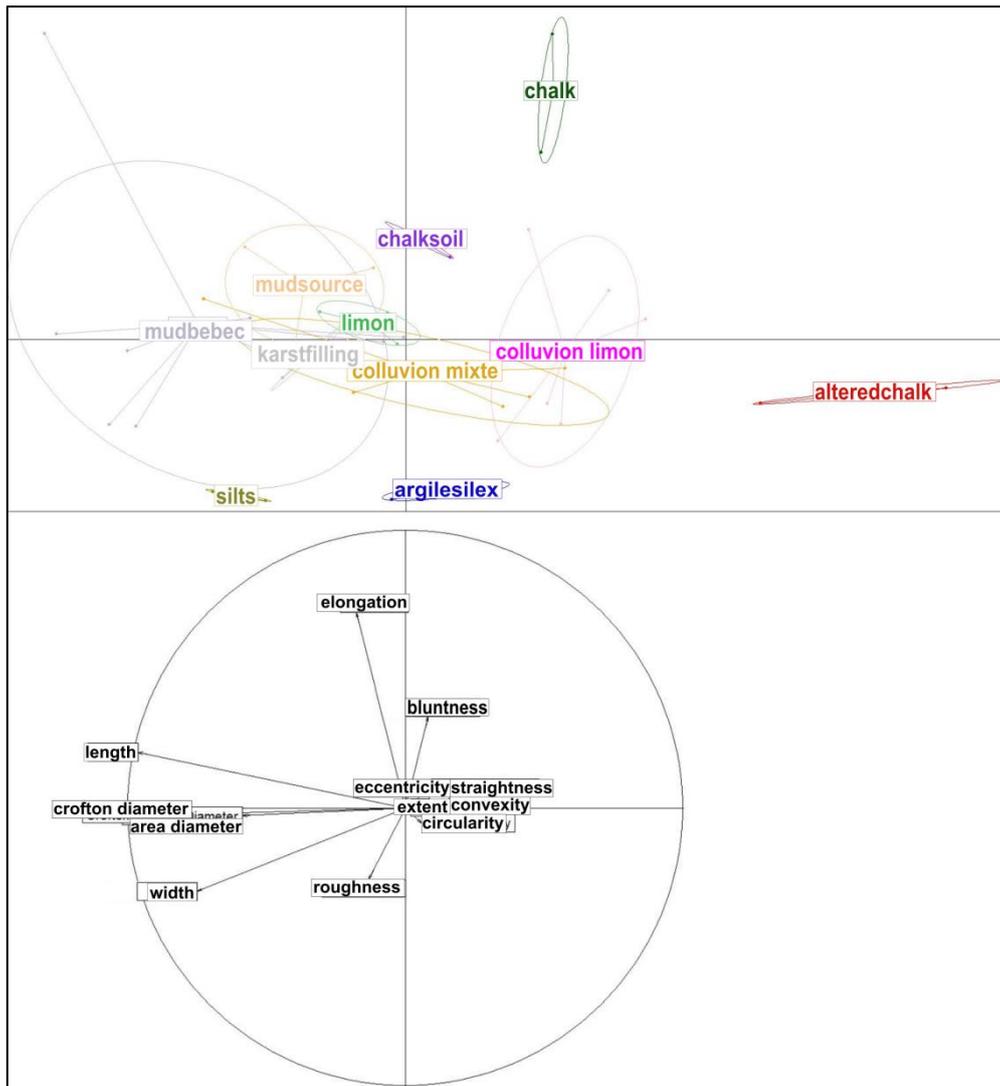


Figure 86 : Représentation graphique de l'ACP sur les échantillons prélevés sur le bassin versant, dim 2 et 3 (respectivement 19% et 6% de la variabilité)

Chaque groupe d'échantillons semble bien défini sur l'ACP à partir des paramètres morphogranulométriques. Il est donc cohérent de construire un modèle à partir de ces résultats. Lorsque l'on réalise un modèle par AFD sur ces résultats d'ACP on observe que tous les groupes sont bien définis sur les axes de l'AFD (Figure 87). Seuls les groupes « Colluvions mixte », « colluvions limon » et « Argile Silex » se chevauchent.

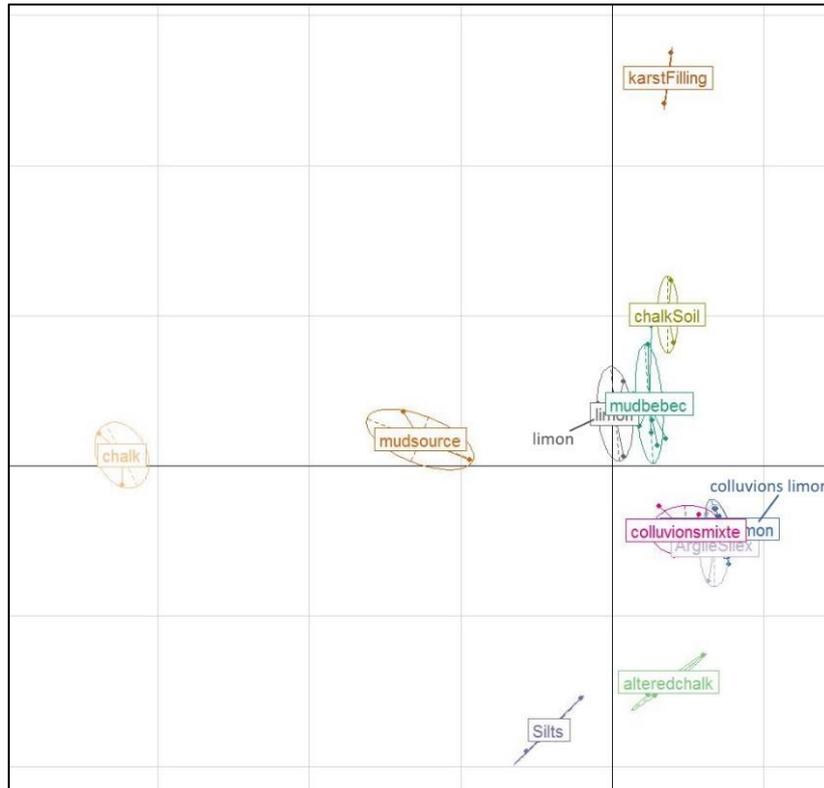


Figure 87 : Projections des échantillons du bassin versant du Bébec dans le plan défini par les axes de l'AFD sur tous les paramètres

L'équation du modèle linéaire est la suivante : (Dim1, 2 et 3 sont les dimensions de l'ACP sur laquelle est basée l'AFD)

$$\text{score} = 5.25 \times \text{Dim1} + 3.91 \times \text{Dim2} + 2.66 \times \text{Dim3}$$

On observe très peu de recombinaisons (2 pour 43 soit moins de 5%, Tableau 26), ce qui correspond bien avec les groupes bien détachés observés précédemment avec l'ACP.

Tableau 26 : Matrice de confusion montrant les recombinaisons entre les différents groupes de l'AFD sur les médianes des distributions

fac	alteredchalk	ArgileSilex	chalk	chalkSoil	colluvionslimon	colluvionsmixte	karstFilling	limon	mudbebec	mudsource	Silts
alteredchalk	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ArgileSilex	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
chalk	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
chalkSoil	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0
colluvionslimon	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0
colluvionsmixte	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0
karstFilling	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
limon	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0
mudbebec	0	0	0	0	0	0	2	0	7	0	0
mudsource	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0
Silts	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3

Ce modèle semble donc assez performant pour prédire la nature des sédiments dans l'hydrosystème du Bébec et du Hannetot. Il sera donc utilisé sur les prélèvements suivants pour associer les mesures morphogranulométriques à une ou plusieurs signatures sédimentaires.

## 2) Source fingerprinting des matières en suspension

### a) Contributions des sources à la perte du Bébec

Des prélèvements mensuels depuis octobre 2016 jusqu'à janvier 2019 ont été réalisés à la perte du Bébec et à la source du Hannetot. On va d'abord observer la répartition des échantillons de la perte (Figure 88) par rapport aux échantillons « sources sédimentaires » identifiés précédemment. Pour cela, plusieurs ACP ont été réalisées avec ces échantillons, d'abord pour observer les échantillons mensuels entre eux puis leur relation avec les sources.

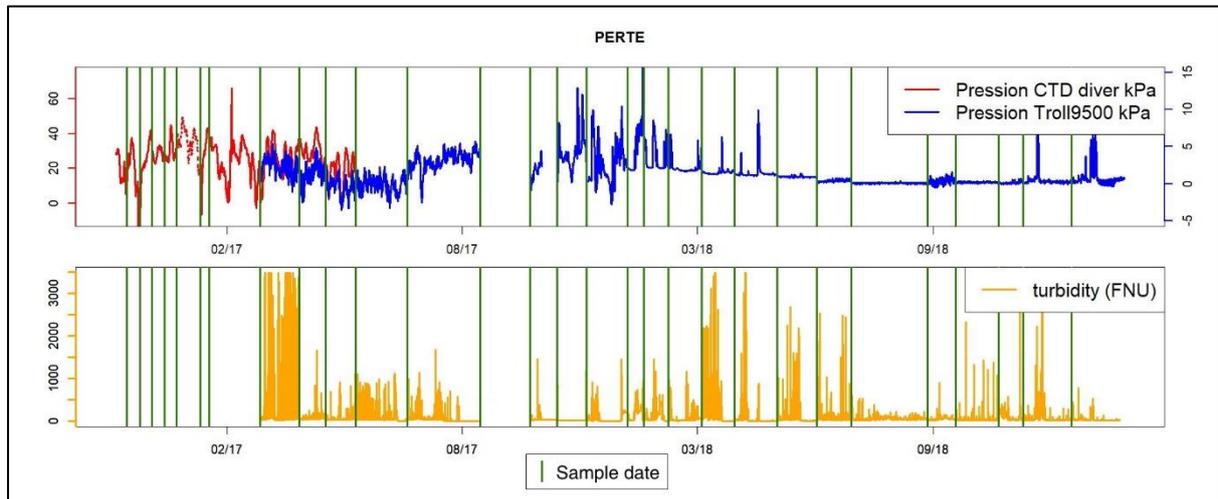


Figure 88 : Pression et turbidité à la perte du Bébec, les barres vertes correspondent à la date de prélèvement d'un échantillon

Pour savoir à quels sédiments s'associent les variations morphogranulométriques, ces échantillons sont comparés aux échantillons de sources sédimentaires analysés précédemment. Une ACP commune est donc réalisée avec les sources sédimentaires (Figure 89). 87% de la variabilité est représenté par les deux premiers axes. A nouveau, les paramètres sont séparés en 2 groupes : les paramètres de forme sur l'axe 1 et la taille sur l'axe 2. Les prélèvements mensuels se retrouvent toujours au centre de la projection, avec les différentes sources sédimentaires : au niveau des colluvions, limons et argile à silex. On note que plusieurs points extrêmes (à l'écart du reste de leur groupe) semblent coïncider avec une source. Ainsi certaines crues, avec des tailles plus élevées et des formes plus arrondies, semblent tendre vers une variation proche de celle de la vase du Bébec alors que certains échantillons d'étiage ont des formes plus irrégulières (négatifs sur l'axe 1), proches de l'argile à silex et limon, tandis que d'autres ont des formes plus régulières et des tailles plus petites (positifs sur les axes 1 et 2), un signal proche de celui de la craie altérée.

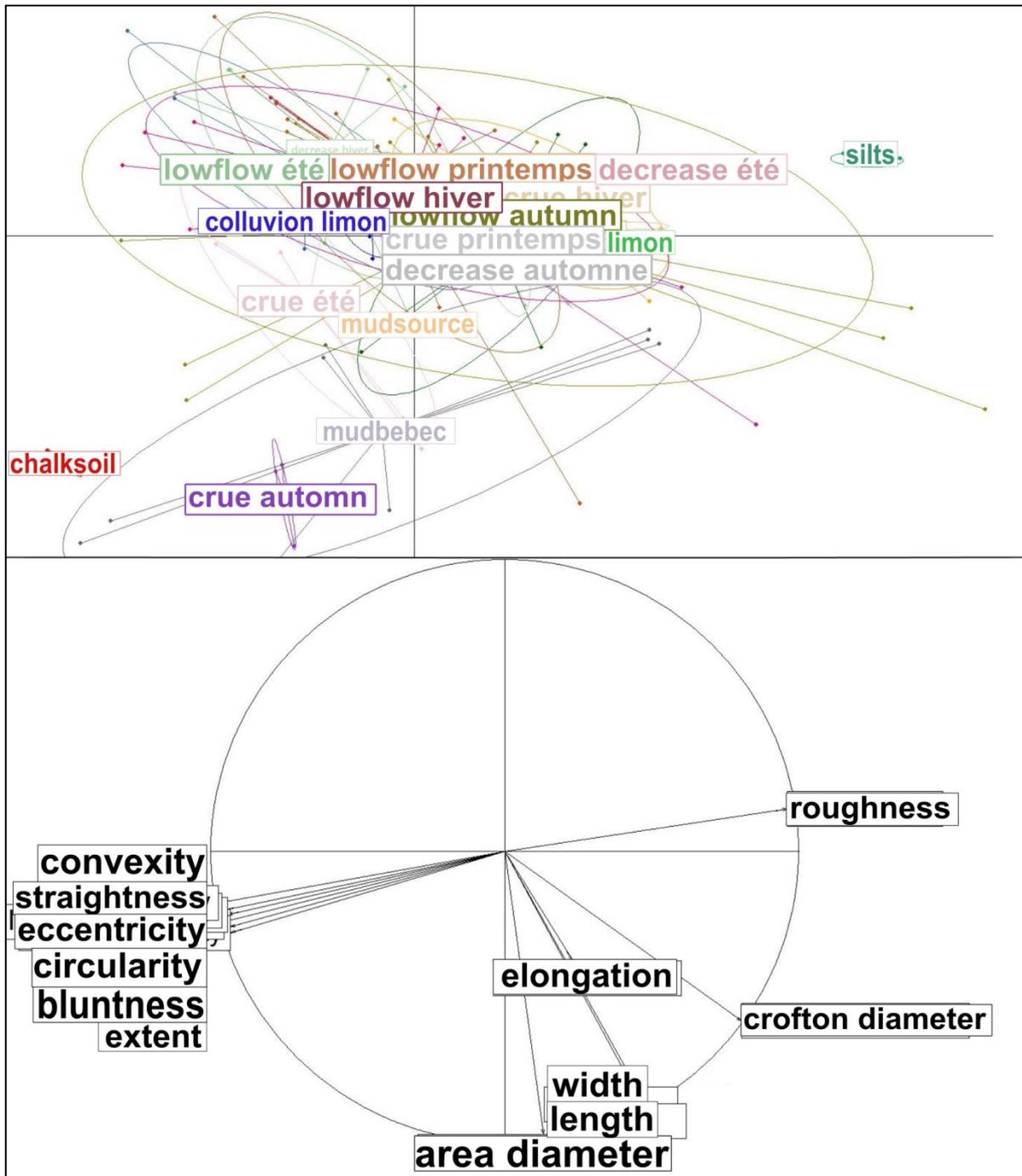


Figure 89 : Représentation graphique de l'ACP commune entre les échantillons mensuels prélevés à la perte du Bébec et les sources sédimentaires, dimensions 1 et 2 (respectivement 61% et 26% de la variabilité)

Chaque source semble donc représenter un pôle auquel il est possible d'associer les variations observées. Pour cela, comme lors de l'étude précédente sur le bassin versant de Thio, la proportion de chaque source sédimentaire dans les prélèvements à la perte est estimée à partir de l'AFD sur les sources sédimentaires (l'AFD est présentée au chapitre IV.B.1), sur la Figure 87 et le Tableau 26) réalisée précédemment.

Tableau 27 : pourcentage de contribution de chaque source sédimentaire calculé par l'AFD pour les échantillons de la perte du Bébec

fac	chalkSoil	colluvionslin	colluvionsm	limon	mudbebec	Silts	régime
NP16122213h10	8%	9%	21%	7%	33%	22%	crue
NP17090614h28	8%	7%	16%	12%	28%	29%	crue
NP18031310h05	15%	12%	19%	10%	23%	22%	crue
NP18071811h20	8%	11%	21%	8%	27%	26%	crue
NP18101513h00	8%	9%	21%	7%	29%	25%	crue
NP17011113h25	11%	10%	23%	7%	30%	19%	decrease
NP17040511h30	9%	11%	20%	8%	32%	20%	decrease
NP17111013H33	12%	10%	22%	8%	30%	18%	decrease
NP17120514H08	11%	12%	22%	9%	28%	18%	decrease
NP18012312H54	10%	11%	20%	7%	31%	21%	decrease
NP16111013h00	12%	12%	23%	8%	30%	16%	low flow
NP16112111h43	12%	16%	23%	9%	25%	15%	low flow
NP16120112h00	12%	12%	23%	8%	29%	16%	low flow
NP16121211h05	15%	20%	19%	9%	24%	13%	low flow
NP17011912h10	11%	11%	22%	8%	32%	16%	low flow
NP17030311h10	10%	12%	22%	9%	29%	18%	low flow
NP17042713h25	16%	15%	21%	8%	27%	14%	low flow
NP17042813h55	18%	12%	23%	6%	26%	15%	low flow
NP17052313h30	17%	12%	21%	7%	30%	13%	low flow
NP17070613h12	14%	15%	19%	8%	29%	15%	low flow
NP17101812H33	13%	11%	21%	9%	30%	16%	low flow
NP18010912h19	14%	12%	22%	8%	31%	13%	low flow
NP18021310h45	15%	14%	22%	7%	32%	11%	low flow
NP18041008h45	15%	17%	22%	5%	27%	13%	low flow
NP18051610h35	17%	22%	19%	7%	26%	10%	low flow
NP18061912h15	12%	19%	21%	6%	28%	15%	low flow
NP18092111h20	18%	29%	17%	8%	18%	10%	low flow
NP18112011h00	20%	25%	19%	7%	18%	11%	low flow
NP18121110h20	16%	20%	21%	6%	24%	14%	low flow
NP19012110h45	17%	23%	21%	6%	20%	13%	low flow

La contribution de chaque source a donc été calculée pour chaque échantillon (Tableau 27). Une ACP a été réalisée afin d'observer comment les échantillons varient en fonction de ces sources. Les deux premiers axes correspondent à 83% de la variabilité.

La Figure 90 montre que pour les paramètres, l'axe 1 est corrélé avec les proportions de colluvions mixte et de limons. On voit que l'axe 2 est principalement corrélé avec les groupes de la vase du Bébec (mudbebec), des colluvions de limons et des sols crayeux (chalkSoil). Les crues d'automne et d'été se détachent des autres groupes sur cet axe : elles semblent corrélées avec les colluvions de limons et les sols crayeux et anticorrélées avec la vase du Bébec.

La Figure 91 résume ces observations sur la contribution de la vase du Bébec où on observe clairement la crue d'automne, avec très peu de contribution de cette source sédimentaire (moins de 20%). La crue d'été correspond à environ 25% de contribution et l'étiage d'hiver montre une grande variance (entre 20 et 35% de contribution). Les autres groupes montrent plus de 27% de contribution.

Il semblerait donc que ces deux crues estivale et automnale s'éloignent de la signature de la vase qui correspond à la signature habituelle du Bébec pour avoir une signature plus proche des sols crayeux et limoneux. Cela s'explique par une érosion particulièrement marquée durant ces crues sur des sols secs (caractéristiques après une sécheresse en été et début d'automne) entraînant ces particules dans le cours d'eau du Bébec.

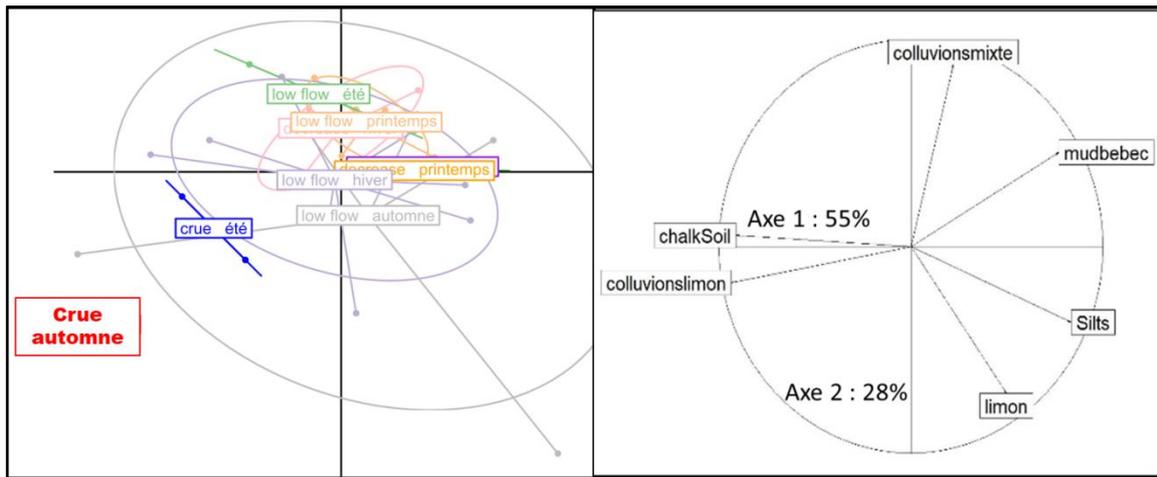


Figure 90 : Représentation graphique de l'ACP des résultats de la prédiction de l'AFD sur les échantillons mensuels prélevés à la perte du Bébec avec les sources sédimentaires en variables, dim 1 et 2 (respectivement 55% et 28% de la variabilité)

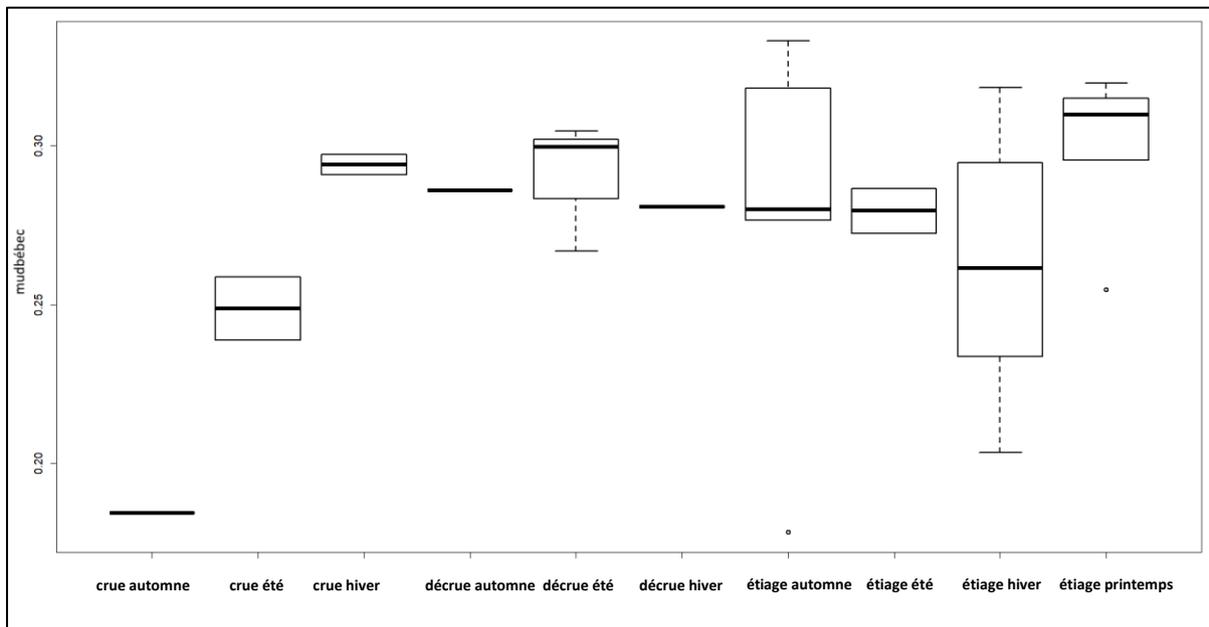


Figure 91 : boxplot du pourcentage de vase du Bébec pour chaque groupe de la perte

On observe donc des variations de formes sur les sédiments prélevés à la perte du Bébec en fonction des phénomènes saisonniers associés aux différents régimes hydrologiques, ces variations impliquent des apports différents entre les sources sédimentaires du bassin versant. L'eau transportant ces sédiments s'engouffre ensuite dans le réseau karstique et ressort à la source du Hannotot. Des prélèvements similaires ont donc été effectués à la source pour étudier les différences entre les sédiments en suspension de la perte et la source.

*b) Contributions des sources à la source du Hannetot*

Comme à la perte du Bébec, des prélèvements mensuels ont été réalisés depuis l'automne 2016 à la source du Hannetot (Figure 92).

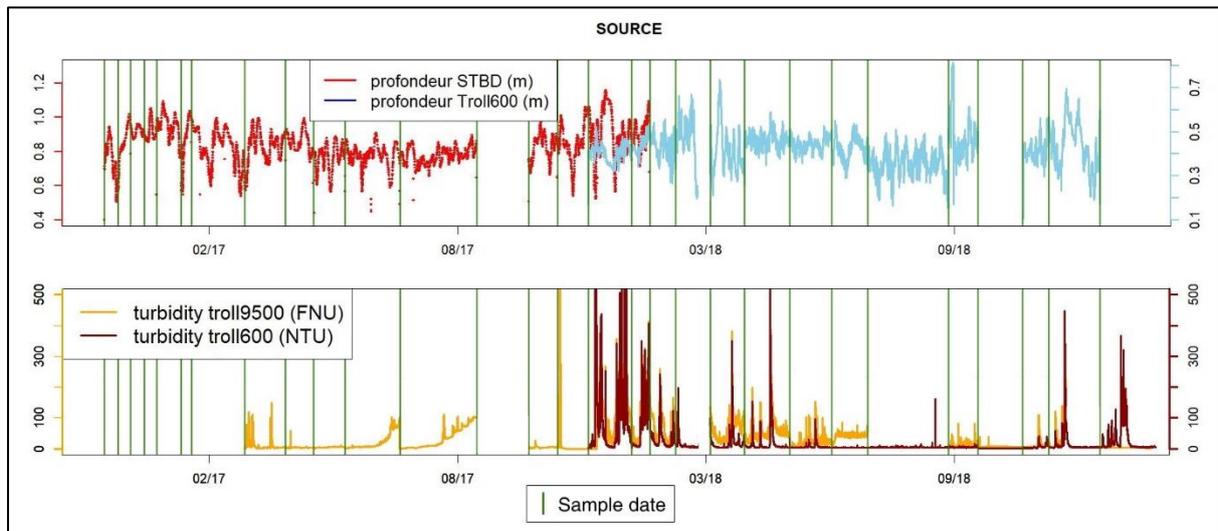


Figure 92 : Pression et turbidité à la source du Hannetôt, les barres vertes correspondent à la date de prélèvement d'un échantillon

Les axes 1 et 2 de l'ACP réalisée pour observer leurs variations morphogranulométriques représentent 79% de la variabilité (Figure 93). L'axe 1 (62% de la variabilité) est bien corrélé avec les 12 paramètres de taille et de forme à l'exception de l'Elongation, fortement corrélée avec l'axe 2. En ce qui concerne les individus, ils semblent être peu discriminés en fonction de leur régime (Figure 93A) ou des saisons (Figure 93C), la variabilité intragroupe est très élevée surtout pour les étiages. On observe toutefois des différences entre les moyennes des groupes (centre des ellipses), sur la Figure 93C les échantillons de crue d'été et d'hiver semblent avoir une élongation plus faible (et donc des particules moins allongées) que les autres échantillons. Les récessions d'été et d'automne paraissent plus petites et plus régulières et les échantillons d'étiage d'automne et d'été semblent plus allongés.

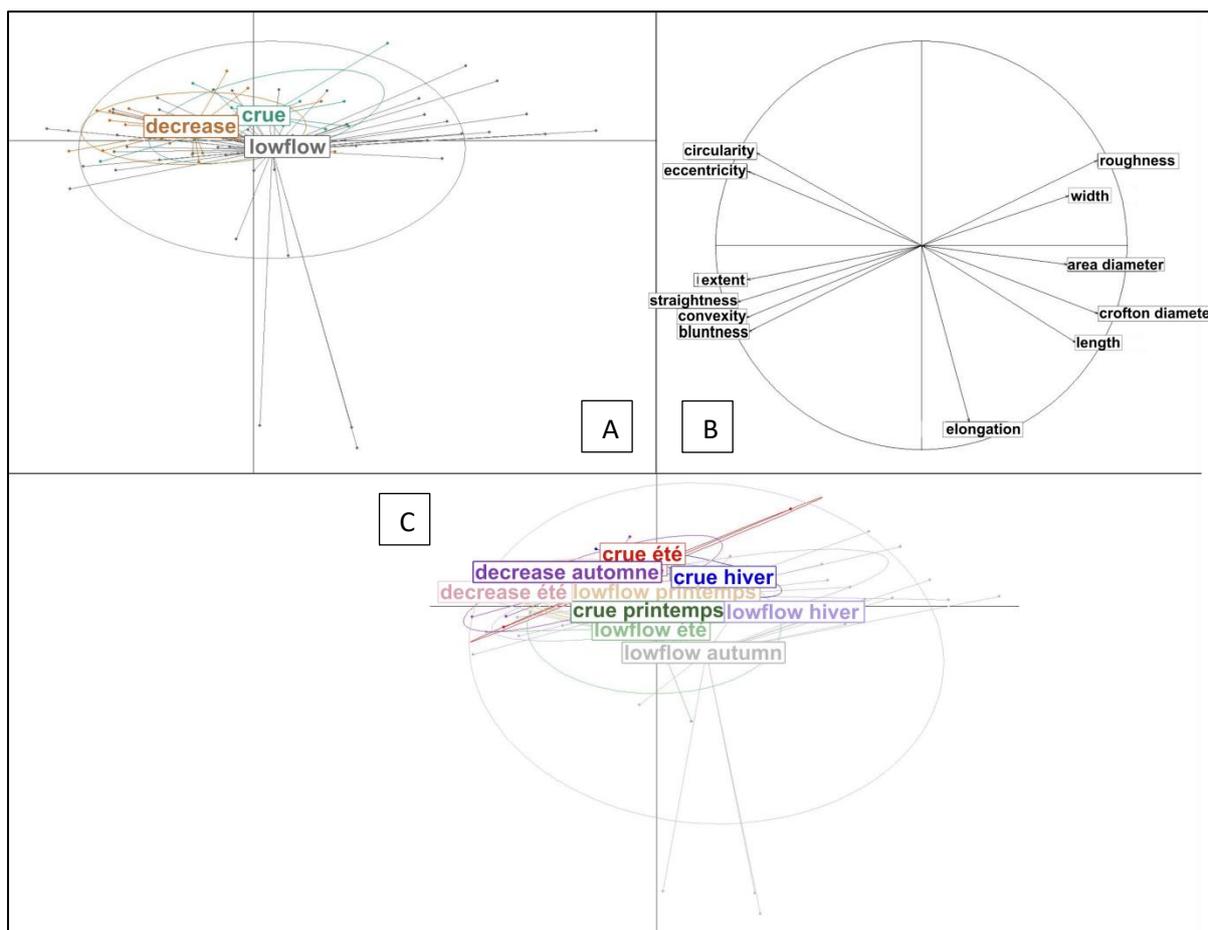


Figure 93 : Représentation graphique de l'ACP sur les échantillons mensuels prélevés à la source du Hannot, dim 1 et 2 (respectivement 62% et 17% de la variabilité) ; A : projection des individus avec un groupement par régime hydrologique ; B : projection des paramètres morphogranulométriques ; C : projection des individus avec un groupement combinant régime hydrologique et saison

Comme pour la perte, il est possible de mettre ces observations en perspective avec les sédiments du bassin versant sur une ACP. La Figure 94 montre que les prélèvements mensuels de la source du Hannot se retrouvent également au centre des différentes sources sédimentaires, au niveau des colluvions, limons et craie altérée. Plusieurs points extrêmes (à l'écart du reste de leur groupe) semblent coïncider avec d'autres sources. La contribution de chaque source a donc également été calculée (l'AFD est présentée au chapitre IV.B.1), sur la Figure 87 et le Tableau 26) pour chaque échantillon (Tableau 28) et une ACP a été réalisée pour observer comment les échantillons varient en fonction de ces sources (Figure 95 et Figure 96).

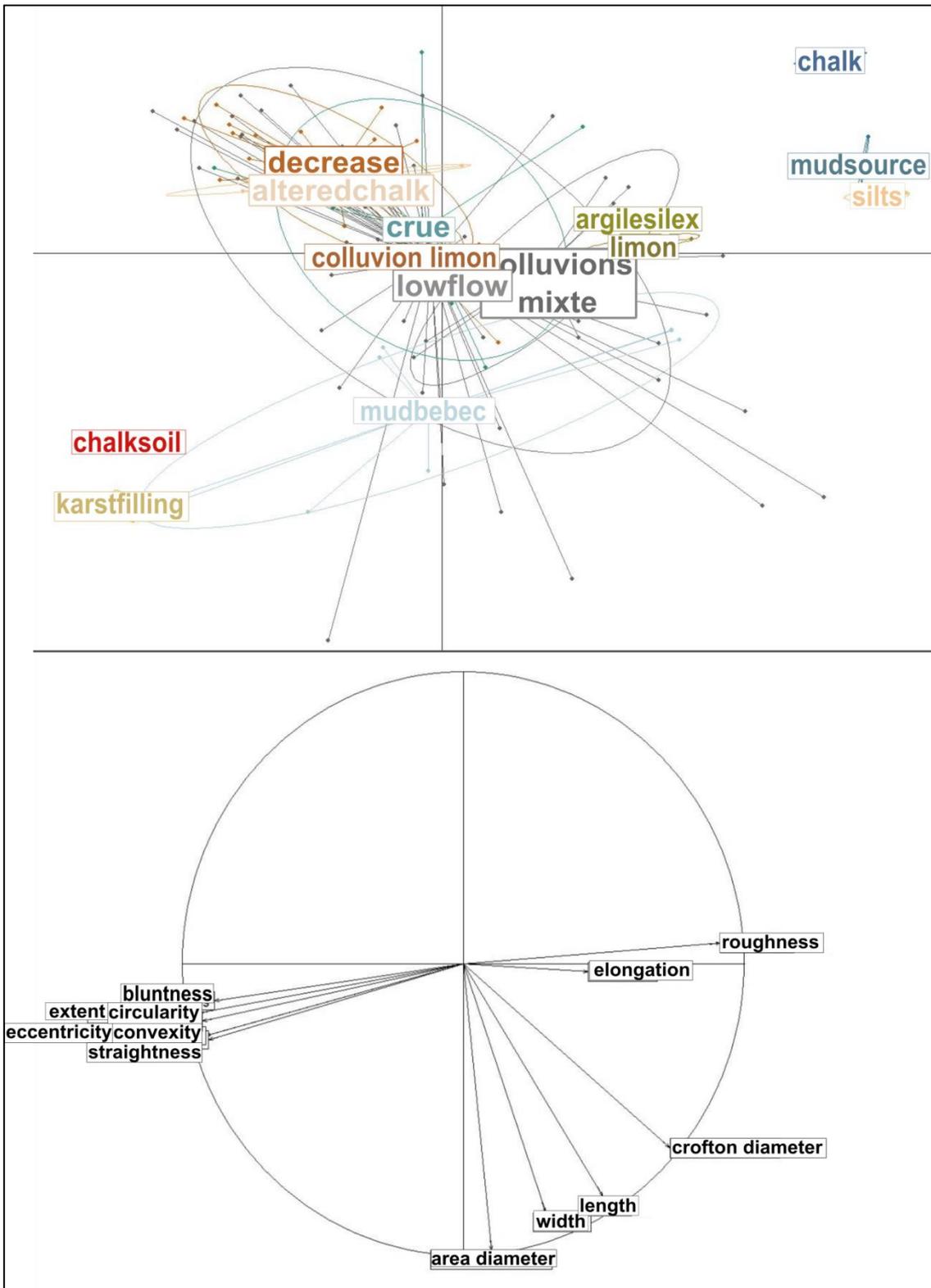


Figure 94 : Représentation graphique de l'ACP commune entre les échantillons mensuels prélevés à la source du Hannebot et les sources sédimentaires, dim 1 et 2 (respectivement 58% et 25% de la variabilité)

Tableau 28 : pourcentage de contribution de chaque source sédimentaire calculé par l'AFD pour les échantillons de la source du Hannetot

fac	alteredchalk	ArgileSilex	chalk	chalkSoil	colluvionslimon	colluvionsmixte	karstFilling	limon	mudbebec	mudsource	Silts	régime
NS17011110h05	1.49%	10.82%	7.09%	6.34%	14.37%	12.31%	8.58%	11.01%	12.69%	3.73%	11.57%	crue
NS17030309h45	2.45%	12.14%	6.46%	6.95%	13.71%	11.85%	3.72%	12.93%	14.30%	4.02%	11.46%	crue
NS17090613h29	1.41%	12.68%	5.63%	9.86%	16.90%	7.04%	9.86%	12.68%	7.04%	1.41%	15.49%	crue
NS18041007h36	0.77%	9.33%	8.41%	8.62%	13.72%	10.12%	5.02%	12.93%	13.05%	5.14%	12.90%	crue
NS16111011h00	1.81%	13.66%	6.69%	5.68%	18.29%	11.77%	4.36%	13.54%	11.01%	3.44%	9.75%	decrease
NS18012310h30	1.99%	11.58%	8.81%	7.53%	16.75%	9.90%	3.67%	14.23%	9.90%	4.36%	11.27%	decrease
NS18021312h29	1.02%	11.16%	7.84%	9.20%	13.08%	9.74%	6.37%	12.69%	10.85%	5.38%	12.66%	decrease
NS18031308h45	1.10%	10.15%	9.88%	7.40%	12.12%	9.65%	4.31%	13.46%	12.66%	6.40%	12.89%	decrease
NS18071810h30	1.82%	10.65%	6.36%	9.61%	19.09%	10.91%	5.45%	10.78%	11.56%	3.12%	10.65%	decrease
NS18092110h10	1.30%	9.92%	7.32%	9.92%	16.42%	8.46%	7.15%	10.57%	13.33%	3.41%	12.20%	decrease
NS18121109h35	1.43%	7.79%	6.16%	10.25%	21.93%	8.57%	7.79%	10.97%	10.77%	3.57%	10.77%	decrease
NS16103010h40	3.53%	9.53%	12.68%	4.48%	12.20%	8.01%	5.91%	16.68%	6.67%	5.72%	14.59%	low flow
NS16112110h51	1.91%	12.14%	10.33%	4.11%	12.62%	10.04%	2.68%	17.50%	10.33%	6.12%	12.24%	low flow
NS16120113h15	0.84%	12.55%	10.88%	5.65%	13.81%	9.41%	2.30%	16.32%	9.41%	5.44%	13.39%	low flow
NS16121210h25	1.86%	6.21%	7.45%	6.83%	12.42%	11.80%	9.32%	10.56%	17.39%	4.35%	11.80%	low flow
NS16122210h10	0.50%	14.07%	6.53%	3.02%	4.02%	8.04%	12.06%	9.55%	19.10%	6.03%	19.09%	low flow
NS17011911h40	2.10%	11.64%	7.22%	4.77%	13.85%	10.24%	5.59%	14.20%	13.97%	5.24%	11.18%	low flow
NS17040510h50	1.10%	11.70%	8.35%	8.65%	14.75%	9.93%	4.94%	13.47%	13.10%	3.90%	10.12%	low flow
NS17042710h38	2.22%	6.67%	4.44%	5.19%	17.04%	12.59%	8.15%	9.63%	13.33%	6.67%	14.07%	low flow
NS17042815h10	4.10%	9.23%	3.59%	6.67%	13.33%	7.18%	10.77%	14.87%	13.85%	5.64%	10.77%	low flow
NS17052311h00	2.38%	10.58%	6.91%	5.40%	15.98%	10.58%	10.37%	11.02%	12.31%	2.16%	12.31%	low flow
NS17070610h40	1.98%	7.92%	9.41%	7.92%	11.39%	9.90%	10.40%	12.87%	9.41%	3.96%	14.85%	low flow
NS17101810h29	3.00%	7.12%	33.71%	4.12%	5.62%	3.37%	9.36%	7.49%	9.36%	4.87%	11.99%	low flow
NS17111010h14	2.67%	8.67%	14.67%	6.67%	16.67%	11.00%	5.33%	8.67%	9.00%	5.00%	11.67%	low flow
NS17120511h35	1.21%	7.55%	9.64%	7.77%	15.36%	9.07%	4.73%	15.45%	15.01%	4.16%	10.06%	low flow
NS18010910h40	1.00%	9.24%	9.65%	9.19%	13.29%	9.03%	5.60%	13.87%	10.95%	4.47%	13.71%	low flow
NS18051608h03	2.11%	7.85%	9.03%	8.21%	16.76%	9.26%	3.63%	14.54%	12.78%	5.39%	10.43%	low flow
NS18061909h20	0.77%	10.43%	8.56%	7.46%	13.06%	9.88%	3.62%	12.95%	15.48%	5.49%	12.29%	low flow
NS18101510h45	0.49%	9.09%	7.79%	10.06%	16.72%	9.09%	7.31%	11.36%	13.47%	3.08%	11.53%	low flow
NS18112009h35	1.05%	7.38%	7.38%	10.76%	21.73%	5.27%	8.44%	12.45%	10.55%	2.32%	12.66%	low flow
NS19012109h45	0.48%	5.94%	8.31%	11.16%	19.48%	9.03%	7.84%	11.40%	12.35%	4.99%	9.03%	low flow

Sur les deux premières dimensions (Figure 95) comme sur la Figure 93, il y a peu de variations entre les différents régimes tout comme avec les saisons. Les paramètres variant sur l'axe 2 sont, comme pour la perte (Figure 90), d'un côté la vase du Bébec (mudbebec), de l'autre la craie/craie altérée (altered chalk, chalk). Mais ici, pour la source du Hannetot, les crues ne se distinguent pas sur ces sources sédimentaires. Elles semblent plus se distinguer sur l'axe 1, qui oppose la vase de la source (mudsource), l'argile à silex (ArgileSilex), les colluvions mixtes et les limons au sol crayeux (Chalksoil), au remplissage karstique (KarstFilling) et à la craie. Cette discrimination n'est toutefois pas très claire, de nombreux points d'étiage (lowflow) semblent montrer des valeurs plus extrêmes sur les deux axes que les deux autres groupes (la variabilité intra-groupe est donc plus grande que la variabilité intergroupe).

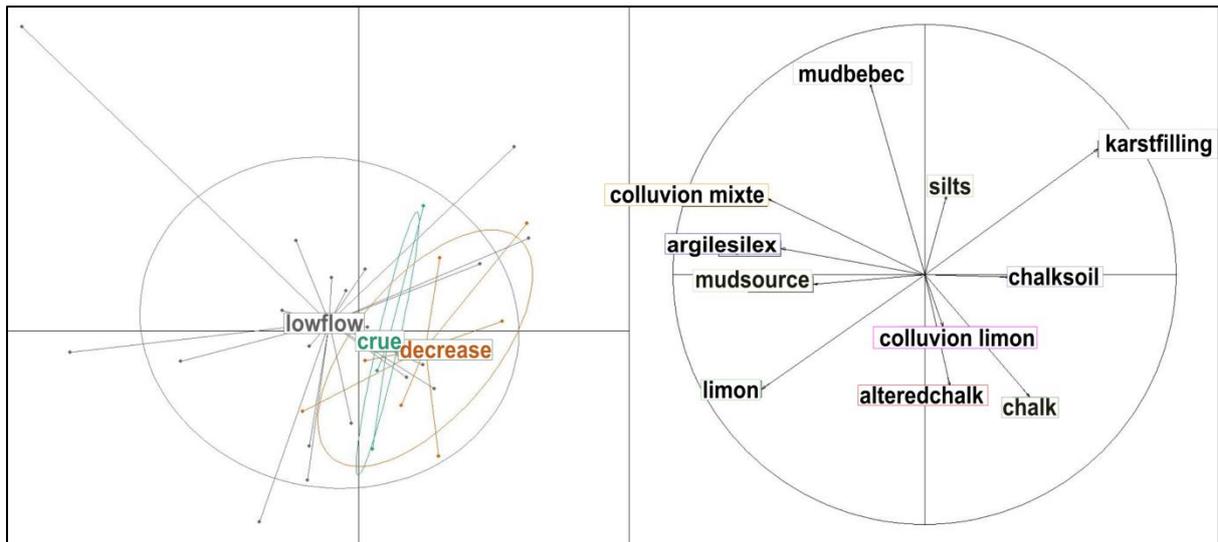


Figure 95 : Représentation graphique de l'ACP des résultats de la prédiction de l'AFD sur les échantillons mensuels prélevés à la source du Hannetot avec leur régime hydrologique en facteur, dim 1 et 2 (respectivement 25% et 20% de la variabilité)

Sur les dimensions 3 et 4 (Figure 96) on observe par contre que l'échantillon d'une crue estivale est isolé du reste sur l'axe 4. Cet axe est principalement corrélé par les argiles à Silex (ArgileSilex) et les Silts, en opposition à la vase de la source du Hannetot (mudsource). A nouveau on retrouve donc une crue ayant une signature s'éloignant de la signature globale proche des dépôts vaseux. Les argiles à Silex sont les produits de la dégradation de la craie à silex, cela semble indiquer que lors de cette crue, une partie de ces formations superficielles se serait érodée de manière préférentielle.

On observe donc que contrairement à la perte, l'ACP est peu contributive (seulement 45% de variabilité représentée sur les axes 1 et 2) et ne permet pas de distinguer de variations dans les matières en suspension à la source du Hannetôt. Les particules prélevées à la source varient peu et cette variation ne semble pas liées ni aux saisons et ni aux crues. Le karst homogénéise les restitutions particulières. Pour mieux comprendre ces différences entre les matières en suspension de la perte du Bébec et de la source du Hannetôt, il paraît intéressant de comparer les différents signaux ensembles.

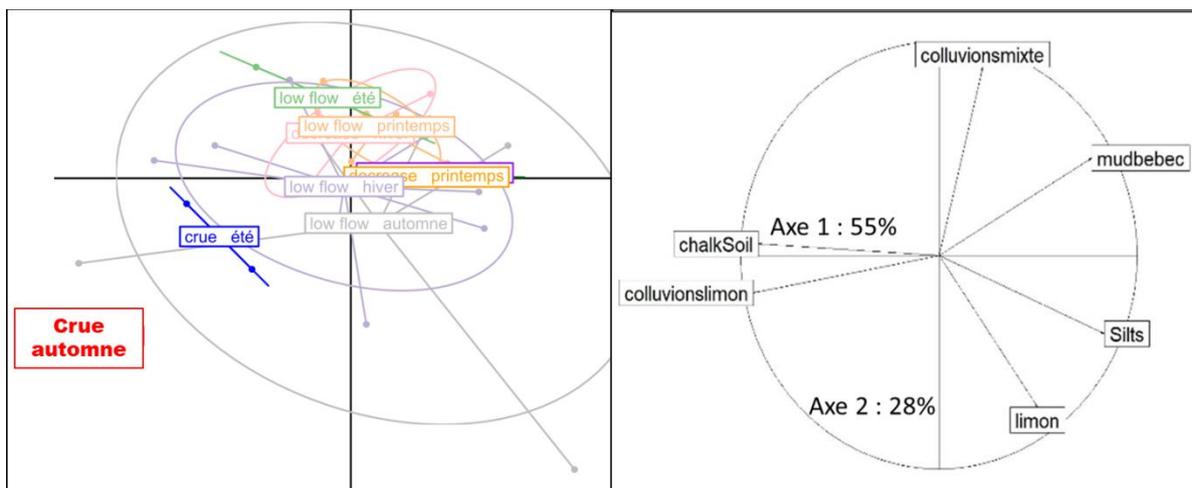


Figure 96 : Représentation graphique de l'ACP des résultats de la prédiction de l'AFD sur les échantillons mensuels prélevés à la source du Hannetot avec leur régime hydrologique et la saison en facteur, dim 3 et 4 (respectivement 16% et 12% de la variabilité)

*c) Comparaison des sédiments en suspension entre Perte et Source*

Pour comparer les variations des contributions des sources sédimentaires entre la perte du Bébec et la source du Hannetot, il serait possible de faire une ACP comme ce qui a été respectivement fait pour les MES et les sources à la fois à la perte et à la source. Ce procédé permet d'étudier les relations à la condition que les sources de variance portée par les paramètres forçants soient les mêmes. Dans le cas contraire, les sources de variance contraires engendrent une ACP de mauvaise qualité ne permettant pas une bonne analyse des paramètres forçants. Dans notre cas, les paramètres forçants le transfert des MES depuis les sources en surface, tels que la géomorphologie, la répartition spatiale, la pluviométrie ne sont pas les mêmes que ceux pour le transfert de ces MES dans le karst où d'autres sources sont présentes et où le transfert se fait d'une autre nature (conduite en charge, stockage-déstockage, dilution avec les eaux de nappe). Dès lors, il convient d'utiliser des méthodes d'analyses factorielles k-tableaux dont l'analyse de coinertie a été décrite avant au chapitre I.C.2)b). Celle-ci calcul un plan factoriel compromis au sein duquel les résultats des analyses en composantes principales effectuées sur les 2 jeu de données de la perte et de la source sont projetées pour pouvoir être analysés conjointement (Figure 97).



Figure 97 : schéma conceptuel des analyses statistiques menant à l'analyse en co-inertie

Dans notre analyse de coinertie, nous comparons les individus prélevés à la perte et à la source le même jour alors que les paramètres morphogranulométriques sont différents. Le coefficient RV est de 0.24, il y a donc 24% de covariance entre les deux ACP. Sur la projection dans le plan du compromis de la coinertie des axes des ACP (graphique en haut à gauche de la Figure 98) les plans de l'ACP de la perte (X axes), montrent que l'axe 1 ne subit que peu de modification et est fortement corrélé à l'axe 1 du plan du compromis. L'axe 2 et l'axe 3 de la perte sont fortement anticorrélés à l'axe 2 du compromis. Pour la source, l'axe 1 de l'ACP de la source (Y axes) est anticorrélés à l'axe 1 du compromis. Les axes 2 et 3 sont faiblement anticorrélés à l'axe 2 du compromis.

Sur la projection des variables dans le plan du compromis (en bas à droite de la Figure 98), on observe les contributions des sources sédimentaires à la perte sur la droite (X canonical weights) et les contributions des sources sédimentaires à la source sur la gauche (Y canonical weights). On constate que sur l'axe 1, sont corrélés, pour la perte, la vase du Bébec (mudbebec) et les silts (positif) et les colluvions de limons et le sol crayeux (chalkSoil) (négatif) alors que pour la source, les colluvions de limons et sol crayeux sont également négativement corrélés mais c'est la vase du Hannotot (mudsource), les colluvions mixtes et la craie altérée qui est positivement corrélé. A la perte les colluvions mixtes sont négativement corrélés sur l'axe 2 alors que c'est la vase du Bébec qui est négativement corrélé sur l'axe 2 pour la source avec les remplissages karstiques, en opposition aux limons qui sont positivement corrélés à la source comme à la perte. Il est possible de déduire que le transfert particulaire entre la perte et la source est ainsi dominé par l'opposition entre vase dans la partie positive de l'axe 1 et colluvions-limons+sol crayeux dans la partie négative ; l'axe 1 révèle l'hydrodynamisme du transfert plus fort avec des particules plus grossières, plus hétérogènes et anguleuses en partie négative et que les particules de sédiments intrakarstiques sont proches des vases du Bébec et que les vases recueillies à la source sont proches d'un mélange de colluvions mixtes et de craie altérée.

Sur la projection des individus dans le plan du compromis (en haut à droite de la Figure 98), le début de la flèche représente la position des individus de la perte et la fin de la flèche représente la position des individus de la source le tout projeté dans le plan du compromis. On constate que les directions des flèches ne semblent pas suivre une tendance particulière. On constate également que la signature de la plupart des échantillons ne varie pas énormément entre les deux sites (les points sont situés à peu près au même endroit au niveau du graphique à la perte comme à la source). Les variations se font principalement sur l'axe 2. La Figure 99 permet une analyse plus détaillée des variations des individus entre la source et la perte.

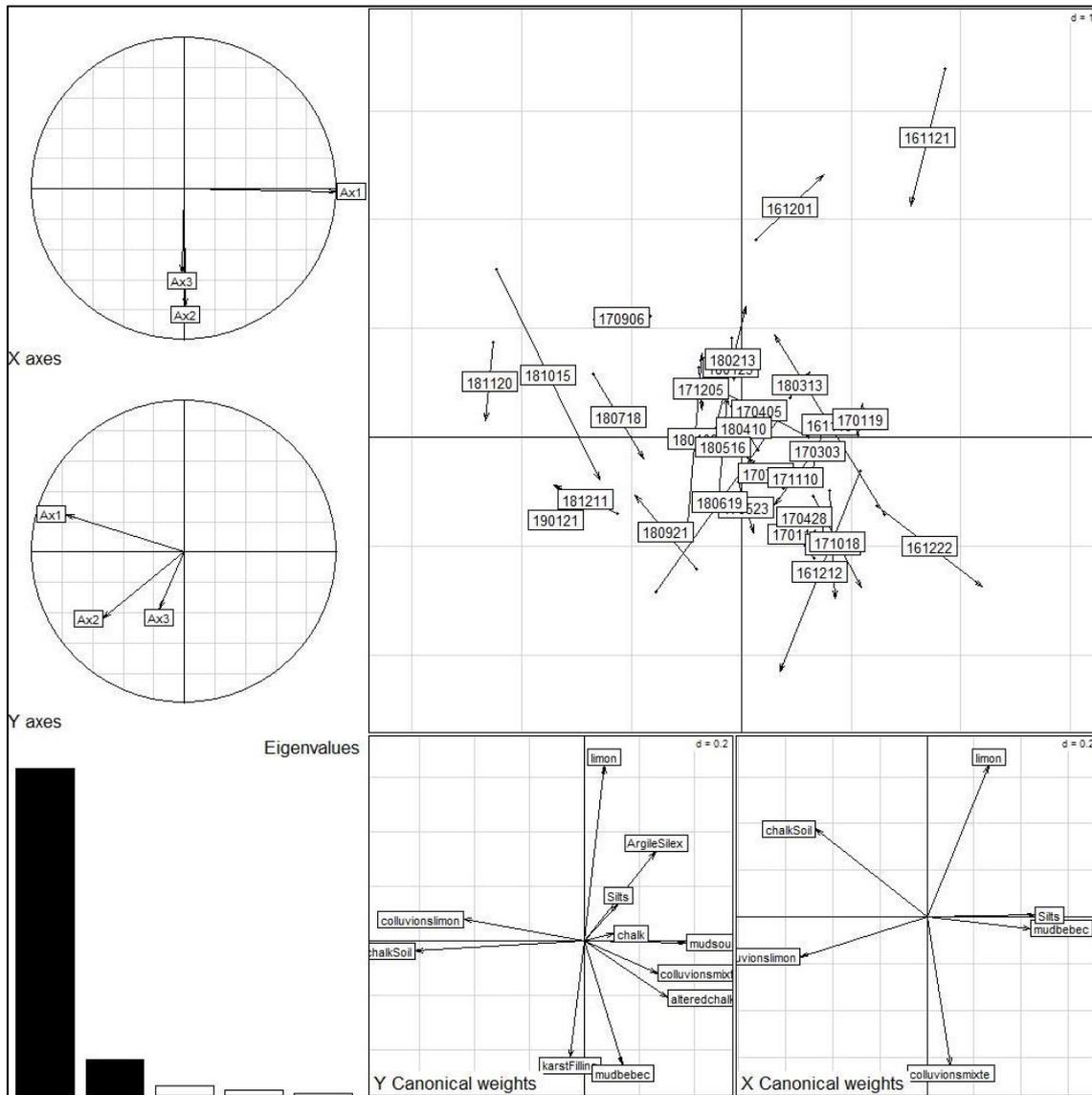


Figure 98 : Synthèse graphique de l'analyse en coinertie sur les pourcentages de sources sédimentaires des échantillons mensuels à la perte (figure 13) en X et à la source (figure 18) en Y ; En haut à gauche la transformation des axes 1 à 2 des ACP X et Y sur le plan des axes 1 et 2 du compromis ; en haut à droite le trajet perte->source pour chacun des 30 échantillons ; en bas à gauche le pourcentage de variabilité expliqué par le plan du compromis ; et en bas à droite le cercle de corrélations des variables X et Y dans le plan du compromis (axes 1-2)

La Figure 99 montre la projection des individus de chaque ACP dans le plan du compromis. On observe assez nettement que suivant l'axe 1, pour la perte comme pour la source, les échantillons suivent un décalage progressif du positif (2016-2017) vers le négatif (2018-2019) au fil des échantillons. Il semble y avoir une tendance globale avec des crues (croix) plus dans la partie négative de l'axe 1 et des étiages (triangles) plus dans la partie positive.

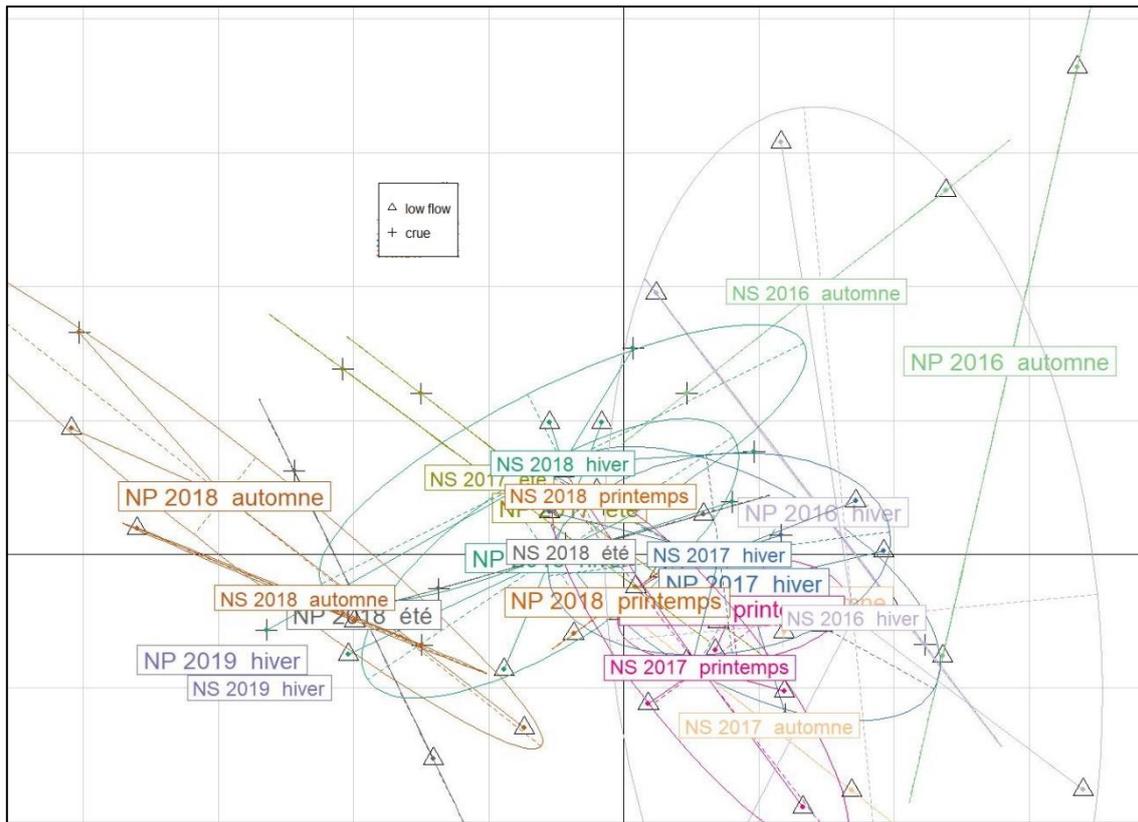


Figure 99 : projection des individus de X (ACP de la perte du Bébec) et Y (ACP de la source du Hannebôt) dans le plan du compromis (axes 1 et 2) ; NP : échantillons de la perte, NS : échantillons de la source ; les points d'étiage (low flow) sont en triangles et les points de crue sont en croix.

On peut retirer de ces analyses en coïncidence trois forçages sur le système Bébec-Hannebôt selon les 3 premiers axes du compromis. Selon l'axe 1, on observe le forçage principal : les échantillons suivent une variation temporelle régulière, une diminution de la part des limons et des silts et une augmentation de la quantité de colluvions de limons et de sol crayeux sur toute la durée des 3 ans de suivi en lien avec une pluviométrie plus forte. Les silts sont très corrélés avec l'axe 1 pour la perte mais ne sont corrélés avec aucun des 2 premiers axes pour la source, on peut donc interpréter qu'une grande partie de ces silts sont stockés à l'intérieur du système.

L'axe 2 montre des variations plus difficiles à identifier, on observe à la perte un signal sur les crues d'été et d'automne, qui arrivent après une période sèche et ont donc une dynamique sédimentaire différente des crues hivernales et printanières pour lesquels les sols sont déjà saturés. Toutefois, à la source, on n'observe pas de différence notable sur l'axe 2 du compromis avec de caractéristiques plus homogènes.

Les variations observées sont ponctuelles, liées à la fréquence d'échantillonnage (un échantillon par mois) et les rares crues ne sont échantillonnées qu'une fois. Il n'est pas possible d'observer les évolutions liées aux différentes étapes de la crue (montée, pic, décrue et récession) qui peuvent pourtant être à l'origine de rapides variations de forte intensité dans les modalités de transfert particulière. Pour répondre à ce problème, une carotte sédimentaire a été prélevée afin d'analyser les dépôts sédimentaires à la source du Hannebôt sur une période continue.

## C. ANALYSE D'ARCHIVE SEDIMENTAIRE : CAROTTE DES SEDIMENTS DE LA SOURCE

### 1) Méthodologie

La limite des prélèvements mensuels se trouve dans la fréquence d'échantillonnage. Les crues karstiques sur Norville ne durent que quelques heures, un prélèvement par mois réduit les chances d'échantillonner une crue, et donc de suivre toutes ses composantes (montée, pic de crue, décrue, récession). C'est pourquoi, afin d'analyser les variations morphogranulométriques sur une durée longue de manière intégrée, une carotte a été prélevée en mars 2017 dans l'abri de la résurgence construit lors de l'exploitation de la source pour l'eau potable (Figure 81, Figure 100). La configuration du bassin présente une zone de sédimentation où la carotte a été prélevée (point NOR1703, Figure 100). Le dernier curage du bassin a été réalisé après un premier carottage en Septembre 2013 (Chedeville, 2015). La carotte de 34 cm correspond donc à 4 ans de dépôt. Après une analyse visuelle de la carotte, on constate une alternance de niveaux plus sableux avec d'autres plus argilo-silteux (Figure 101) qui semblent dans la continuité des observations réalisées sur la carotte de 2013 (Chedeville, 2015). Un échantillon tous les centimètres a été prélevé pour les analyses granulométriques et morphogranulométriques dans le but de comparer les variations morphogranulométriques à celles observées sur les échantillons mensuels et d'observer des signaux de crue qui, sur les 4 ans de dépôts, devraient être présents.

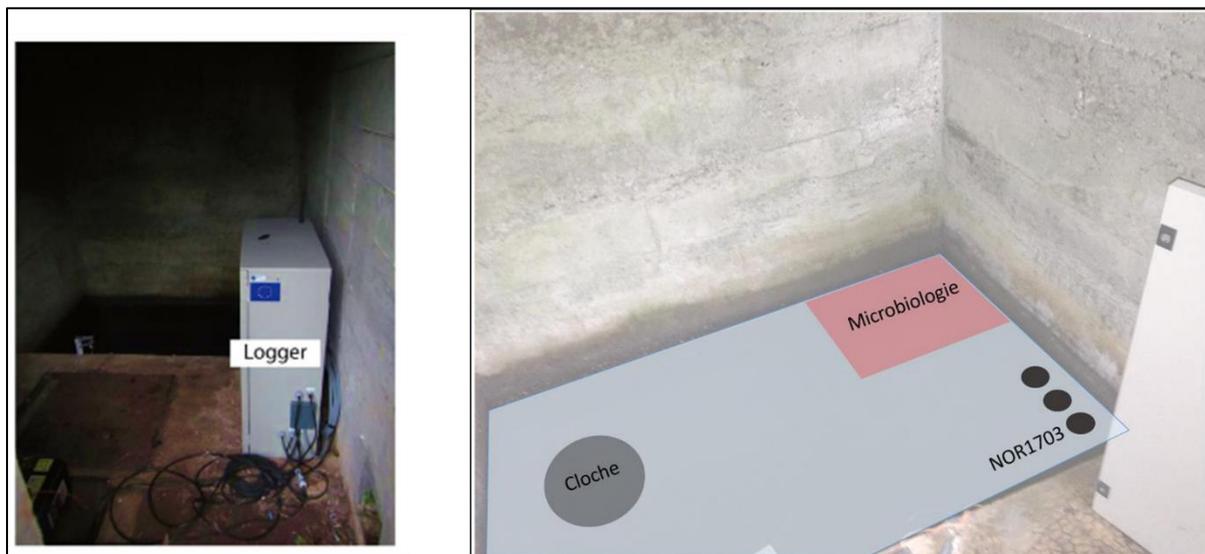


Figure 100 : photographie de l'intérieur de l'abris de la source du Hannetôt (à gauche) et localisation de la carotte NOR1703 à l'intérieur du bassin (à droite)

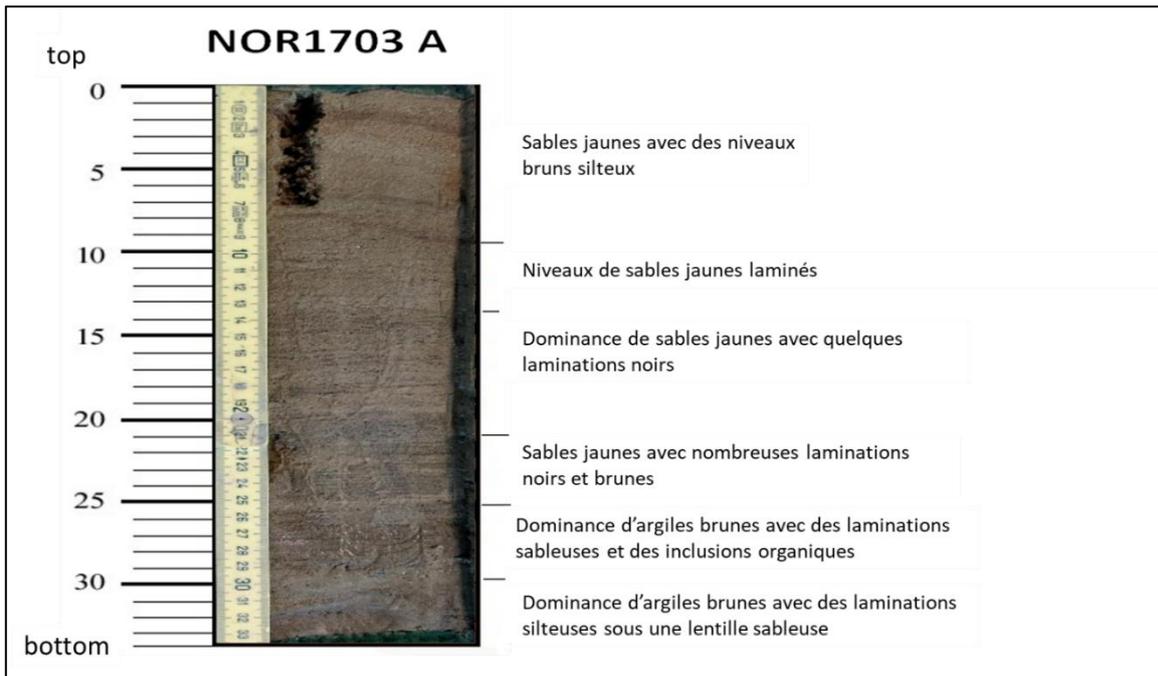


Figure 101 : photographie et description lithologique de la carotte NOR1703A

## 2) Capacité de la granulométrie à identifier l'origine sédimentaire

Les analyses granulométriques (Figure 102) montrent un remplissage silteux à sableux avec de faibles proportions d'argile. La plupart des échantillons présentent une distribution unimodale, à l'exception de quelques niveaux multimodaux (6-7 cm et 26-29 cm). On observe également une augmentation graduelle du mode principal du bas de la carotte vers le haut.

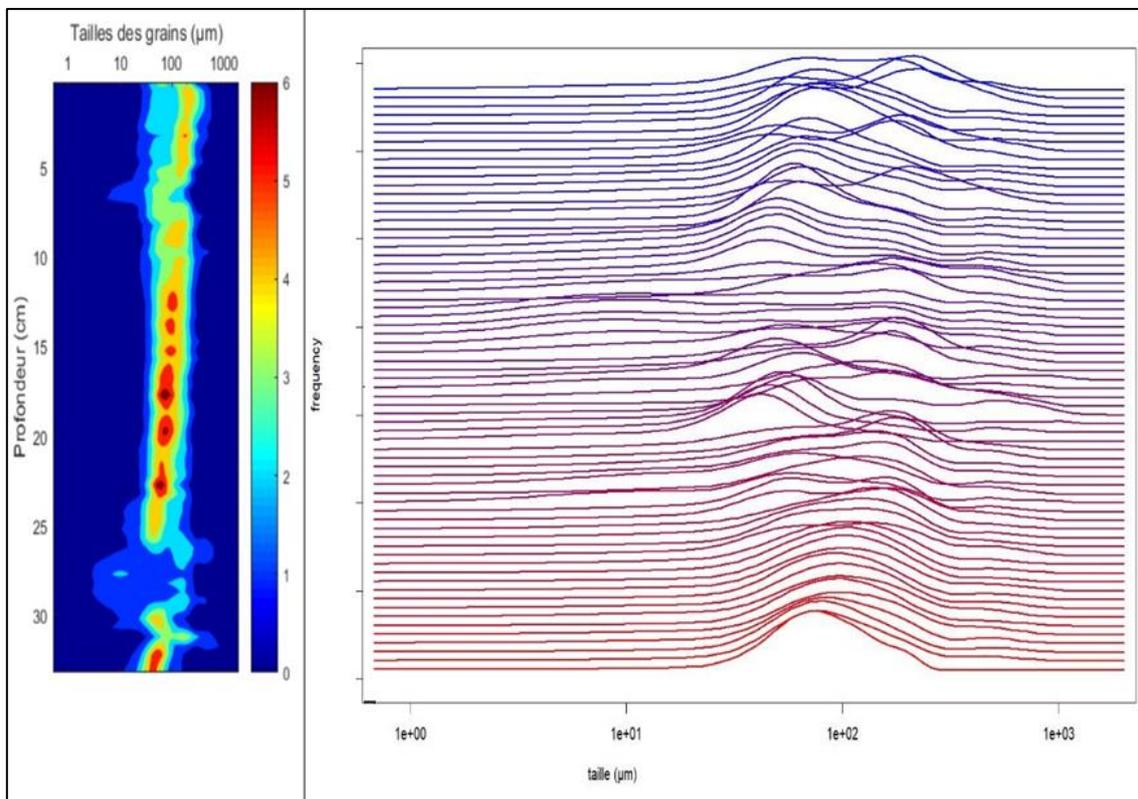


Figure 102 : distribution de taille des particules des différents niveaux de la carotte NOR1703A

Les distributions ont été analysées avec Gradistat (Blott et al. 2001) pour obtenir les variables statistiques communément calculées pour interpréter des distributions granulométriques. Une ACP a été réalisée avec ces variables (Figure 103), les deux premiers axes représentent 82% de la variabilité.

On observe de nombreux groupes de paramètres différents, les fines (D10, Fine silts, Very Fine Silts, Clay) sont corrélées avec l'axe 1 et les particules plus grossières (Medium Sand, Coarse Sand, Coarse silt) avec l'axe 2. La moyenne (Mean) et la médiane (D50) sont corrélées avec les tailles intermédiaires, (Sand, Fine Sand et Mud) sur une combinaison des deux axes (axe 1 positif-axe 2 négatif/axe 1 négatif axe 2 positif).

La plupart des échantillons au-delà de 20 cm de profondeur se retrouvent proches du coin supérieur gauche, avec l'argile (Mud), tandis que les échantillons plus proches de la surface sont placés plutôt en bas à droite, corrélé avec les sables. On observe donc à nouveau que la taille est progressivement plus grande du bas vers le haut de la carotte, mais on voit également que certains échantillons semblent faire exception à cette tendance, par exemple la profondeur 31-31,5 cm est aussi grossière que les échantillons proches de la surface, ou les échantillons des profondeurs 6-6,5 cm 6,5-7 cm qui possèdent plus de fines que les profondeurs adjacentes.

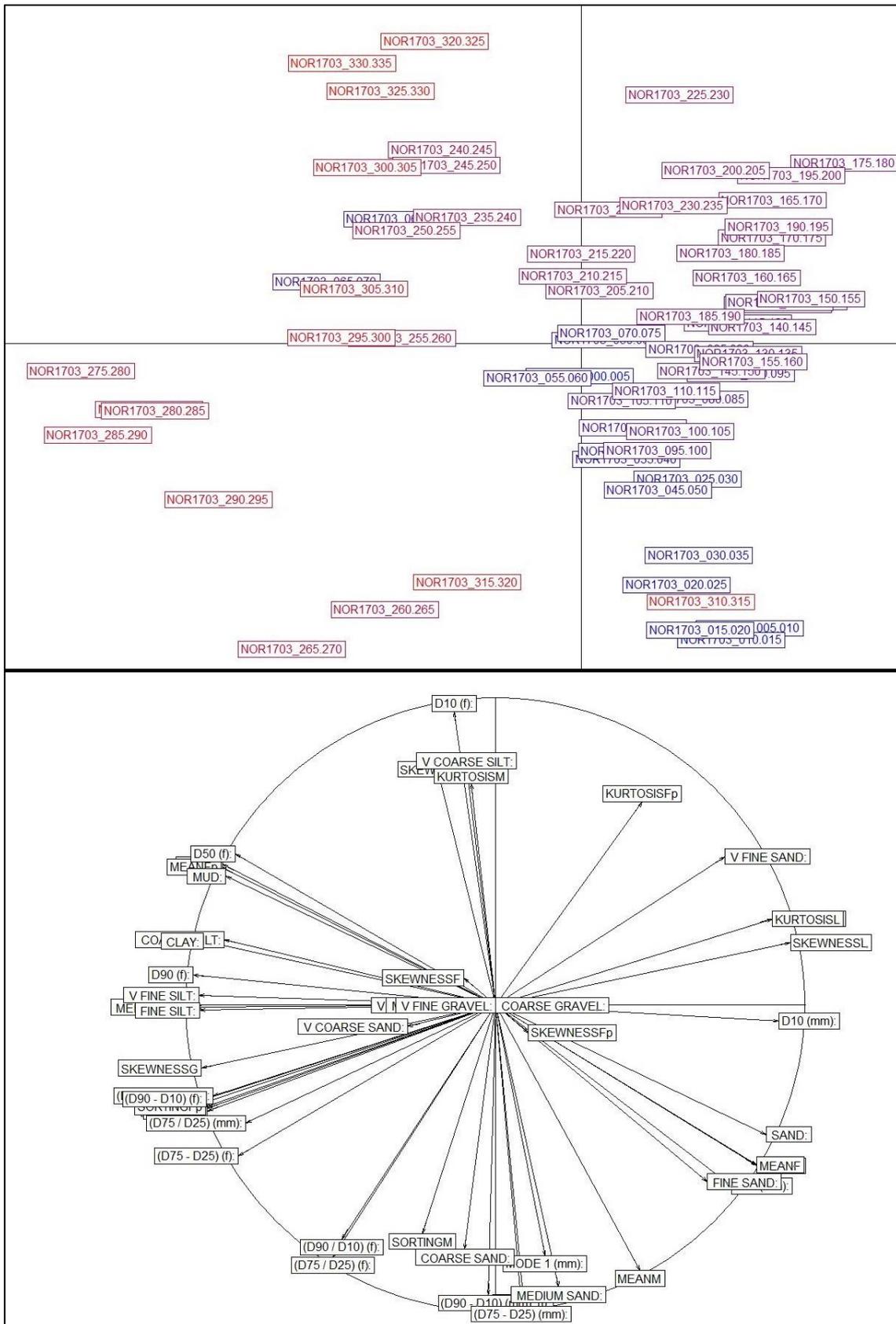


Figure 103: Représentation graphique de l'ACP des variables statistiques calculées par Gradistat avec la profondeur en facteur (surface : bleu ; profondeur max : rouge), les axes 1 et 2 représentent respectivement 51% et 31% de la variabilité totale

En traçant directement la médiane (D50) en fonction de la profondeur, on observe bien cette augmentation progressive de la taille en réduisant la profondeur (Figure 104). Cette augmentation peut s'expliquer par un changement progressif des conditions hydrodynamiques au fur et mesure que le bassin se remplit. Plus le bassin se remplit, plus la colonne d'eau se réduit et donc moins de fines sont piégées. On retrouve également les niveaux qui diffèrent de la tendance (5,5-6.4 cm et 260-300 cm). Ces niveaux correspondent aux niveaux identifiés comme présentant des distributions multimodales à la Figure 102.

Ces niveaux multimodaux indiquent qu'un nouvel apport sédimentaire ponctuel important à la source du Hannebot. Cela pourrait être lié à une crue exceptionnelle. L'analyse morphogranulométrique devrait pouvoir confirmer ces observations.

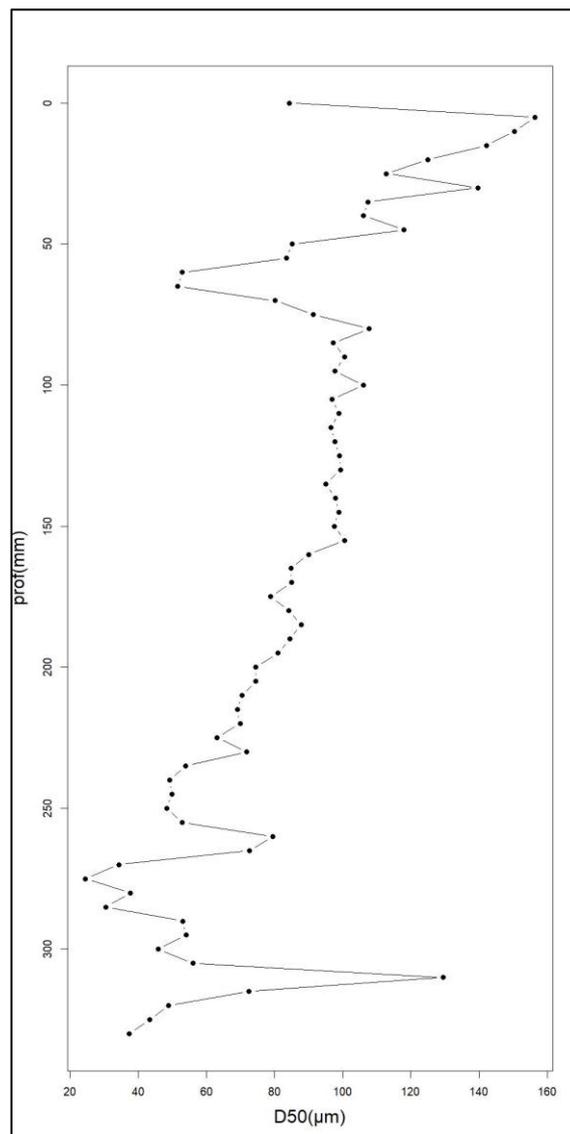


Figure 104: taille médiane (D50) en fonction de la profondeur de la carotte sédimentaire

### 3) Apport de la morphogranulométrie à l'identification de l'origine sédimentaire

En réalisant une ACP sur la médiane des paramètres de taille et de forme de chaque échantillon (Figure 105) on observe que 95.6 % de la variabilité est représentée par les axes 1 et 2.

On note tout d'abord sur le diagramme des variables que 2 groupes de paramètres se détachent. Un groupe avec les paramètres de tailles (axe 2) : Area Diameter, Length, Width et Crofton Diameter ;

l'autre rassemble les paramètres de forme (axe 1) : Elongation, Roughness, Bluntness, Circularity, etc.

Sur le diagramme des individus, il semble y avoir deux groupes de profondeur variant selon la taille (axe 2), les échantillons moins profonds (0 à 100 cm) se retrouvent plutôt dans les valeurs négatives, tandis que les plus profonds sont plutôt positifs (100-230 cm). Les échantillons les plus profonds sont toutefois peu discriminés sur l'axe 2 et semblent se détacher des autres sur l'axe 1 : les paramètres de forme.

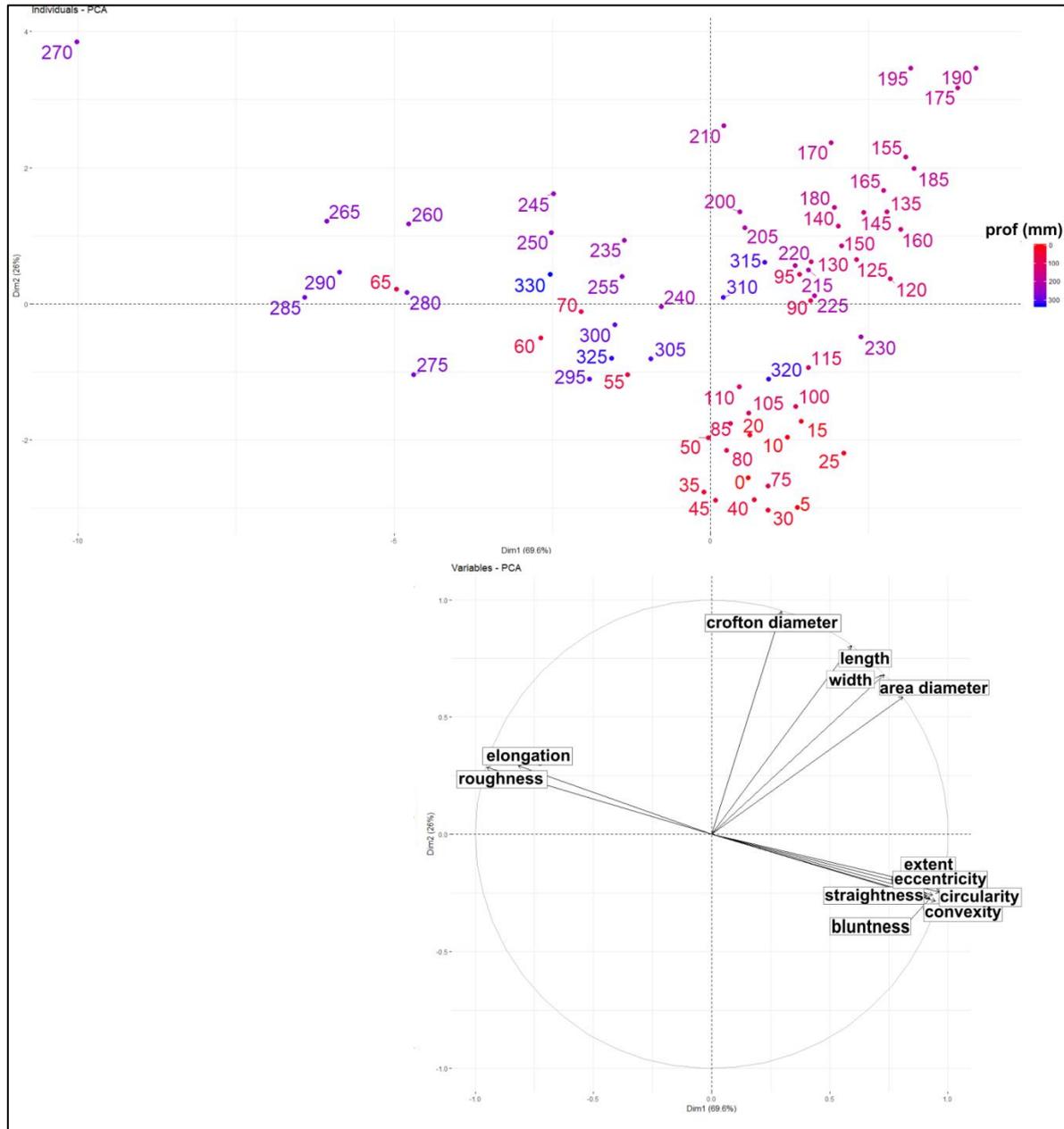


Figure 105 : Représentation graphique de l'ACP sur les médianes des différents échantillons de la carotte NOR1703A avec la profondeur (en cm) en facteur, dim 1 et 2 (respectivement 69% et 26% de la variabilité)

La Figure 106 reprend l'ACP précédente avec en facteur les échantillons avec des distributions granulométriques unimodales ou bimodales. L'axe 1 est corrélé avec les paramètres de forme et l'axe 2 avec la taille. L'axe 1 semble bien discriminer les deux groupes. Il semble donc que les variations de paramètres de forme soient corrélées avec cette variation entre distributions

granulométriques unimodales et bimodales. Les échantillons unimodaux se distinguent par une Elongation et une Roughness plus faibles et une Bluntness, Straightness, Convexity, Extent et Eccentricity plus fortes que les bimodaux. Donc le nouveau mode apporte des matériaux plus allongés et hétérogènes, ce qui peut être potentiellement lié à de plus fortes crues. L'axe 2 est principalement lié à des variations intra-classes et ne distingue pas ces différents modes.

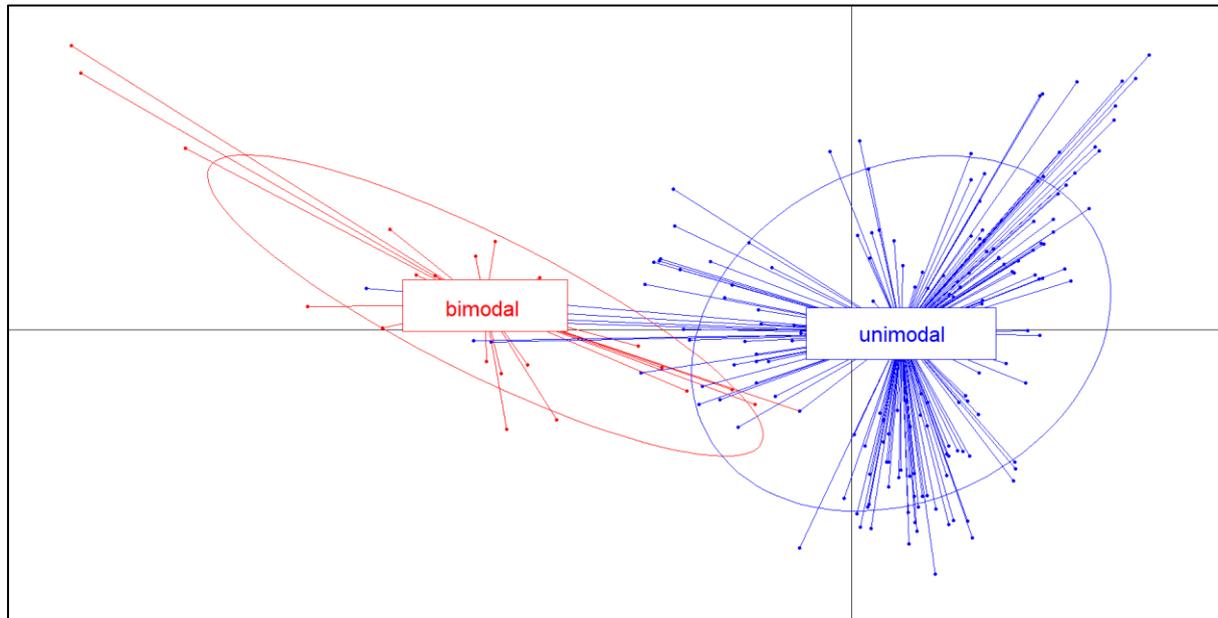


Figure 106 : Représentation graphique des résultats de l'ACP sur les médianes des différents échantillons de la carotte NOR1703A avec le nombre de modes en facteur, dim 1 et 2 (respectivement 70 et 25% de la variabilité)

La Figure 107 montre les variations des différents paramètres avec la profondeur. On retrouve les observations de l'ACP : les paramètres de taille ont des variations similaires, tout comme les paramètres de forme. On observe 2 pics sur les paramètres de forme, un autour de 26-27 cm et un autre autour de 5-6 cm.

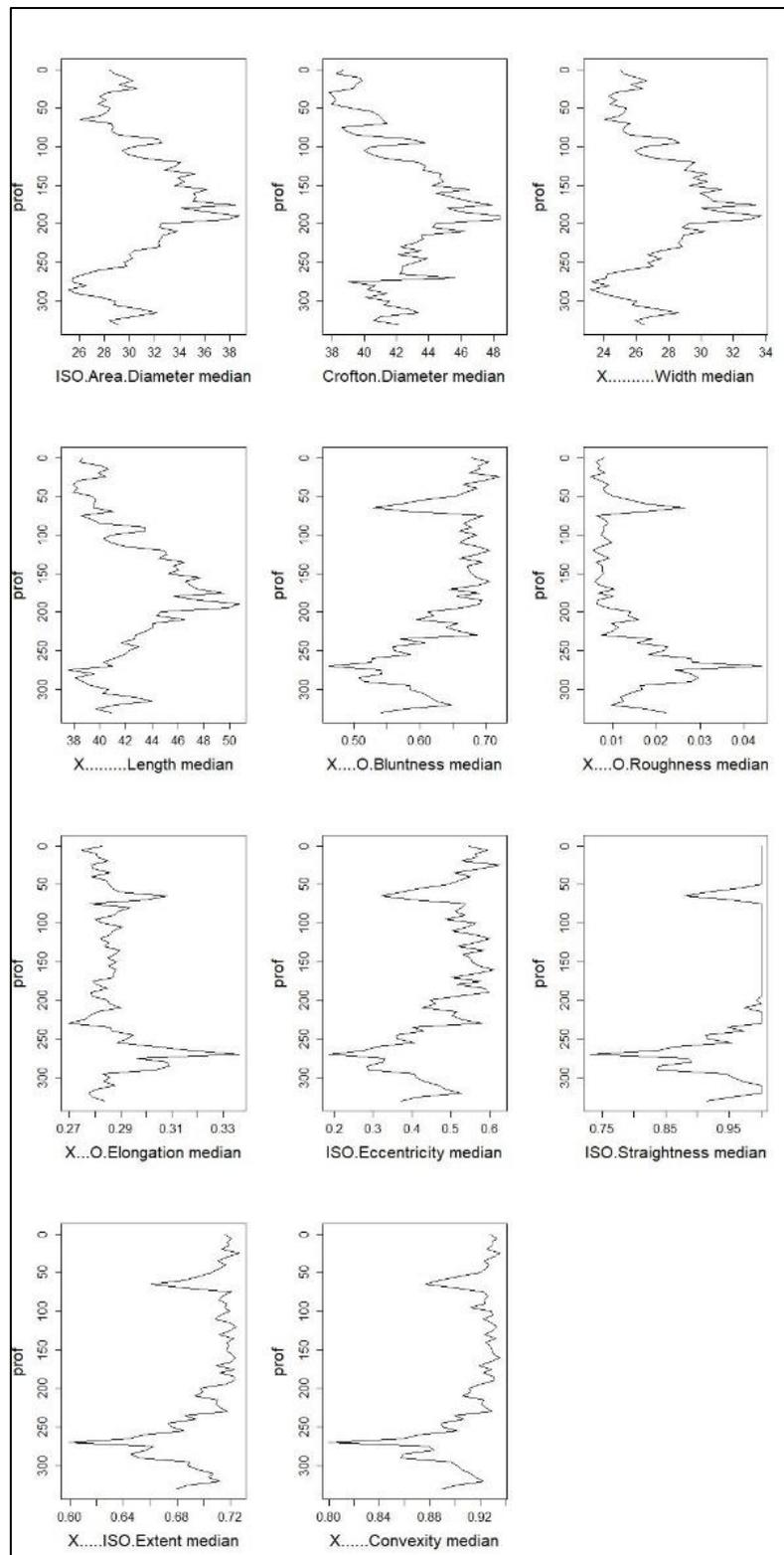


Figure 107 : paramètres de forme en fonction de la profondeur

Pour mettre ces résultats en perspective avec les sources sédimentaires, il est nécessaire de les observer ensemble. Lorsque l'on place les médianes des différents niveaux de la carotte et les médianes des sources sédimentaires de la source du Hannebot dans une même ACP, on obtient la Figure 108. Les dimensions 1 et 2 représentent 95% de la variabilité. Les paramètres sont répartis comme sur la Figure 106, l'axe 1 discrimine donc les échantillons ayant une distribution granulométrique unimodale des échantillons bimodaux. Comme observé en Figure 106, ces derniers ont des formes plutôt irrégulières, ils ont donc des signatures proches des colluvions, limons et argile à silex, voire pour les valeurs les plus extrêmes, de la craie (chalk) et de la vase du Hannebot (mudsource). On peut voir le groupe unimodal associé aux groupes avec des formes plus régulières (fortes valeurs de circularity, convexity, straightness, bluntness, etc), les échantillons unimodaux sont donc proches des remplissages karstiques et du sol crayeux (Chalksoil). Entre les deux se situe la vase du Bébec (mudbebec), dont une partie semble très similaire aux échantillons unimodaux tandis que d'autres échantillons de vase correspondent plus aux échantillons bimodaux.

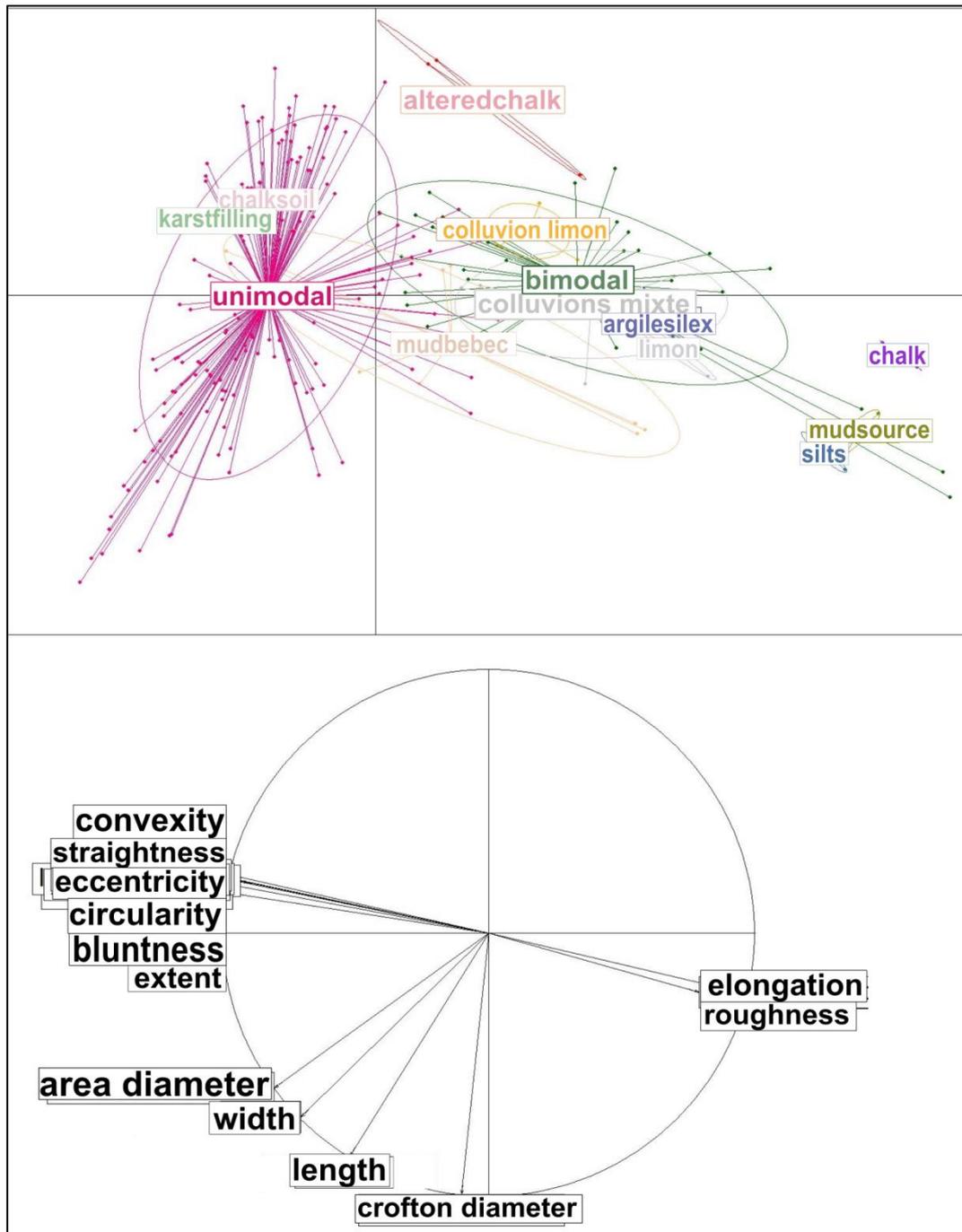


Figure 108 : Représentation graphique des résultats de l'ACP sur les médianes des différents échantillons de la carotte NOR1703A et des sources sédimentaires, dim 1 et 2 (respectivement 71 et 24% de la variabilité)

En appliquant le modèle de prédiction des sources sédimentaires (AFD présentée au chapitre IV.B.1), sur la Figure 87 et le Tableau 26) sur les échantillons de la carotte sédimentaire, il est possible d'observer l'évolution des proportions des différentes sources en fonction de la profondeur. La Figure 109 montre la même répartition au niveau des échantillons que la Figure 106. L'axe 1, séparant les 2 groupes d'échantillons est corrélé positivement avec la craie et craie altérée (chalk et altered chalk) et les limons et négativement avec la vase du Bébec (mudbebec), le sol crayeux (Chalksoil), le remplissage karstique (KarstFilling), les colluvions mixtes et l'argile à Silex. Les

échantillons à la distribution granulométrique bimodale sont positifs sur cet axe, alors que les autres sont négatifs. L'axe 2 discrimine peu les deux groupes entre eux.

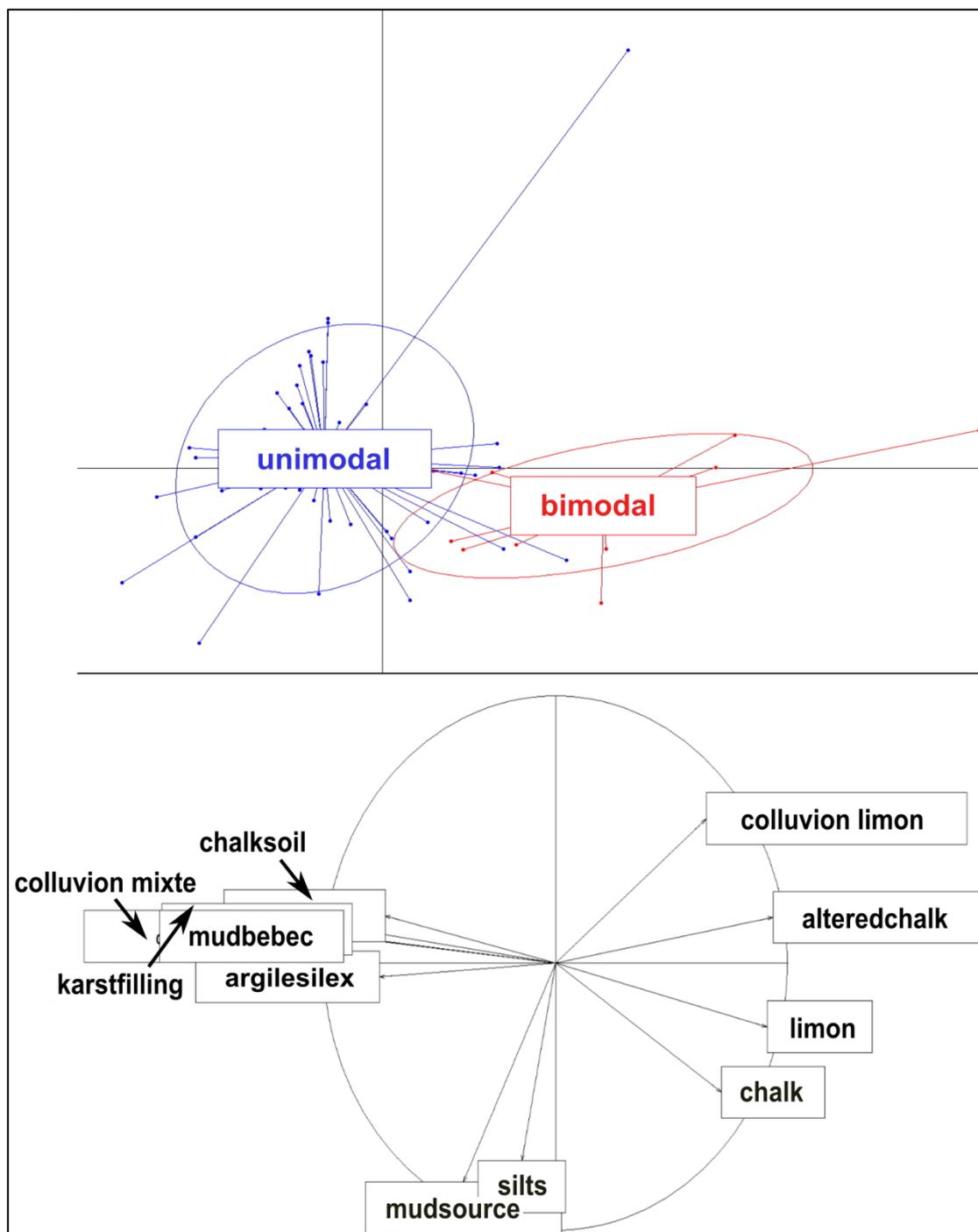


Figure 109 : Représentation graphique de l'ACP des résultats de la prédiction du modèle de l'AFD sur les résultats de l'ACP des sources sédimentaire appliqué aux différents échantillons de la carotte NOR1703A, dim 1 et 2 (respectivement 54 et 17% de la variabilité)

La figure suivante (Figure 110) montre les proportions pour les sources de limons et de la vase du Bébec (les autres paramètres montrent des variations très similaires). On observe à nouveau sur les intervalles de profondeur 5.5 à 7 cm et 26 à 30 cm des augmentations de la proportion en limons et diminution de la proportion en vase du Bébec.

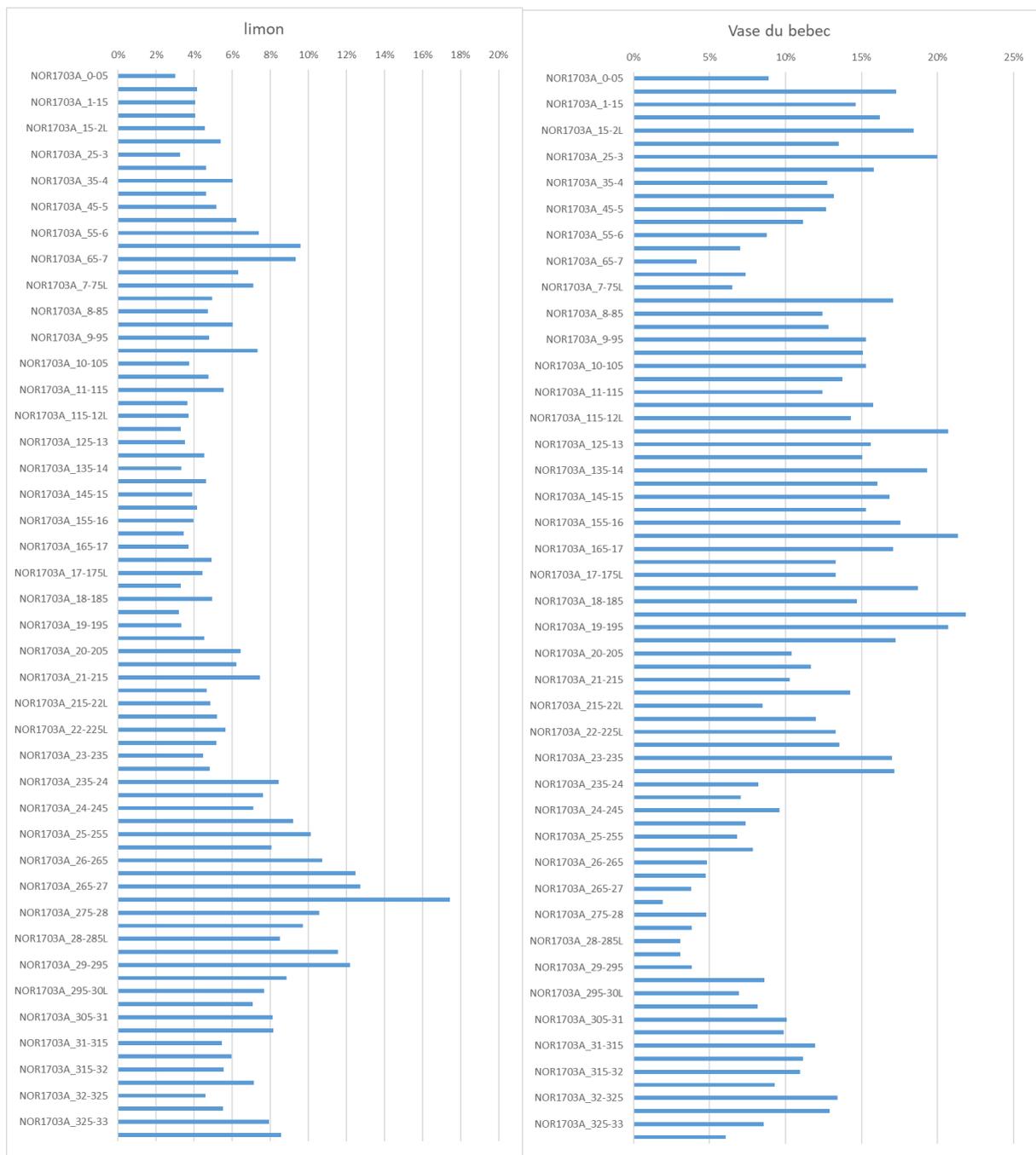


Figure 110 : proportion des sources sédimentaires de limons et vase du Bébec (Mud Bébec) en fonction de la profondeur des échantillons de la carotte sédimentaire

La Figure 111 synthétise toutes les observations issues du modèle avec les observations précédentes. La ligne en pointillé met en évidence les deux niveaux autour de 6 et 27 cm de profondeur qui montre pour chaque analyse des valeurs qui indiqueraient une proportion plus grande en limons.

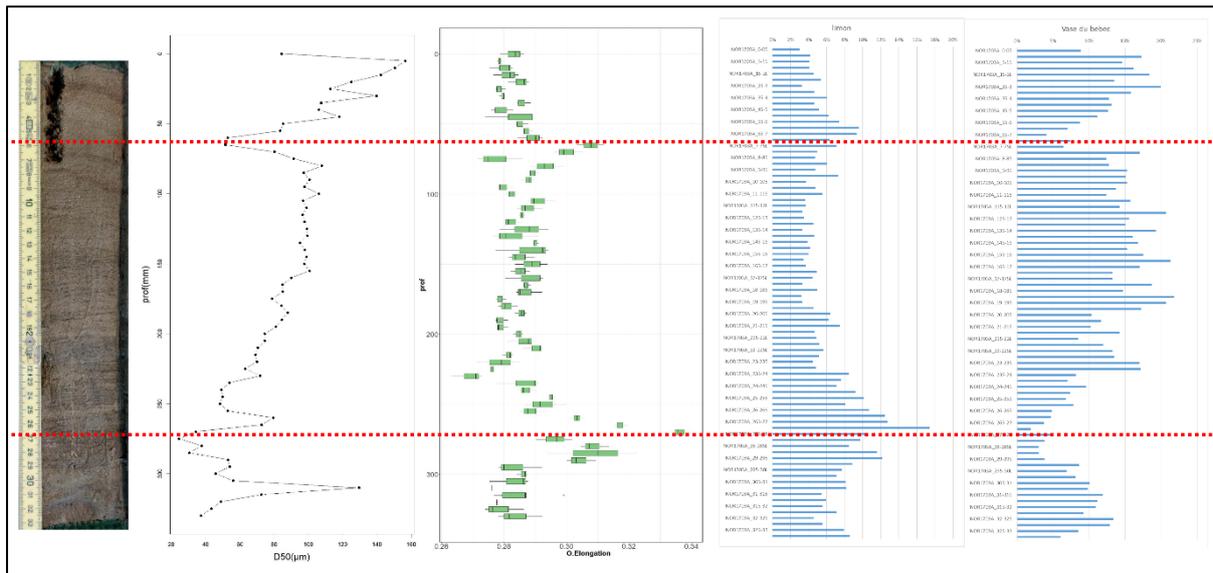


Figure 111: synthèse des analyses réalisées sur la carotte NOR1703 et corrélation entre les différents résultats ; de gauche à droite, avec la profondeur en ordonnée : photographie de la carotte, taille médiane (D50), Elongation médiane, proportions en limon et en vase du Bébec calculé par le modèle de source sédimentaires

Il semble donc que ces deux niveaux soient associés à des événements extrêmes ayant changé les contributions des différentes sources sédimentaires. Pour comparer ces 2 niveaux à des crues observées, le suivi en temps réel d'une crue est effectué.

## D. ÉTUDE DES APPORTS SEDIMENTAIRES DURANT DES EVENEMENTS EXTREMES

### 1) Simulation d'une crue par injection d'eau

Dans le cadre du projet OAK (ANSES 2018), une injection de 20 m<sup>3</sup> d'eau potable à l'aide des pompiers dans la perte du Bébec a été réalisée le 03 octobre 2018 en contexte d'étiage dans le but d'observer les transferts particuliers et bactériens entre la surface et le souterrain en milieu karstique. L'eau ressortant à la source a été prélevée toutes les heures pendant et après l'injection puis analysée en laboratoire (granulométrie, morphogranulométrie, observation MEB). En supplément des préleveurs automatiques pour suivre les MES, la crue générée est surveillée par le système de suivi déjà en place en permanence à la source. Sont mesurés toutes les 15 minutes, la pression, la turbidité, la conductivité, la température et l'oxygène dissous (sonde multi-paramètres) ; la pluviométrie (le pluviomètre est installé sur la plaine alluviale à 500 mètres de la source) ; et la fluorescence (fluorimètre Ggun).

Afin de suivre avec précision l'arrivée de l'eau injectée, de la fluorescéine a été ajoutée. Cette méthode est la plus adaptée et la plus courante pour étudier la migration de substances miscibles dans un aquifère (Duran, 2015). La fluorescéine est un traceur artificiel (Ford and Williams, 2013) détectable par mesures de fluorescence (ou fluorimétrie). Le traceur a été injecté 15 minutes avant les 20m<sup>3</sup> d'eau. De la fluorescéine avait déjà été injectée la veille afin d'observer la réaction du système dans les conditions naturelles, avant l'injection d'eau. La Figure 112 ci-dessous présente les différentes étapes de l'injection du traceur et de l'eau à la perte du Bébec et les réponses fluorimétriques à la source du Hannotot.

#### a) Réaction hydrodynamique à l'injection

Pour décrire les événements liés à la crue, la Figure 112 illustre la chronologie de l'expérience calquée sur la réponse fluorimétrique à la source. La courbe bleue représente la mesure du

fluorimètre Ggun directement à la source et la courbe orange correspond à la mesure de fluorimétrie dans les échantillons prélevés. Dû à un souci technique sur le fluorimètre Ggun (une limace bouchant le capteur lumineux), les mesures de l'instrument se sont arrêtées dans la matinée du 04 octobre. Comme on peut le voir sur la figure suivante, durant les 12 heures de prélèvement durant lesquels le fluorimètre a fonctionné, les valeurs mesurées sur le terrain (en bleu) et dans les échantillons (en orange) se superposent quasiment. On peut donc considérer que la mesure sur les échantillons est fiable (même si très légèrement surestimée), même une fois la mesure de terrain arrêtée.

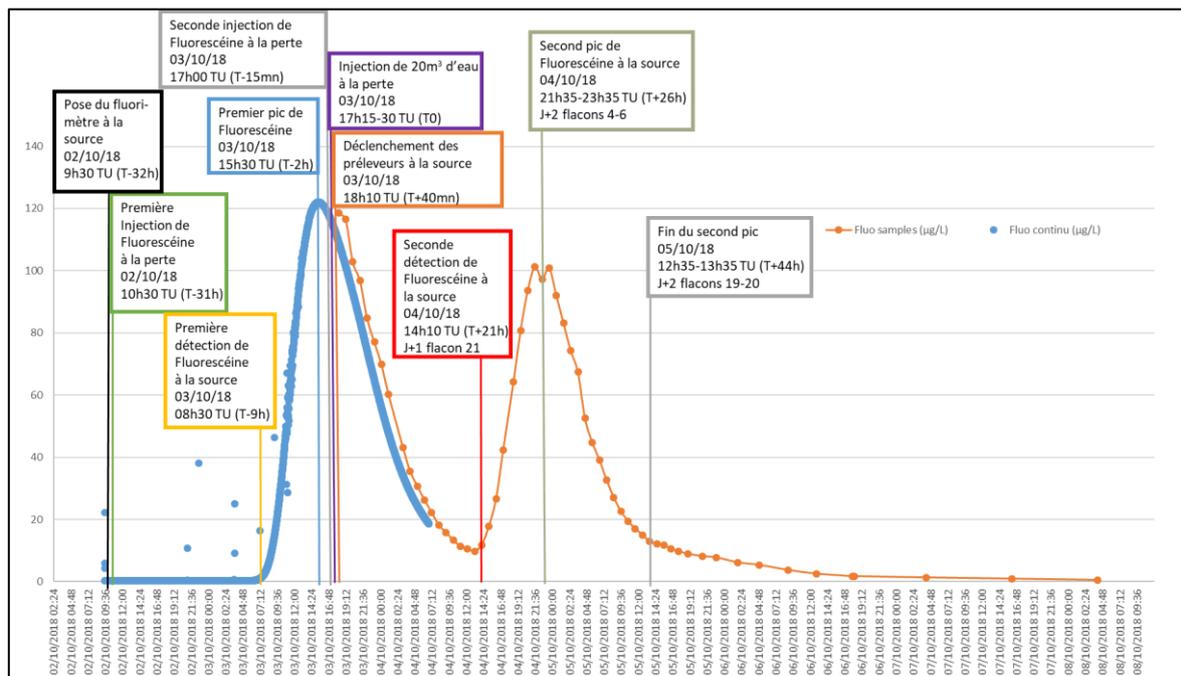


Figure 112: Courbe de restitution de la fluorescéine mesurée par le fluorimètre Ggun à la source du Hannetot en fonction de la date et des événements de l'expérimentation de terrain

Comme décrit précédemment, deux injections de fluorescéine ont été réalisées, et donc deux pics de fluorescence sont observés à la source. Le premier témoigne des conditions hydrodynamiques entre la perte et la source, le second marque l'arrivée des 20 m<sup>3</sup> d'eau à la source et permet d'évaluer l'incidence de la crue générée sur les paramètres hydrodynamiques.

Comme on peut l'observer sur la Figure 113, l'injection s'est réalisée en condition d'étiage. Le 02 octobre, 2 mm sont tombés ce qui n'est pas suffisant pour modifier la pression qui reste dans sa dynamique naturelle. Le 04 octobre à 09h15, 16h après l'injection des 20m<sup>3</sup> d'eau à la perte, un pic de faible amplitude mais très bien marqué dans la pression montre l'arrivée de l'onde de pression de la crue provoquée par cette injection. Ce pic de pression précède l'arrivée de l'eau injectée représentée par le second pic de fluorescéine à 14h10. Les précipitations dans la nuit du 06 au 07 octobre arrivent alors que la fluorescence est revenue inférieure à 5µg/L, marquant la fin de la crue.

La turbidité varie très peu (Figure 113), avec un bruit de fond de 10 à 16 NTU, de l'ordre de grandeur habituel. Quelques tendances sont toutefois visibles : La plus grande valeur mesurée (>20 NTU) durant la période de l'injection est observée le 04 octobre à 09h15, et coïncide parfaitement avec l'augmentation brutale de pression liée à l'arrivée de l'onde de crue par transfert de pression suite à l'injection des 20m<sup>3</sup>. Une troisième augmentation peut être identifiée dans l'après-midi du 04 octobre de 14h à 21h qui correspond au transfert de matière tracé par le second pic de fluorescéine et donc à l'arrivée de la masse d'eau injectée.

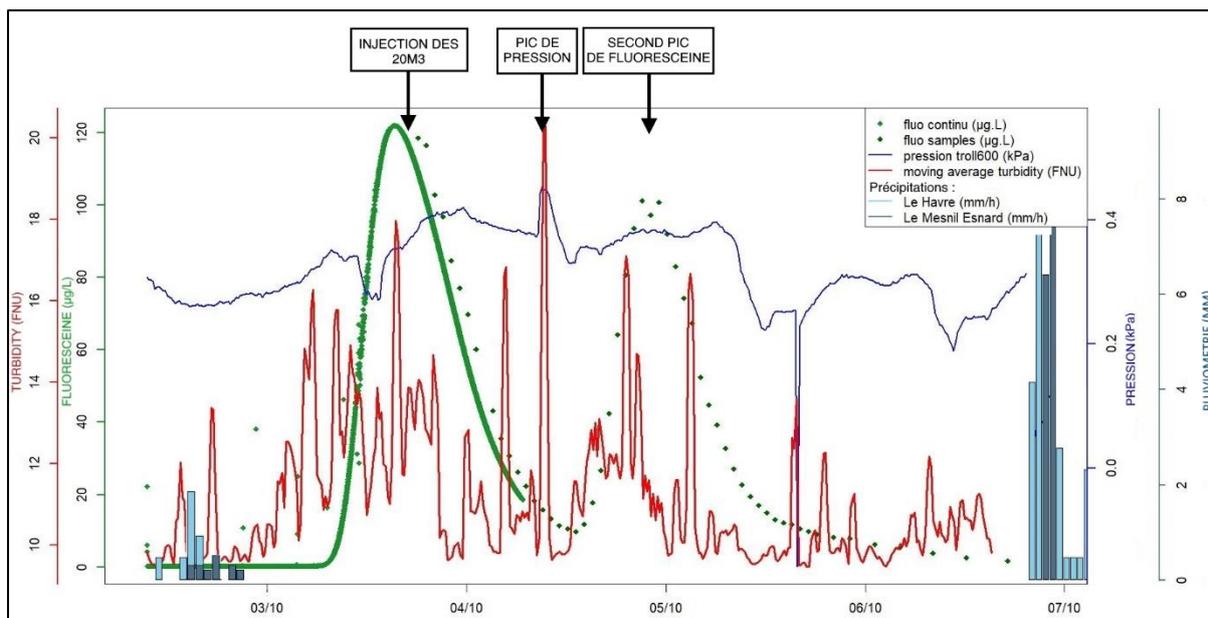


Figure 113: pluviométrie, pression et concentration d'uranine à la source du Hannetot en fonction de la date

La température varie très peu (Figure 114), entre 11,19 et 11,24°C. Elle tourne autour de 11,20°C jusqu'à l'arrivée de l'onde de crue puis monte progressivement à partir de cet évènement jusqu'à osciller autour de 11,22-11,23°C.

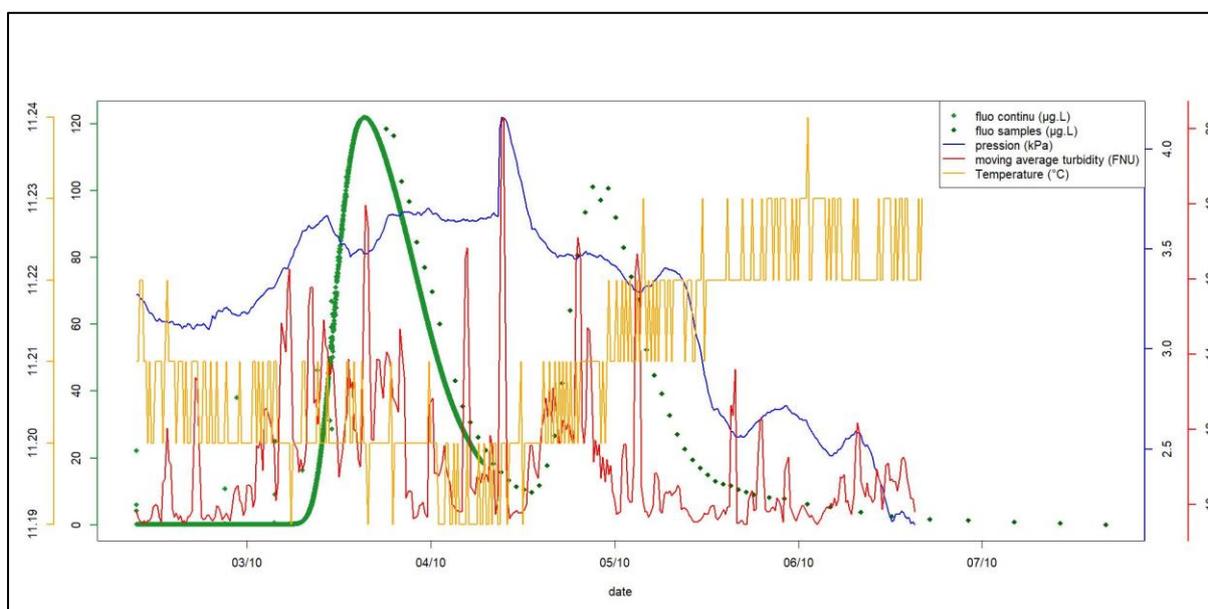


Figure 114: Evolution de la température, turbidité, pression et concentration d'uranine à la source du Hannetot lors de l'injection

L'évolution de la conductivité (Figure 115) montre que lors du pic de pression, aucune variation notable n'est visible. Par contre, lors du transfert de matière (second pic de fluorescéine) on constate une augmentation de 15  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . L'eau injectée est de l'eau potable, minéralisée et donc conductrice. Cette augmentation est donc logique et attendue.

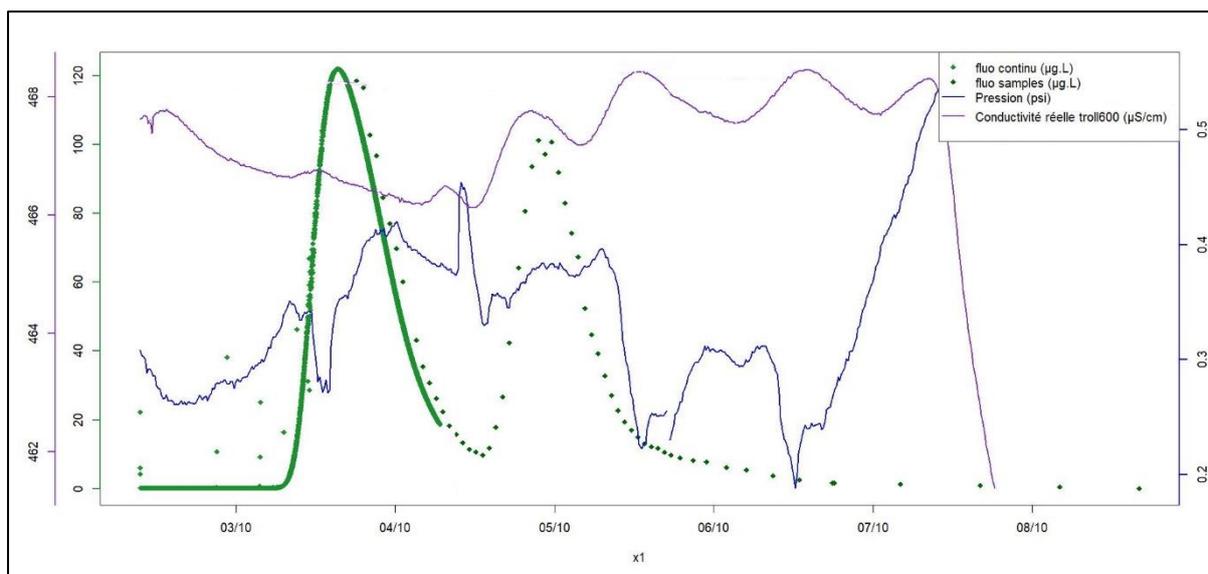


Figure 115 : Evolution de la température, turbidité, pression et concentration d'uranine à la source du Hannetot lors de l'injection

Les différentes variables mesurées par les sondes ont donc mis en évidence plusieurs évènements causés par l'injection que l'on peut interpréter suivant cette chronologie :

- Injection des 20m<sup>3</sup> à la perte le 03 octobre de 17h15 à 17h30.
- Arrivée du transfert de pression à la source causant une montée de pression et de température le 04 octobre à 09h15. Cette onde provoque un effet de chasse remobilisant des sédiments intra-karstiques ce qui provoque un pic de turbidité et de conductivité liée à une introduction d'eau potable plus conductrice.
- Arrivée de l'eau par transfert de masse à la source entre le 04 octobre à 14h10 et le 05 octobre à 13h35, visible par coloration à la fluorescéine. L'injection a probablement érodé une partie du sol couvrant la perte et provoque une légère augmentation de turbidité à son arrivée.
- A partir du 06 octobre la fluorescence est de retour à des valeurs inférieures à 10µg/L que l'on observait à l'état initial de l'expérimentation. La crue est terminée.

Plusieurs échantillons ont été sélectionnés pour réaliser les mesures de granulométrie laser et de morphogranulométrie (Figure 116). Les deux premiers échantillons (groupe 1) sont ceux prélevés 03 octobre à 18h10 et 19h10, ils correspondent à l'état initial à la source. Les échantillons suivants (groupes 2-3-4-5) correspondent aux prélèvements autour de l'arrivée de l'onde de crue par transfert de pression, le 04 octobre de 08h10 à 11h10. Le groupe 6 (2 échantillons, le 04 octobre à 17h10 et 18h35) est celui de la montée du second pic de fluorescéine et du pic de turbidité correspondant à l'arrivée de l'eau injectée. Le groupe 7 est composé de 3 échantillons du 04 octobre de 21h35 à 23h35 à l'aplomb du second pic de fluorescéine matérialisant le maximum du transfert de masse. Le groupe 8 correspond à la redescente (le 05 octobre à 04h35 et 05h35) et le groupe 9 à l'état final le 06 octobre à 13h55 et 14h55.

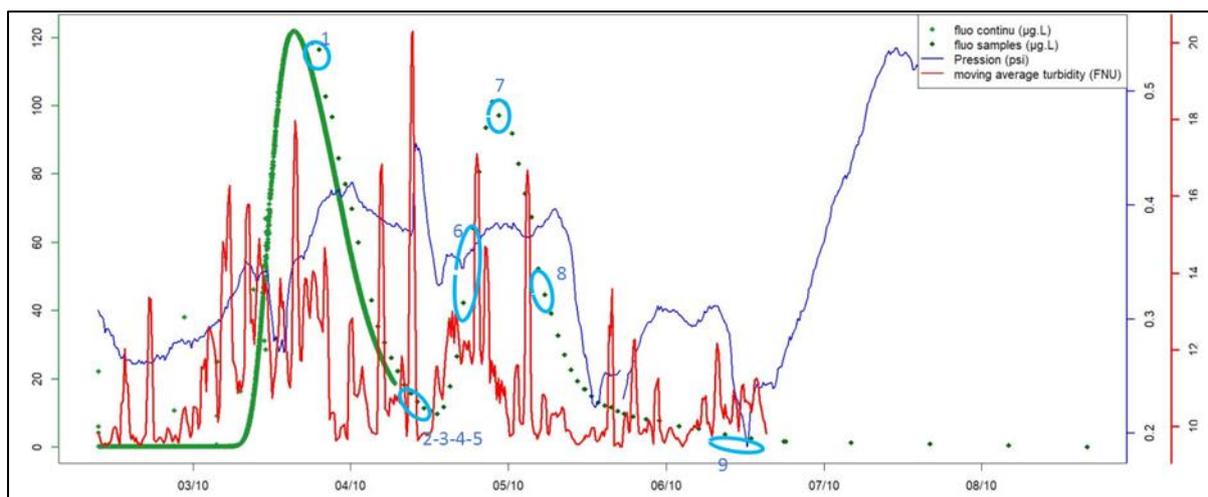


Figure 116: illustration des échantillons sélectionnés (groupes 1 à 9) sur le diagramme de turbidité, pression et concentration d'uranine à la source du Hannetot en fonction de la date

### b) Réponse granulométrique à l'injection

La Figure 117 montre que les distributions granulométriques de tous les échantillons sont bimodales avec un mode silteux à 15-20 µm et un mode sableux à 100 µm. Les proportions entre ces deux modes varient, on observe notamment que les plus faibles fréquences sur le mode à 100 µm sont des échantillons des phases initiales et finales alors que les échantillons 2, 3, 4, 5 et 6 ont des fréquences plus fortes. Toutefois certains échantillons des états initiaux et finaux ne suivent pas cette tendance.

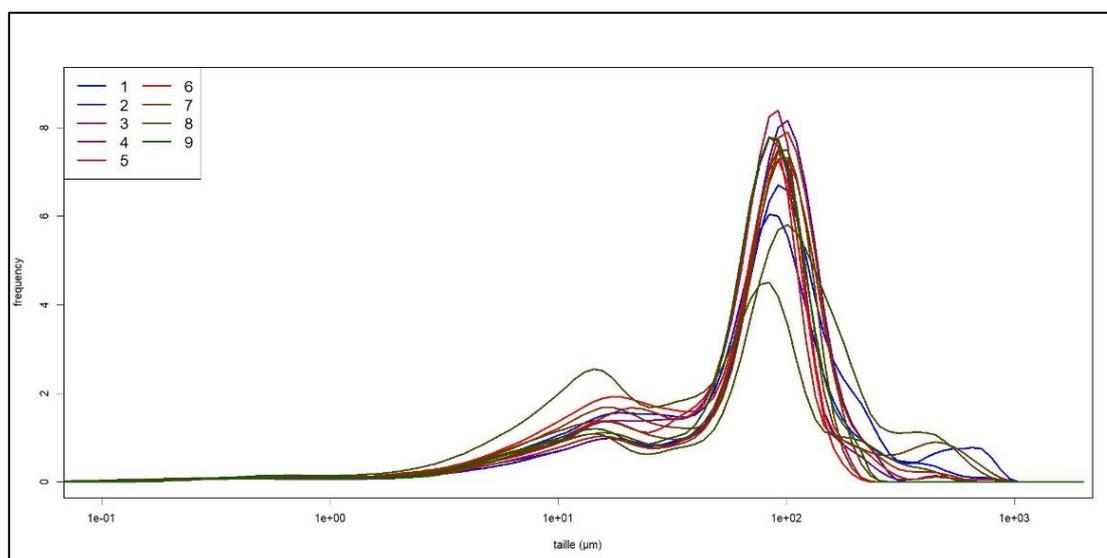


Figure 117: distribution granulométrique des échantillons sélectionnés (groupes 1 à 9), ainsi que deux échantillons de crue (flood) et un échantillon d'étiage (low flow) mesurés par le granulomètre laser

Pour observer plus en détail les différences entre les différents groupes d'échantillons. Une ACP sur les paramètres statistiques calculés par Gradistat (Blott et al. 2001) a été réalisée afin d'observer les évolutions hydrodynamiques en fonction de la granulométrie (Figure 118). Les deux premiers axes représentent 82% de la variabilité totale. Les corrélations entre paramètres sont multiples, sur l'axe 1 on retrouve notamment la médiane (D50) et la moyenne (Mean) ainsi que les proportions de sables (X Sand), argiles (Clay), et silts ; cet axe correspond à un effet taille. Sur l'axe 2 on retrouve la skewness, les rapports  $\frac{D90}{D10}$  et  $\frac{D75}{D25}$  et certains sables (Coarse Sand et Very Fine Sand). L'essentiel de

la répartition des individus se retrouve sur l'axe 2, l'axe 1 discrimine relativement peu les échantillons entre eux et on retrouve les échantillons 8 et 9 en opposition alors que leur régime est quasi identique. L'axe 2 discrimine bien les groupes d'échantillons entre eux, mais à nouveau, on n'observe pas d'évolution liée aux variations hydrodynamiques, en négatif sur cet axe 2, on retrouve les groupes 2, 3, 4 et 5 qui correspondent à l'arrivée de l'onde, mais ils sont également associés au groupe 9 qui correspond à l'état final et, contrairement aux résultats hydrochimiques (turbidité, conductivité, Température, etc, Figure 115, Figure 114, Figure 115), ne semble pas avoir une granulométrie proche de l'état initial (groupe 1), qui lui est positif sur l'axe 2 avec les groupes 7 et 8.

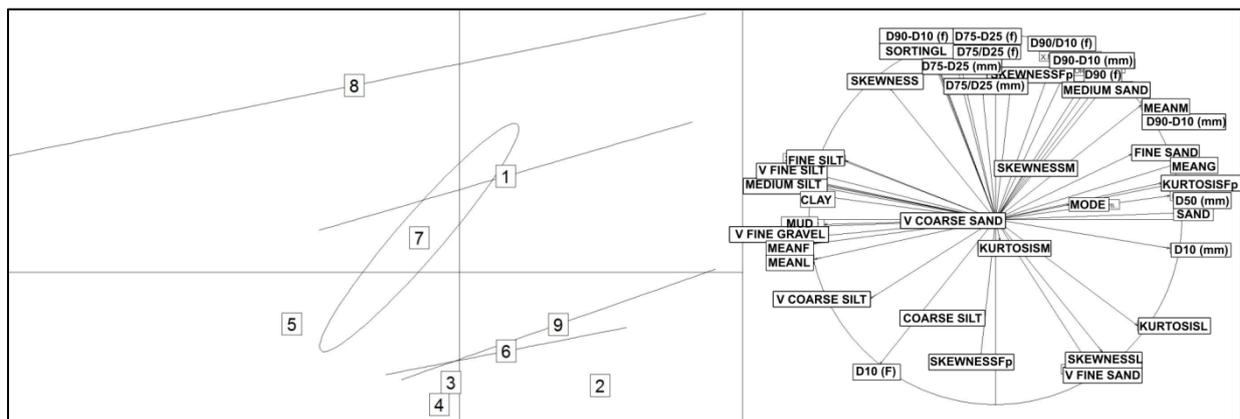


Figure 118: Représentation graphique de l'ACP sur les variables statistiques calculées par Gradistat (Blott and Pye, 2001) à partir des distributions obtenue par granulométrie laser et regroupé suivant les groupe défini sur la Figure 116, dimensions 1 et 2 (50 et 32% de variabilité)

Ces observations peuvent être retrouvées sur la Figure 119 avec les valeurs de skewness de chaque échantillon. On observe à nouveau que les groupe 2, 3, 4, 5, 6 et 7 ont des valeurs proches d'un des 2 échantillons du groupe 9. Hormis ce dernier échantillon, on observe une montée de l'échantillon initial jusqu'au groupe 4 puis une redescente des valeurs après le groupe 7 jusqu'à l'échantillon final.

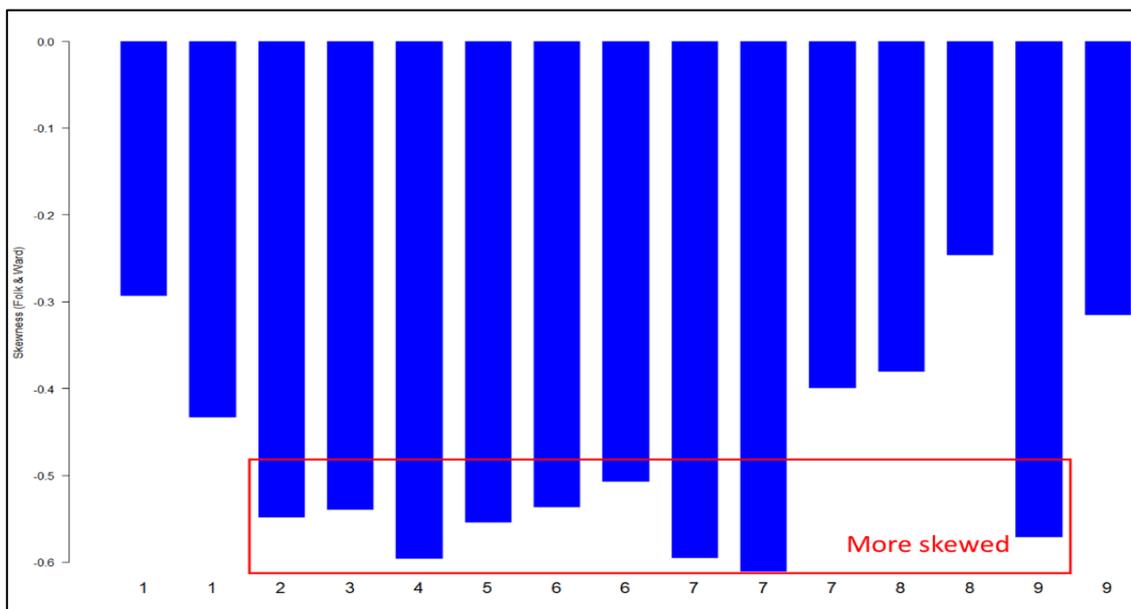


Figure 119: histogramme de la skewness en fonction des groupes d'échantillons

*c) Réponse morphogranulométrique à l'injection : variation des apports des sources sédimentaires*

L'ACP réalisée sur les médianes de chaque groupe pour les paramètres de taille et de forme (Figure 120) représente 75% de la variabilité sur les 2 premières dimensions. Les paramètres sont corrélés avec différentes combinaisons des 2 axes : les paramètres de taille sont principalement corrélés avec l'axe 1 négatif et l'axe 2 négatif. Les paramètres de formes sont plutôt assimilés à l'axe 1 positif et l'axe 2 négatif. Au niveau des points, on observe sur l'axe 1, les échantillons 2, 4, 5 et 6 dans les valeurs négatives. Les groupes 1, 7, 8 et 9 sont plutôt positif et l'échantillon 3 est nul. L'axe 2 semble peu discriminer les points, à l'exception d'un point du groupe 9.

On a donc trois échantillons de l'onde de pression (2, 4, et 5) et un de la montée de l'arrivée de la masse (6) qui présentent des tailles relativement plus élevées et des forme plus irrégulières que le reste des autres groupes.

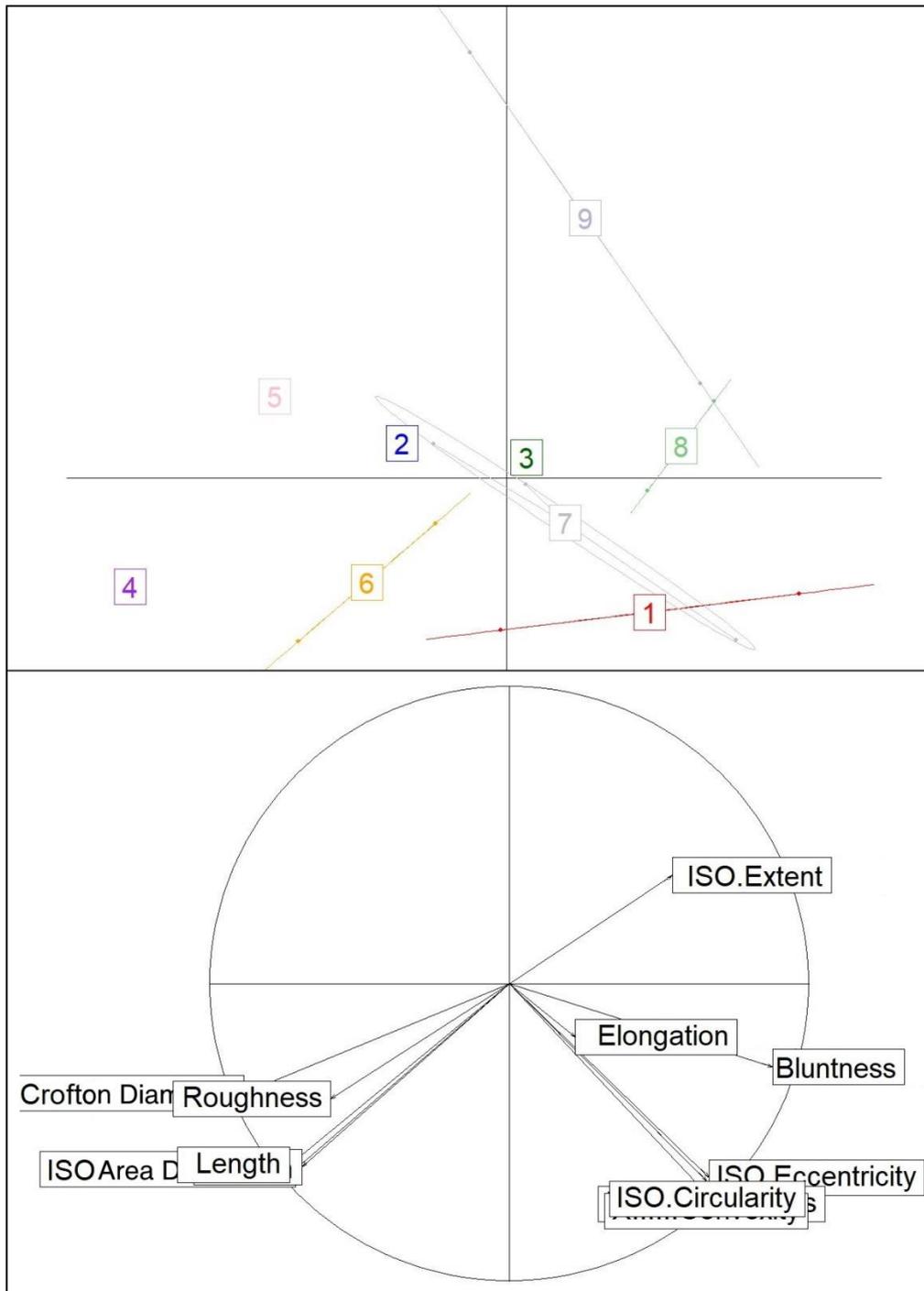


Figure 120: Représentation graphique de l'ACP des médianes des paramètres de taille et de forme mesurés par le morphogranulomètre et regroupés suivant les groupes définis sur la Figure 116, dimensions 1 et 2, 46 et 29% de la variabilité totale

En replaçant les échantillons dans le modèle de source sédimentaire, on peut essayer de voir si les variations de taille et de forme correspondent à des variations de sources, et le lien avec les variations hydrodynamiques. Le Tableau 29 illustre les pourcentages de sources calculés par le modèle de prédiction des sources sédimentaires (l'AFD est présentée au chapitre IV.B.1), sur la Figure 87 et le Tableau 26) et la Figure 121 est l'ACP réalisée sur cette table.

Tableau 29 : pourcentage de contribution de chaque source sédimentaire calculé par l'AFD pour les échantillons de l'expérimentation OAK

fac	alteredchalk	ArgileSilex	chalk	chalkSoil	colluvionslimon	colluvionsmixte	karstFilling	limon	mudbebec	mudsource	Silts
1	0%	9%	5%	6%	20%	18%	3%	7%	25%	4%	3%
2	1%	12%	6%	4%	22%	18%	4%	6%	21%	4%	3%
3	1%	10%	9%	5%	20%	17%	4%	7%	21%	3%	3%
4	1%	9%	5%	4%	20%	19%	2%	7%	23%	5%	5%
5	1%	13%	5%	5%	22%	16%	3%	5%	22%	4%	5%
6	1%	11%	7%	4%	18%	15%	4%	7%	24%	4%	5%
7	0%	9%	5%	5%	24%	16%	4%	6%	23%	4%	4%
8	1%	10%	5%	6%	24%	17%	4%	5%	22%	4%	2%
9	1%	12%	7%	5%	28%	16%	3%	5%	20%	3%	1%

Sur cette Figure 121, 58% de la variabilité est représentée par les deux premiers axes. L'axe 1 est corrélé avec la vase de la source (mudsource), les colluvions (colluvionsmixte), limons et silts et est anticorrélé avec les colluvions de limons. L'axe 2 est associé avec la craie altérée (alteredchalk), la craie (chalk) et est anticorrélé avec le sol crayeux (chalkSoil). La source vase du Bébec est corrélée avec une combinaison d'axe 1 positif et axe 2 négatif et est anti corrélée avec l'argile à silex et le remplissage karstique (KarstFilling).

Les points peuvent être classés en 2 groupes, un groupe avec les échantillons avant (1, 5), pendant le pic (7, 8), et après la crue (9), et un autre avec les échantillons de l'onde (2, 3, 4) et de la montée de la crue (6). Ces derniers sont positifs sur l'axe 1 ou 2, les échantillons initiaux et finaux sont négatifs sur l'un des deux axes. Les groupes 2, 3 et 6 sont positifs sur l'axe 2, et donc corrélés avec la craie altérée, l'échantillon 4 est positif sur l'axe 1, il est plus proche des limons, colluvions et vase de la source.

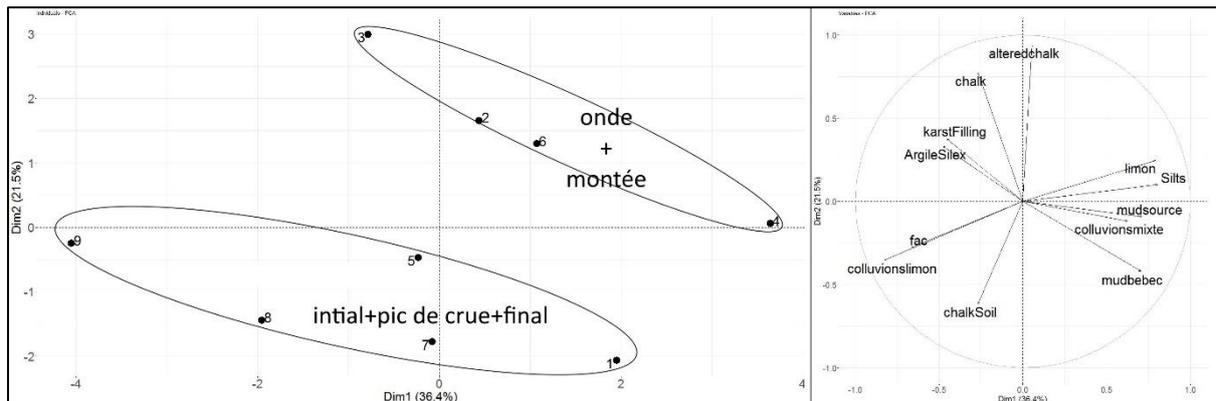


Figure 121 : Représentation graphique de l'ACP des résultats de la prédiction de l'AFD sur les échantillons de l'injection d'eau avec les sources sédimentaires en variables, dim 1 et 2 (respectivement 36% et 22% de la variabilité)

On constate donc des variations de sources sédimentaires directement liées avec les variations hydrodynamiques causées par l'injection. Un signal légèrement plus important de craie et de craie altérée (+5% sur les deux sources cumulées) pouvant être causée par le début de l'arrivée de l'onde par transfert de pression (échantillons 2 et 3) érodant et remobilisant les particules de craies à l'intérieur du karst, puis une arrivée de vase, limons et colluvions sur la fin de l'onde (échantillon 4). L'échantillon 5 marquerait un retour à l'état initial avant une nouvelle arrivée de craie altérée (échantillon 6) durant le début de l'arrivée de l'eau injectée. Retour à un état proche de l'initial pour 7, 8 et 9, où on constate cependant une diminution en vase, limons et colluvions qui différencie ces échantillons de l'état initial.

Cette interprétation est toutefois à relativiser au vu des proportions visibles sur le Tableau 29, en effet, la craie altérée représente 0 ou 1% de la contribution et la craie 5 à 9%. Le signal est faiblement contrasté et l'interprétation d'une véritable remobilisation sur de telles proportions reste

à vérifier. En effet, même si l'intensité de l'injection s'est approchée d'une crue annuelle, son volume reste très faible pour constituer un réel forçage. On observe toutefois des proportions stables autour des colluvions, vases et argiles à silex, cela donne donc un aperçu des contributions différentes sources "en étiage" à cette saison. Afin d'observer une véritable réaction clairement identifiable, il est nécessaire de réaliser le suivi d'une crue réelle avec de plus grands volumes d'eau s'introduisant dans le système.

## 2) Suivi d'une crue hivernale

### a) Réaction hydrodynamique à la crue

Du 13 au 14 mars 2019, 10 à 20 mm de précipitations sont tombées sur le bassin versant, faisant suite à un mois de pluie fine et continue (entre 0.2 et 5 mm/jour). Des prélèvements du 13 au 21 mars ont été effectués afin d'analyser cette crue par morphogranulométrie. A l'occasion de cette crue, le débit du Bébec a saturé la perte (Figure 122) et l'a fait déborder le 14 et 15 mars 2019. Un pic de turbidité de 450 NTU est observé à la perte du Bébec à 11h le 14 mars et un de 250 NTU à la source du Hannetot est observé le 15 mars à 23h (Figure 123). Ces pics sont directement liés aux précipitations du 14 mars. Un deuxième pic de turbidité est observé le 17 mars à 11h à la perte du Bébec, conséquence des précipitations du même jour. Une légère hausse de 40 à 50 NTU est observée à la source du Hannetot le 18 mars à 07h attribuable à cet événement. Les valeurs de concentrations en Matières en Suspension (MES) sont très bien corrélées avec la turbidité avec des pics à 788 mg/L pour la perte et 525 mg/L pour la source.



Figure 122: photographie de la doline de la perte du Bébec débordant le 15 mars 2019

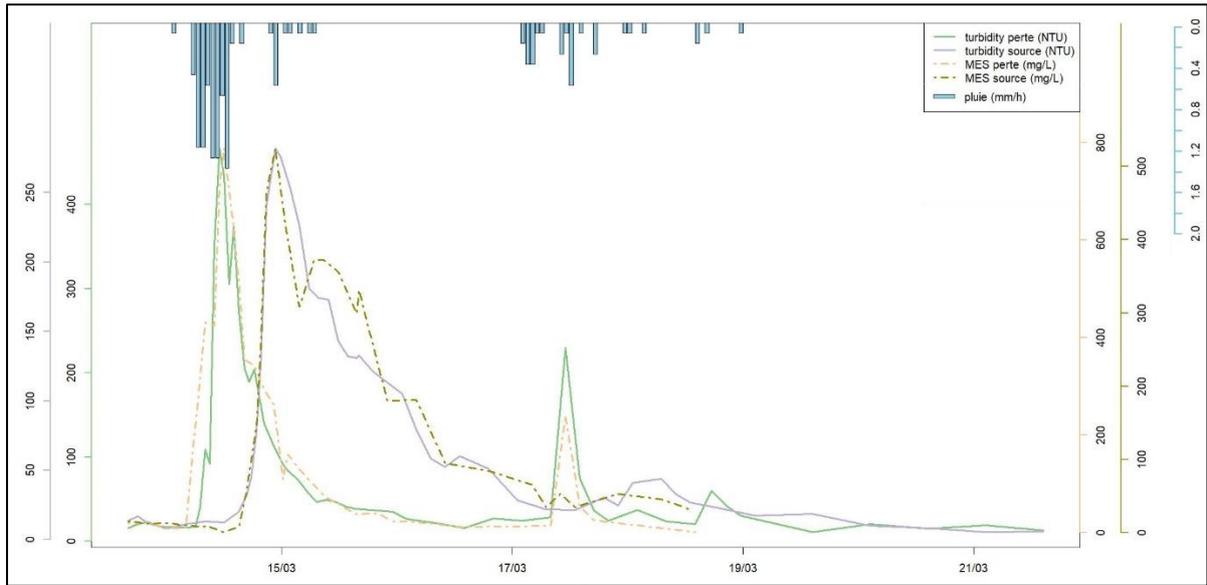


Figure 123: Evolution de la pluviométrie de la turbidité et des matières en suspension (MES) à la perte du Bébec et à la source du Hannetot avant, pendant et après la crue

A partir de ces observations sur la turbidité, la crue a été divisée en différentes périodes en fonction des observations sur la turbidité et des matières en suspension. La Figure 124 illustre le découpage réalisé pour la perte du Bébec tandis que la Figure 125 représente les périodes identifiées à la source du Hannetot.

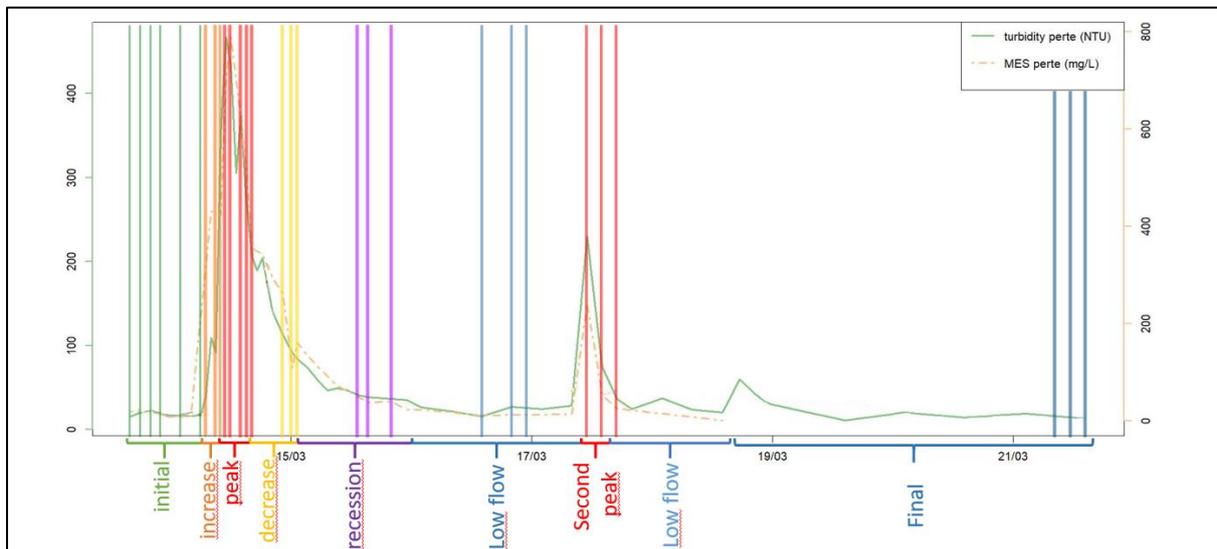


Figure 124: identification des différentes phases de la crue avec les matières en suspension (MES) et la turbidité à la perte du Bébec en fonction de la date. Les barres correspondent aux échantillons mesurés au morphogranulomètre.

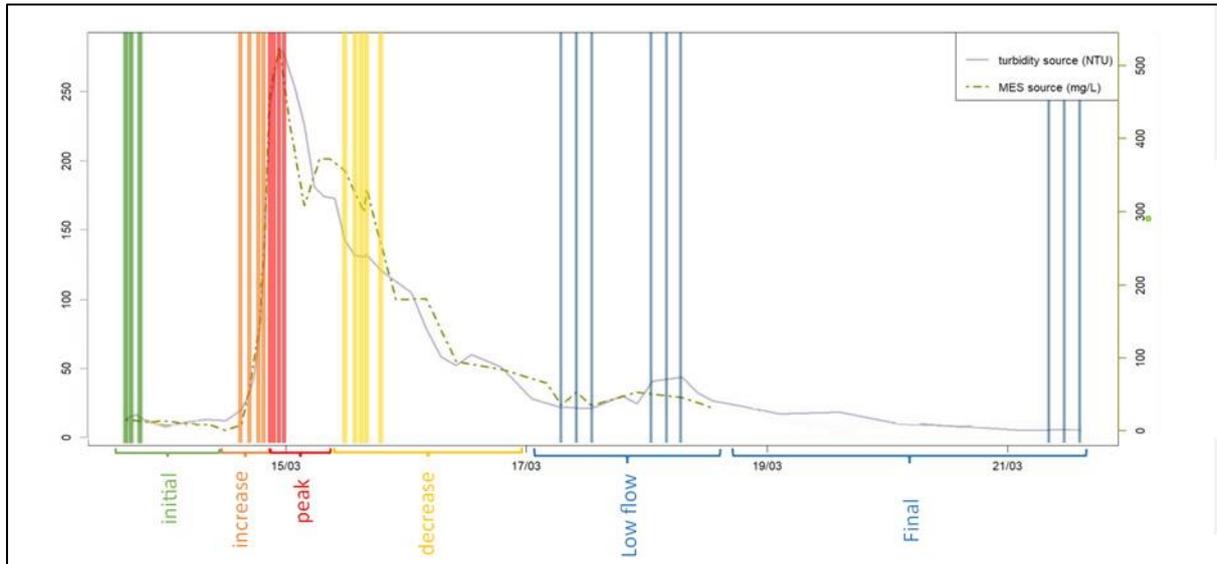


Figure 125: identification des différentes phases de la crue avec les matières en suspension (MES) et la turbidité à la source du Hannetot en fonction de la date. Les barres correspondent aux échantillons mesurés au morphogranulomètre.

### b) Réponse granulométrique à la crue

La Figure 126 montrent les différentes distributions granulométriques des échantillons respectivement de la perte du Bébec et de la source du Hannetot.

Sur la Figure 126A, on observe des distributions assez homogènes pour la phase initiale, plutôt unimodales avec un mode autour de 10  $\mu\text{m}$ . Lors de la montée (increase) les distributions restent similaires, avec une proportion de fines légèrement plus élevée sur certains échantillons. Pour les échantillons du pic (peak) jusqu'à la récession, on observe des distributions plutôt bimodales avec un deuxième mode plus grossier autour de 60-80  $\mu\text{m}$ . Les distributions sont relativement hétérogènes entre les échantillons d'une même catégorie et l'utilisation de statistiques paraît nécessaire pour résumer l'information afin de comparer chaque groupe.

Sur la Figure 126B on observe des distributions semblables et plus homogènes avec un mode principal assez fin pour les échantillons initiaux et finaux et une plus grande proportion de particules grossière pour les échantillons de la montée (increase), du pic (peak) et de la décrue (decrease).

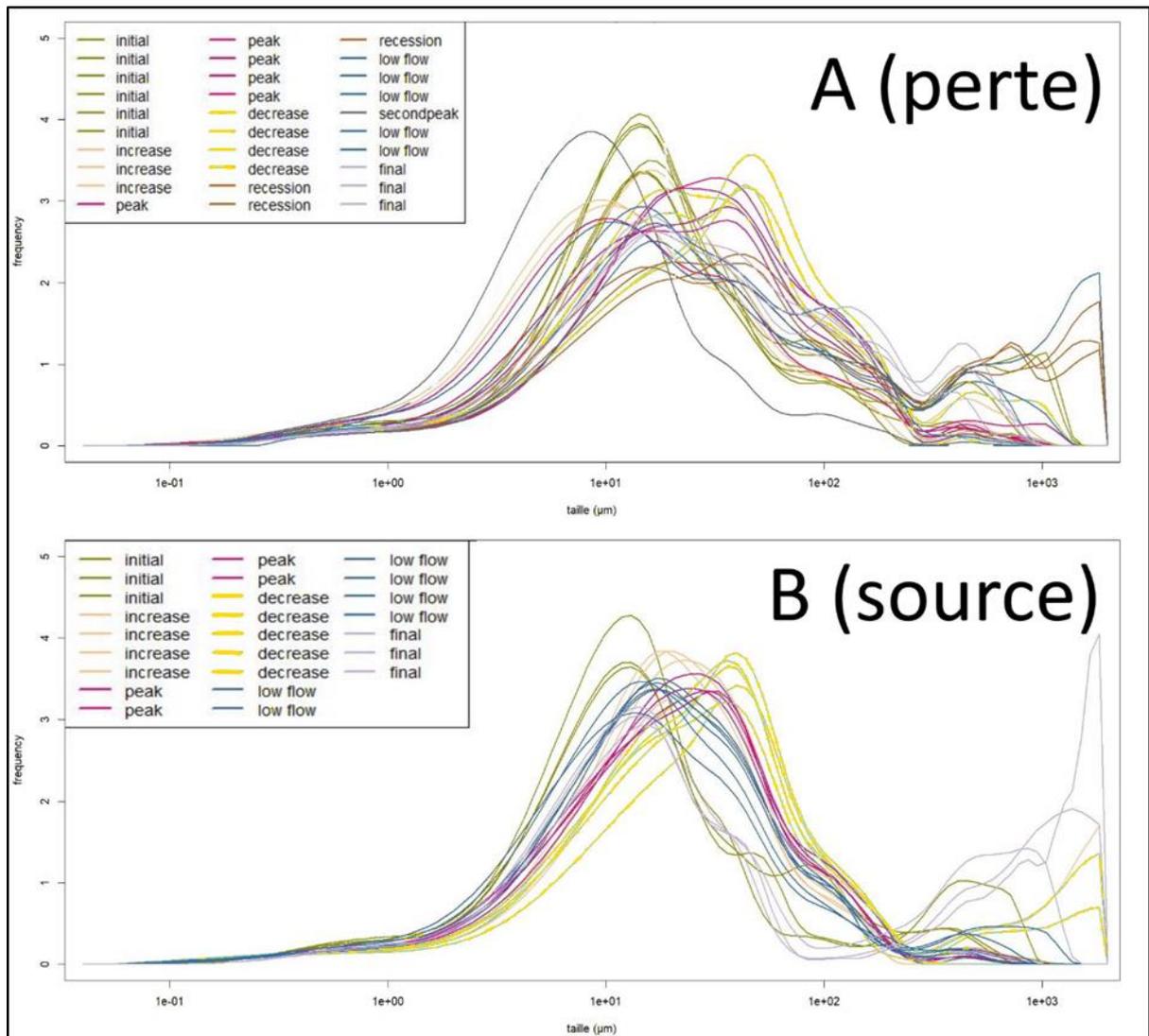


Figure 126: distributions granulométriques des particules des échantillons prélevés A : à la perte du Bébec mesurées au granulomètre laser ; B : à la source du Hannetot mesurées au granulomètre laser

Afin de compléter l'analyse des courbes granulométriques, des ACP ont été réalisées pour la perte et la source sur les statistiques des distributions granulométriques calculées avec Gradistat (Blott and Pye, 2001).

Pour la perte, les dimensions 1 et 2 de l'ACP représente 79% de la variabilité totale (Figure 127). L'axe 1 est corrélé avec la vase (Mud), les rapports  $\frac{D75}{D25}$ , les sables moyens et grossiers (Medium et Coarse Sand) ou D10. Sur l'axe 2 on retrouve les sables fins (Fine Sand), les silts grossier (Coarse Silts) ou la Skewness.

On observe sur les échantillons une séparation notable entre les échantillons des différents régimes. Cette séparation semble se faire suivant une combinaison des dimensions 1 et 2. Les paramètres correspondants sont notamment la Skewness, les sables moyens et les rapports  $\frac{D75}{D25}$ .

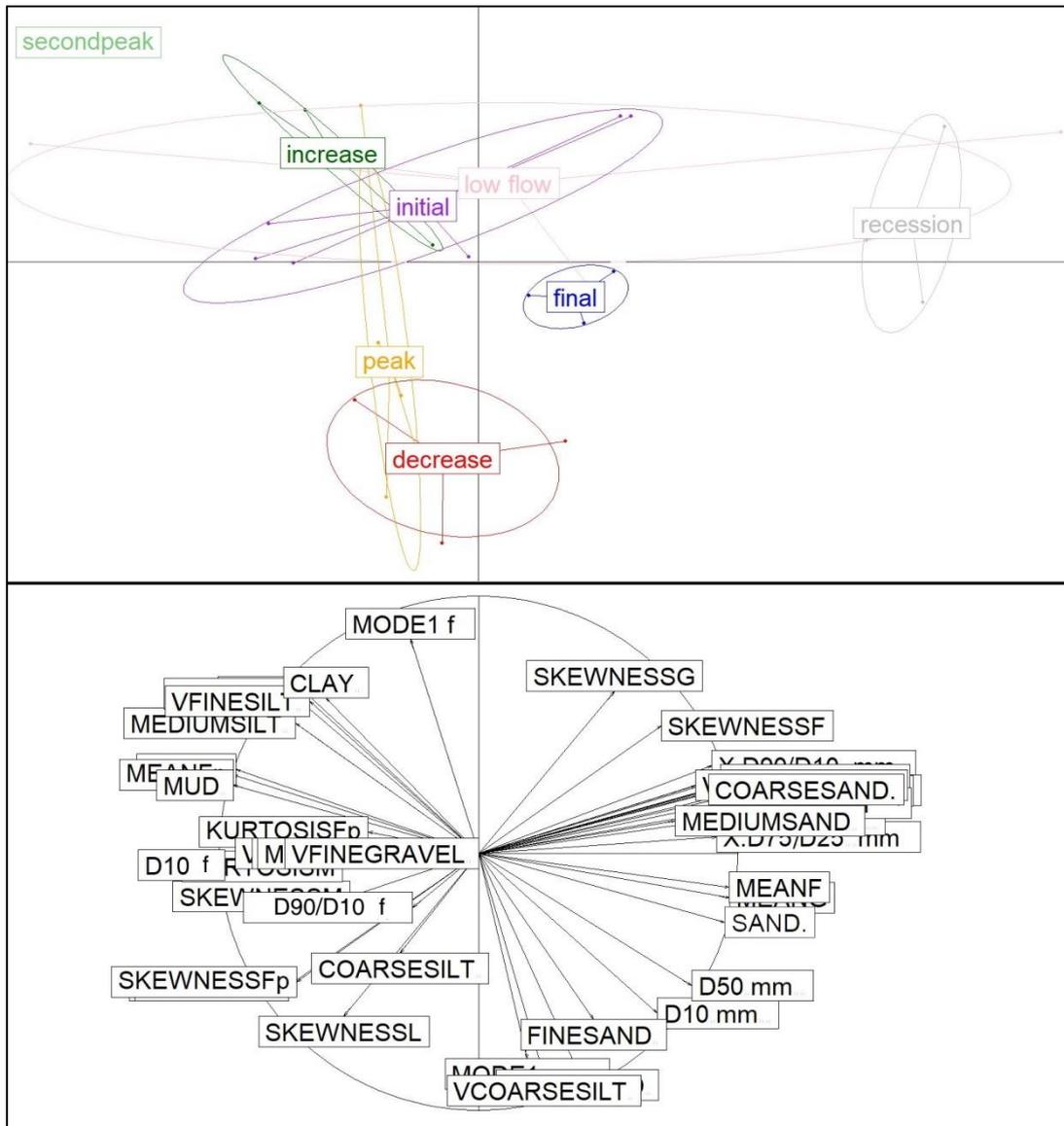


Figure 127: Représentation graphique de l'ACP sur les variables statistiques des distributions granulométriques de la perte du Bébec obtenues par granulométrie laser avec les différents régimes en facteur, dimension 1 et 2 (respectivement 59% et 20% de la variabilité)

En traçant la Skewness et la turbidité en fonction du temps (Figure 128) on retrouve les observations faites avec cette ACP, la Skewness diminue pendant la crue et ne remonte qu'après la décrue.

Ces échantillons semblent donc avoir une distribution plus asymétrique (skewed, s'éloignant de 0, valeur indiquant la symétrie de la distribution), potentiellement due à l'arrivée de particules d'origine très hétérogènes ayant subi un transport minime.

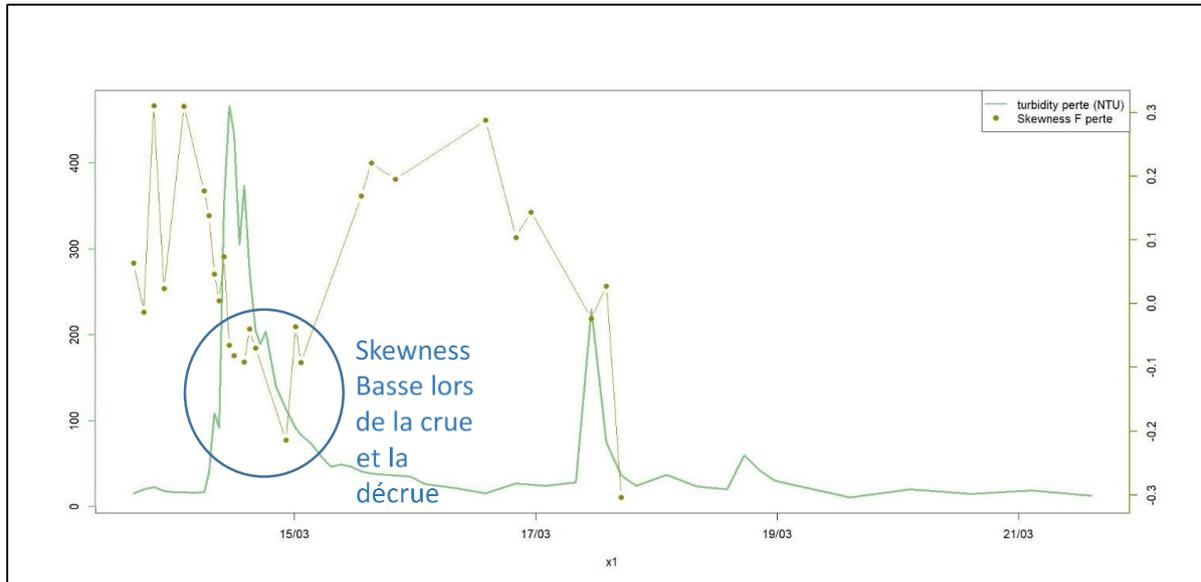


Figure 128: skewness et turbidité à la perte en fonction de la date

Pour l'ACP de la source (Figure 129), les axes 1 et 2 représentent 80% de la variabilité. L'axe 1 est corrélé de nombreux paramètres comme la vase (Mud), les rapports  $\frac{D75}{D25}$  et  $\frac{D90}{D10}$ , les sables et silts grossiers (Coarse Sand et silt) ou D10. L'axe 2 est plutôt associé avec, entre autres, les sables fins (Fine Sand) l'argile (Clay), la médiane (D50) ou la Skewness. Les différences sont plus tranchées que pour la perte, avec à nouveau une combinaison des dimensions 1 et 2, sur les paramètres D50, Fine Sand, Clay, etc. La Figure 130 illustre bien ce qui est observé sur cette ACP, avec une augmentation de la médiane (D50) lors de la montée du pic et de la décrue, puis un retour aux valeurs initiales sur les derniers échantillons.

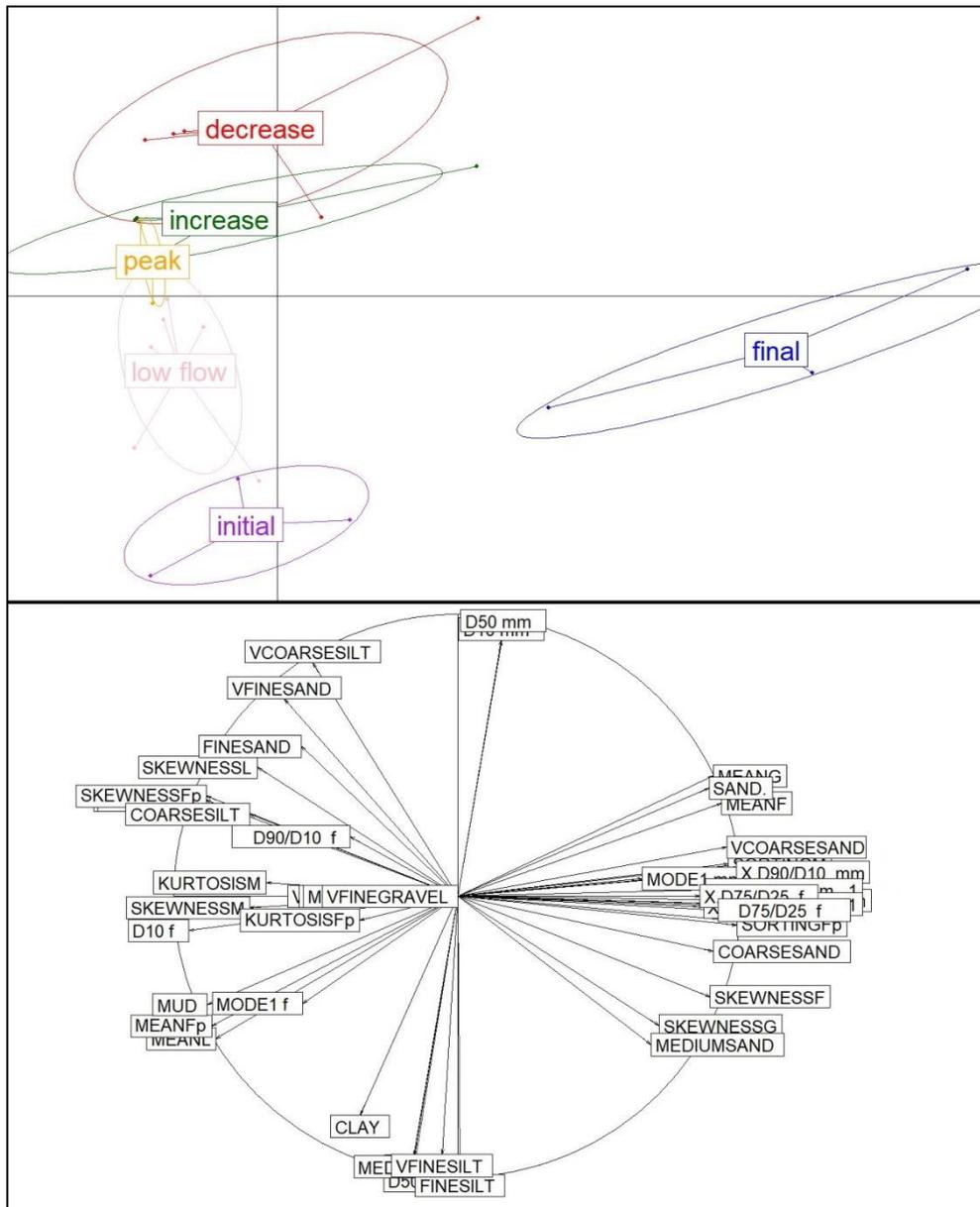


Figure 129: Représentation graphique de l'ACP sur les statistiques des distributions granulométriques de la source du Hannebot obtenues par granulométrie laser avec les différents régimes en facteur, dimension 1 et 2 (58% et 22% de la variabilité)

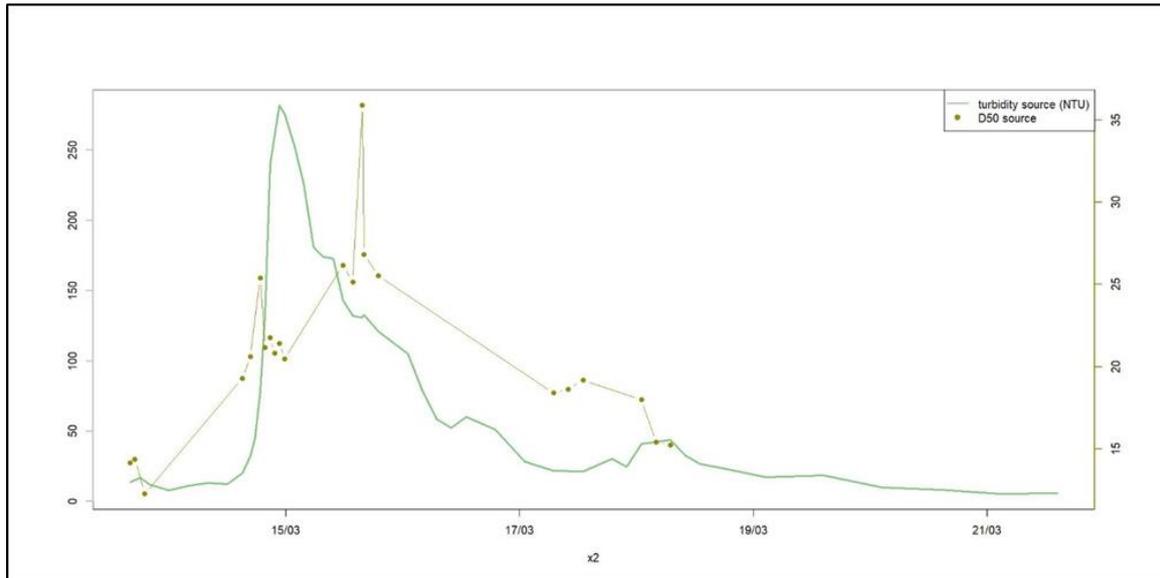


Figure 130 : D50 et turbidité à la source en fonction de la date

**c) Réponse morphogranulométrique à la crue : variation des apports des sources sédimentaires**

En ce qui concerne la morphogranulométrie, l'ACP sur les échantillons de la perte du Bébec est illustrée en Figure 131. Elle montre 80% de la variabilité sur les 2 premiers axes. Les paramètres de forme (Bluntness, Straightness, Roughness, etc) sont tous fortement corrélés sur l'axe 1. Sur l'axe 2 on retrouve les paramètres de taille (Area Diameter, Width). Pour les échantillons, la variation entre groupe se voit principalement sur l'axe 1 : le second pic (Secondpeak) et une partie de la montée (Increase) ont des valeurs très négative sur cet axe, alors que tous les autres échantillons sont positifs ou proches de la valeur nulle. Ces deux périodes sont donc caractérisées par des particules de formes plus allongées et plus irrégulières que les autres. La taille (Area Diameter et Width, sur l'axe 2) discrimine peu les différents groupes.

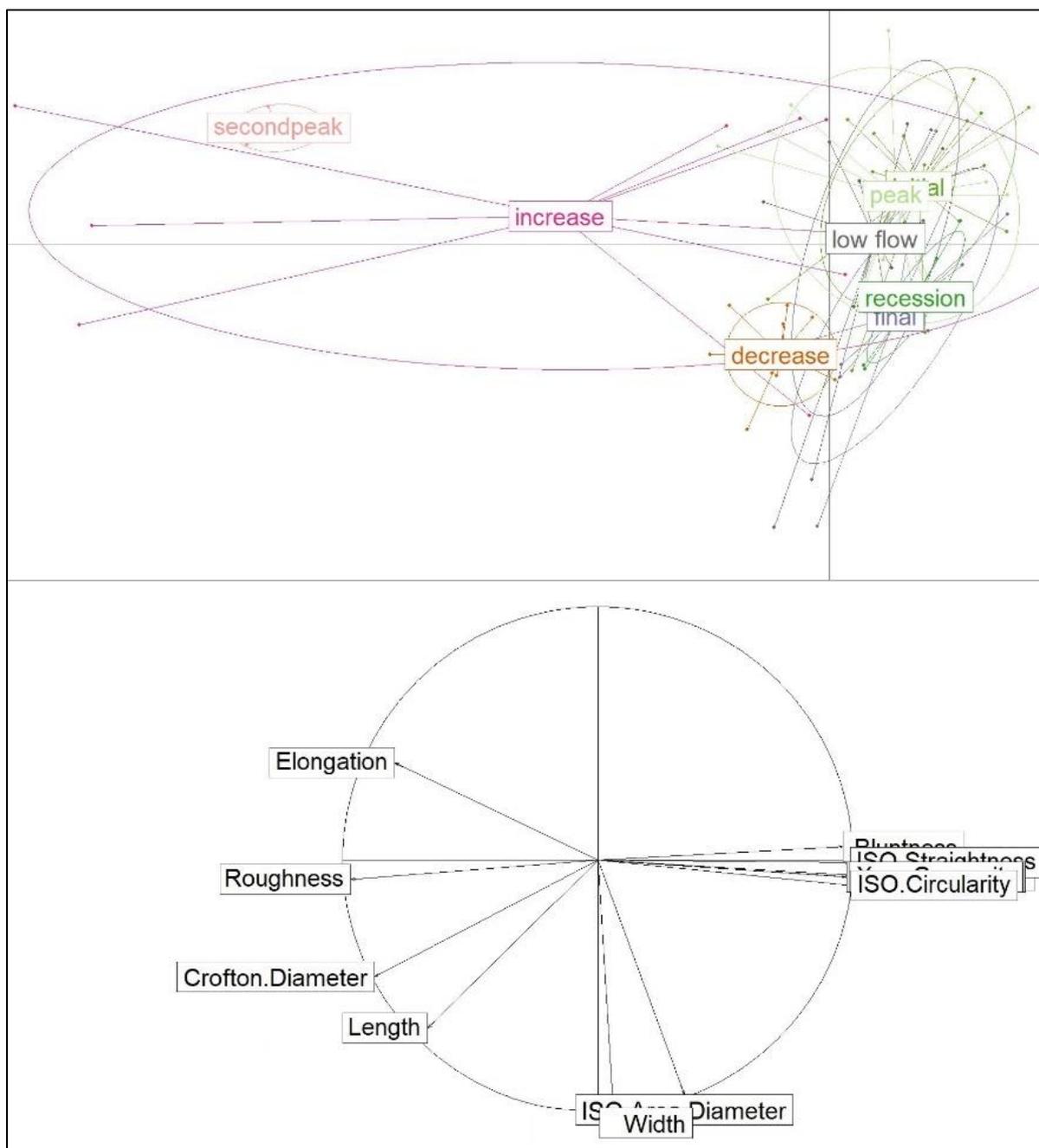


Figure 131 : Représentation graphique de l'ACP sur les résultats morphogranulométriques des échantillons de la perte du Bébec avec les différents régimes en facteur, dimensions 1 et 2 (respectivement 59 et 19% de la variance)

L'ACP sur les échantillons de la source du Hannebot montre également 78% de variabilité sur les axes 1 et 2 (Figure 132). L'axe 1 est principalement corrélé avec les paramètres de forme (Bluntness, Straightness, Roughness, etc) et l'axe 2 avec la taille (Area Diameter, Crofton Diameter, Length, Width). Les différentes ellipses des groupes d'échantillons se chevauchent, notamment celles des pics (peak et Secondpeak) et la phase initiale, qui elle est séparée de la phase finale (low flow). Les séparations entre les phases sont donc moins marquées, mais on note tout de même une tendance sur l'axe 2 à retrouver les échantillons initiaux et finaux avec des valeurs plutôt positives (particules plus grossières) alors que les échantillons de montée (increase) et décréue (decrease) sont plutôt négatifs (tailles plus petites). Le pic (peak) et la récession (low flow) sont nuls (tailles intermédiaires).

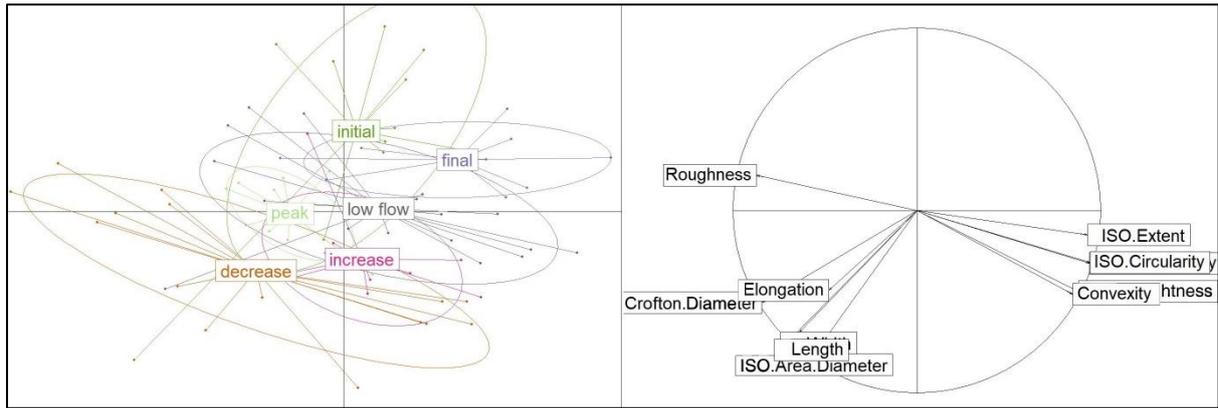


Figure 132 : Représentation graphique de l'ACP sur les résultats morphogranulométriques des échantillons de la source du Hannebot avec les différents régimes en facteur, dimensions 1 et 2 (respectivement 58 et 22% de la variance)

Si l'on associe la dimension 3 (Figure 133, 10% de la variabilité), on observe que l'élongation est fortement corrélée avec cet axe. En combinant cet axe avec la dimension 2 (paramètres de taille), un lien entre les variations hydrodynamiques et les paramètres observés se distingue également. La phase initiale démarre sur des valeurs positives sur l'axe 2 et positive voire nulle sur l'axe 3. Dès la montée (increase) on observe l'inverse, négatifs sur les axes 2 et 3. Lors du pic (peak), les valeurs sur l'axe 2 deviennent nulle mais reste négative sur l'axe 3. Lors de la récession (decrease), les valeurs redeviennent négatives sur l'axe 2 et deviennent nulle sur l'axe 3. Enfin, le second pic (Secondpeak) et l'état final redeviennent proches de l'état initiale, avec des valeurs nulles voir positives sur les 2 axes.

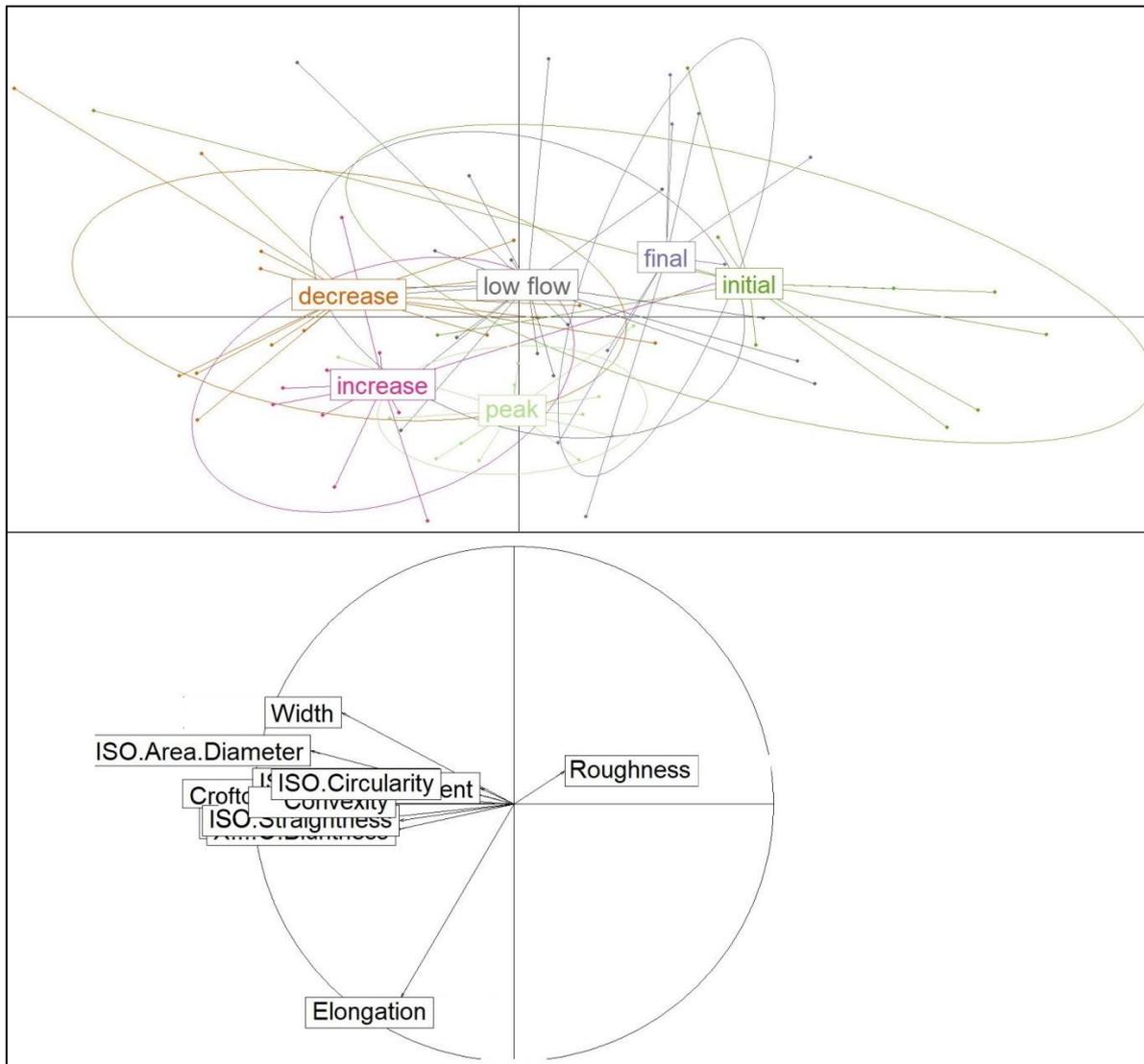


Figure 133 : Représentation graphique de l'ACP sur les résultats morphogranulométriques des échantillons de la source du Hannetot avec les différents régimes en facteur, dimensions 2 et 3 (respectivement 22 et 10% de la variance)

Ces liens entre élongation et variations hydrodynamiques s'observent mieux sur la Figure 134. On y observe à nouveau, pour la perte (en vert), des valeurs fortes d'élongation (supérieure à 0.32) lors de la montée et du second pic qui se détachent clairement du fond (de 0.27 à 0.30). Pour la source, les variations sont plus faibles (de 0.27 à 0.29). On observe toutefois des valeurs clairement plus élevées lors de la crue et de la récession (supérieures à 0.28) que lors des phases initiale et finale (inférieures à 0.28).

On constate donc l'apparition de particules plus allongées durant différentes phases de la crue à la perte comme à la source. A la perte, cette augmentation se retrouve uniquement lors de la montée et sur tous les paramètres de forme, les particules sont donc globalement irrégulières. A la source, l'augmentation n'est clairement visible que sur l'élongation, elle s'observe sur quasiment toute la durée de la crue (montée, pic et récession). On peut également constater qu'au début de la récession les deux premiers échantillons montre des valeurs d'élongation plutôt basses, puis l'élongation remonte sur les 3 échantillons suivants. Ceci pourrait être lié à l'arrivée de particules intra-karstiques remises en suspension par la crue. Ces phases de resuspension ont déjà été identifiées lors d'études précédentes (Duran, 2015; Fournier, 2006; Massei, 2001).

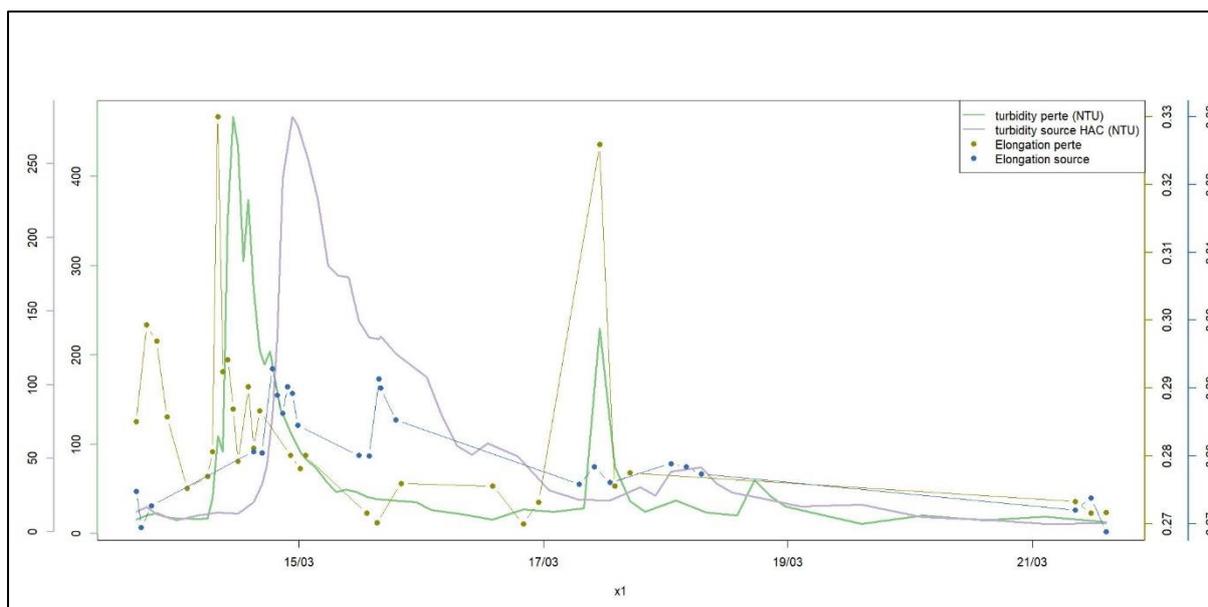


Figure 134 : Elongation et turbidité à la perte du Bébec et à la source du Hannetot en fonction de la date

En remplaçant les échantillons dans le modèle de prédiction de l'AFD des sources sédimentaires, on obtient les résultats observés sur les Tableau 30 et Tableau 31.

Tableau 30 : tableau des pourcentages de contribution des sources pour la crue de mars 2019 à la perte

echantillon	chalkSoil	colluvionslimon	colluvionsmixte	limon	mudbec	Silts	facteur
Ncrue_J1P01	14.0%	10.8%	26.3%	12.3%	28.3%	8.4%	initial
Ncrue_J1P03	17.8%	12.0%	21.9%	13.5%	27.8%	6.9%	initial
Ncrue_J1P05	18.1%	10.9%	24.3%	12.7%	27.9%	6.2%	initial
Ncrue_J1P07	11.7%	12.7%	29.2%	11.8%	25.6%	8.9%	initial
Ncrue_J1P11	12.4%	11.2%	29.4%	11.9%	27.8%	7.3%	initial
Ncrue_J1P15	11.5%	10.5%	29.9%	11.1%	30.1%	6.9%	initial
Ncrue_J1P16	10.9%	11.9%	27.1%	12.4%	27.5%	10.3%	increase
Ncrue_J1P17	6.6%	33.5%	16.3%	14.8%	8.7%	20.1%	increase
Ncrue_J1P18	11.5%	15.3%	26.1%	12.0%	21.4%	13.7%	increase
Ncrue_J1P19	11.9%	16.1%	25.4%	12.5%	21.3%	13.0%	peak
Ncrue_J1P20	12.4%	13.0%	28.3%	12.0%	25.2%	9.2%	peak
Ncrue_J1P21	12.3%	11.3%	30.0%	10.2%	26.8%	9.4%	peak
Ncrue_J1P23	11.3%	12.1%	28.4%	11.2%	26.1%	10.8%	peak
Ncrue_J1P24	10.9%	10.7%	29.3%	10.4%	28.7%	9.9%	peak
Ncrue_J2P01	10.4%	13.3%	25.2%	12.6%	25.8%	12.8%	decrease
Ncrue_J2P07	10.7%	12.0%	25.6%	11.0%	28.2%	12.5%	decrease
Ncrue_J2P09	10.6%	12.2%	25.2%	11.5%	28.6%	11.8%	decrease
Ncrue_J2P10	11.1%	11.7%	25.2%	10.9%	29.8%	11.4%	decrease
Ncrue_J2P22	11.4%	10.3%	26.8%	9.8%	30.7%	11.0%	recession
Ncrue_J2P24	11.4%	10.4%	26.4%	11.1%	30.0%	10.6%	recession
Ncrue_J3P02	11.4%	10.8%	27.4%	10.1%	30.5%	9.7%	recession
Ncrue_J3P08	10.5%	11.2%	27.2%	11.9%	27.6%	11.5%	low flow
Ncrue_J3P10	10.1%	11.0%	27.9%	11.1%	29.0%	10.8%	low flow
Ncrue_J3P11	11.8%	11.7%	27.2%	12.6%	27.6%	9.1%	low flow
Ncrue_J3P15	8.5%	30.8%	18.8%	15.0%	9.9%	17.0%	secondpeak
Ncrue_J3P16	12.1%	13.2%	26.4%	12.2%	24.0%	12.1%	low flow
Ncrue_J3P17	12.2%	11.9%	28.1%	11.7%	25.7%	10.4%	low flow
Ncrue_J4P22	11.5%	10.5%	26.8%	11.5%	30.0%	9.6%	final
Ncrue_J4P23	13.4%	10.7%	26.2%	13.3%	27.3%	9.2%	final
Ncrue_J4P24	10.6%	9.7%	27.6%	11.2%	30.9%	10.0%	final

Tableau 31 : tableau des pourcentages de contribution des sources pour la crue de mars 2019 à la source

echantillon	alteredchalk	ArgileSilex	chalk	chalkSoil	colluvionslimon	colluvionsmixte	karstFilling	limon	mudbebec	mudsourc	Silts	facteur
Ncrue_J1S01	0.9%	8.1%	5.6%	6.2%	15.2%	12.1%	2.2%	7.8%	18.8%	11.5%	11.6%	initial
Ncrue_J1S03	1.1%	9.0%	5.9%	5.8%	13.8%	13.6%	2.7%	7.1%	15.8%	12.0%	13.2%	initial
Ncrue_J1S05	0.9%	9.0%	6.0%	5.7%	14.0%	11.9%	2.6%	7.5%	16.3%	11.3%	14.8%	initial
Ncrue_J1S24	3.2%	9.2%	6.2%	5.6%	15.4%	11.6%	2.2%	9.4%	13.3%	11.0%	12.9%	initial
Ncrue_J2S01	2.7%	6.5%	8.2%	6.3%	18.9%	11.4%	2.1%	9.1%	16.1%	9.7%	9.1%	increase
Ncrue_J2S03	2.6%	7.8%	9.2%	6.0%	16.9%	11.0%	1.8%	9.8%	15.4%	10.3%	9.2%	increase
Ncrue_J2S04	3.3%	7.0%	8.7%	6.2%	18.4%	10.1%	1.7%	9.5%	15.5%	10.0%	9.5%	increase
Ncrue_J2S05	3.6%	7.7%	7.4%	5.8%	17.7%	10.7%	2.0%	9.1%	14.5%	10.7%	11.0%	peak
Ncrue_J2S06	2.9%	8.1%	8.4%	5.4%	17.0%	10.2%	1.9%	8.8%	15.3%	11.5%	10.7%	peak
Ncrue_J2S07	2.9%	7.7%	8.7%	5.4%	16.8%	10.1%	2.0%	8.9%	14.9%	10.8%	12.0%	peak
Ncrue_J2S08	2.6%	8.3%	8.0%	5.6%	16.7%	11.3%	2.0%	8.2%	15.7%	10.4%	11.1%	peak
Ncrue_J2S20	4.4%	7.1%	7.5%	5.9%	19.7%	10.6%	1.9%	9.4%	14.4%	9.6%	9.4%	decrease
Ncrue_J2S22	4.5%	7.6%	7.3%	6.2%	19.5%	11.6%	1.8%	9.0%	13.9%	9.3%	9.3%	decrease
Ncrue_J2S24	4.9%	8.0%	8.8%	5.1%	17.5%	9.6%	1.6%	9.6%	13.5%	10.7%	10.7%	decrease
Ncrue_J3S01	3.5%	8.9%	8.3%	4.9%	14.3%	9.5%	1.8%	9.0%	14.1%	11.4%	14.4%	decrease
Ncrue_J3S02	3.7%	8.3%	8.3%	4.9%	15.5%	9.6%	1.8%	8.5%	14.1%	11.5%	13.8%	decrease
Ncrue_J3S14	2.9%	6.5%	8.1%	6.2%	19.6%	10.4%	2.1%	7.6%	15.3%	10.1%	11.2%	low flow
Ncrue_J3S15	2.6%	5.7%	8.7%	6.7%	21.1%	10.1%	2.3%	8.1%	14.8%	10.1%	9.7%	low flow
Ncrue_J3S16	3.2%	7.2%	8.1%	5.7%	16.5%	12.3%	2.2%	8.5%	15.1%	10.4%	10.8%	low flow
Ncrue_J3S20	3.1%	8.4%	7.0%	6.1%	16.5%	11.0%	1.9%	9.7%	15.6%	10.2%	10.6%	low flow
Ncrue_J3S21	2.1%	8.6%	7.7%	5.5%	15.3%	11.2%	1.8%	7.9%	16.3%	11.1%	12.6%	low flow
Ncrue_J3S22	2.4%	8.8%	8.1%	5.7%	14.9%	11.4%	2.3%	8.8%	16.5%	10.3%	10.9%	low flow
Ncrue_J4S22	2.5%	8.0%	6.4%	6.2%	15.3%	10.1%	3.0%	8.5%	14.8%	12.6%	12.4%	final
Ncrue_J4S23	3.2%	7.7%	7.9%	6.5%	16.0%	11.3%	2.1%	6.5%	18.0%	9.8%	11.1%	final
Ncrue_J4S24	2.7%	5.7%	7.9%	7.9%	17.8%	11.9%	2.6%	7.2%	16.0%	10.2%	10.2%	final

Si l'on met les contributions des Tableau 30 et Tableau 31 en perspective par une analyse en coïncidence (Figure 135, la procédure est la même qu'en Figure 97), il est possible de les comparer. On observe 24% de covariance commune entre les deux ACP ( $RV = 0.24$ ). Sur la projection dans le plan du compromis de la coïncidence des axes des ACP (graphique en haut à gauche) on observe que l'axe 1 de l'ACP de la perte est corrélé positivement avec l'axe 1 du compromis et négativement avec l'axe 2 du compromis. L'axe 2 de l'ACP de la perte est corrélé positivement sur les axes 1 et 2 du compromis tandis que l'axe 3 est très peu corrélé avec les deux axes principaux du compromis. L'axe 1 de l'ACP de la source est anticorrélé avec l'axe 1 du compromis, tandis que l'axe 3 de l'ACP est fortement corrélé avec l'axe 2 du compromis. Enfin, l'axe 2 de l'ACP de la source est peu corrélé avec les deux axes principaux du compromis.

Sur la projection des variables dans le plan du compromis (en bas à droite de la Figure 135), Pour la perte (X canonical weights, sur la droite), les sources sédimentaires corrélées avec l'axe 1 sont la craie (positif) et les silts (négatifs). Sur l'axe 2, on retrouve la vase du Bébec et les colluvions mixtes négatifs et les limons et colluvions de limons positifs. Pour la source, les sources sont corrélées avec une combinaison des deux axes : axe 1 positif et axe 2 négatif pour les silts, la vase de la source et le remplissage karstique ; positifs sur les deux axes pour la vase du Bébec, les colluvions mixtes et l'argile à silex, négatifs pour les deux avec la craie, la craie altérée et les colluvions de limons ; et enfin les limons se retrouvent négatifs sur l'axe 2 et positifs sur l'axe 1.

Sur la projection dans l'espace des individus, on observe une succession temporelle liée au passage de la crue marquant un processus de perturbation-restauration avec les individus de début et fin de crue positifs sur l'axe 1 alors que les autres échantillons sont plus ou moins décalés vers la partie négative. De plus, la plupart des flèches sont centrifuges, ce qui montre une plus grande variabilité des réponses à la perte, en accord avec les résultats sur les prélèvements ponctuels mensuels qui montraient également une plus forte constance des restitutions à la source. Ici avec cette crue, on observe les effets du forçage météorologique sur la réponse du karst qui permet un remplacement des cortèges sédimentaires de faible hydraulicité entre la perte (limon+vase+colluvion+craie) et la source (vase+silt+colluvions mixtes+argile à silex) par ceux de forte hydraulicité caractérisés par des silts et colluvions-limons à la perte et par des limons+craies-craie altérée+colluvions-limons à la source. On observe donc lors de cette crue à un déstockage limoneux et crayeux et un stockage

d'argile et silt qui seront par la suite remobilisés lors des phases d'étiage (comme vu avec les échantillons ponctuels mensuels).

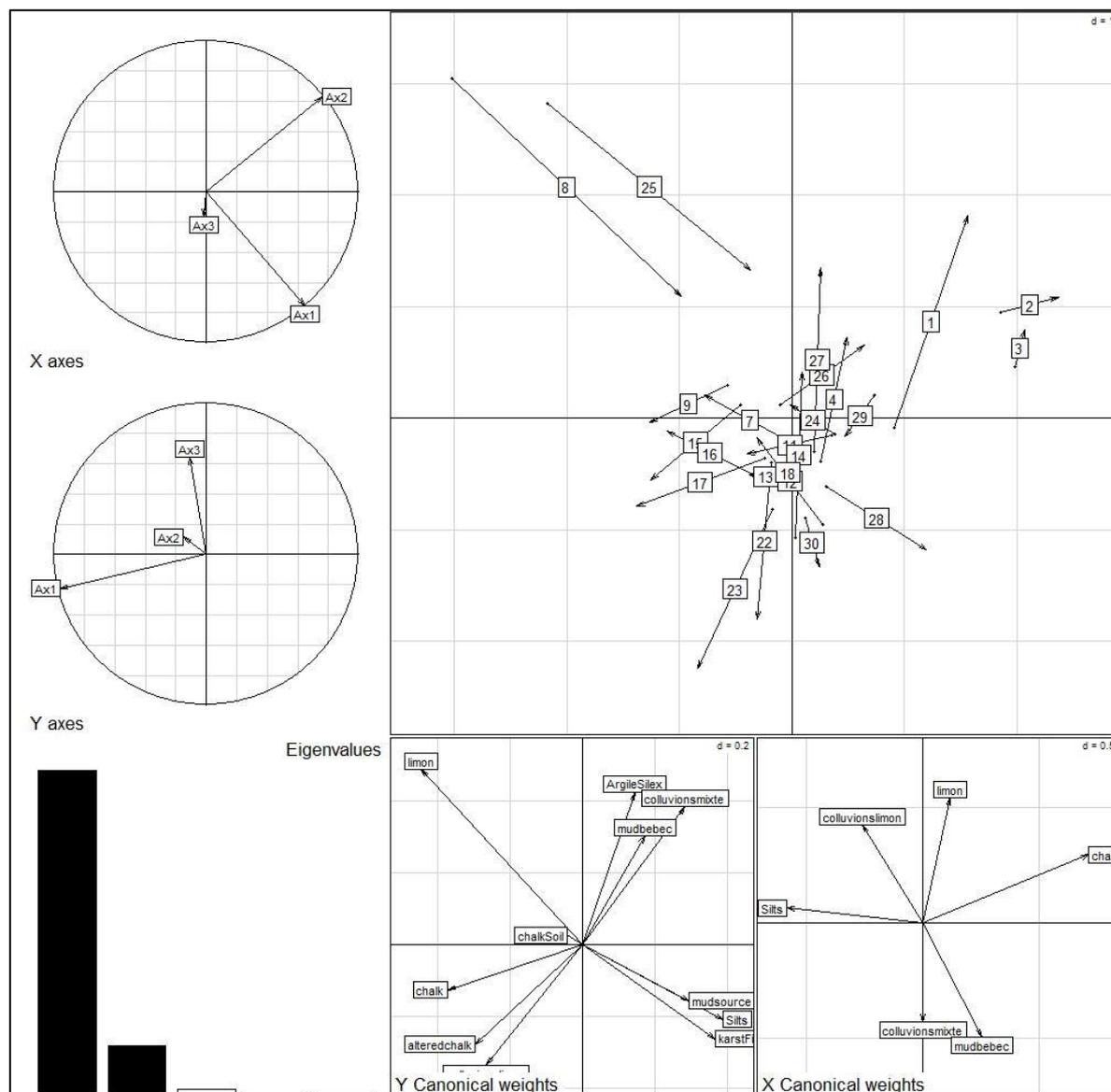


Figure 135 : synthèse graphique de l'analyse en coïncidence de l'ACP sur le modèle de l'AFD des prédictions pour la perte (Tableau 30) en X et de l'ACP sur le modèle de l'AFD des prédictions pour la source (Tableau 31) en Y ; En haut à gauche la transformation des axes 1 à 3 des ACP X et Y sur le plan des axes 1 et 2 du compromis ; en haut à droite le trajet perte->source pour chacun des 24 échantillons ; en bas à gauche le pourcentage de variabilité expliquée par le plan du compromis ; et en bas à droite le cercle de corrélations des variables X et Y dans le plan du compromis (axes 1-2)  $RV=0.24$ .

Afin de vérifier les résultats de ce modèle, des observations au Microscope Electronique à Balayage (MEB) pour reconnaître la nature des particules présentes dans les différents échantillons ont été faites.

*d) Vérification du modèle par observations au Microscope Electronique à Balayage (MEB)*

Huit échantillons (Tableau 32) ont été sélectionnés en fonction des résultats de turbidité et d'élongation et filtrés pour réaliser des observations au MEB. Quatre échantillons pour chaque site,

un échantillon « initial » avant la crue, un échantillon « montée », pendant le début du pic de turbidité et le premier pic d'élongation, un échantillon « pic », à l'aplomb du pic de turbidité et un échantillon « final » correspondant au retour aux valeurs de turbidité et élongation initial.

Tableau 32 : Date des échantillons observés au MEB

	date perte	date source
initial	13/03/2019 16:00	13/03/2019 18:00
montée	14/03/2019 08:00	14/03/2019 18:42
pic	14/03/2019 11:00	14/03/2019 23:42
final	16/03/2019 14:00	21/03/2019 14:30

Les Tableau 33 et Tableau 34 résument les observations effectuées pour la perte du Bébec et la source du Hannebot respectivement. Une observation microscope ne permettant pas une quantification précise et posant des problèmes de représentativité, les termes qualifiant les nombres de particules restent volontairement qualitatifs.

Tableau 33 : Résumé des observations sur les échantillons de la perte

PERTE	INITIAL	MONTEE	PIC	FINAL
BIOLOGIQUE (voiles - débris - diatomées - autres algues)	++	+	-	++
MINERAL (quartz - calcite - coccolite)	-	+	++	-
PARTICULES PEDOLOGIQUES (agrégats pédologiques - floccs - radiceles)	+	++	-	+

Tableau 34 : Résumé des observations sur les échantillons de la source

SOURCE	INITIAL	MONTEE	PIC	FINAL
BIOLOGIQUE	-	-	--	-
MINERAL	+	+	++	-
PARTICULES PEDOLOGIQUES	+	++	-	+

On retrouve pour la perte les mêmes observations lors des échantillons finaux et initiaux : de nombreuses algues et autres organismes biologiques ainsi que pas mal d'agrégats organo-pédologiques et de radiceles, observations communes pour les cours d'eau de la région (Dupont and Lafite, 1986; Dussart et al., 2001; Lepillier, 1975). On observe lors de la montée une nette dominance des particules pédologiques, en particulier des agrégats et des débris. Par effet de dilution, la quantité de particules biologiques semble diminuer alors que plusieurs grains de quartz et de calcite sont observés (Figure 136). Lors du pic, on retrouve beaucoup moins de particules biologiques et pédologiques, les grains de quartz et calcite dominant. Enfin pour l'état final, on retourne à des observations similaires à l'état initial.

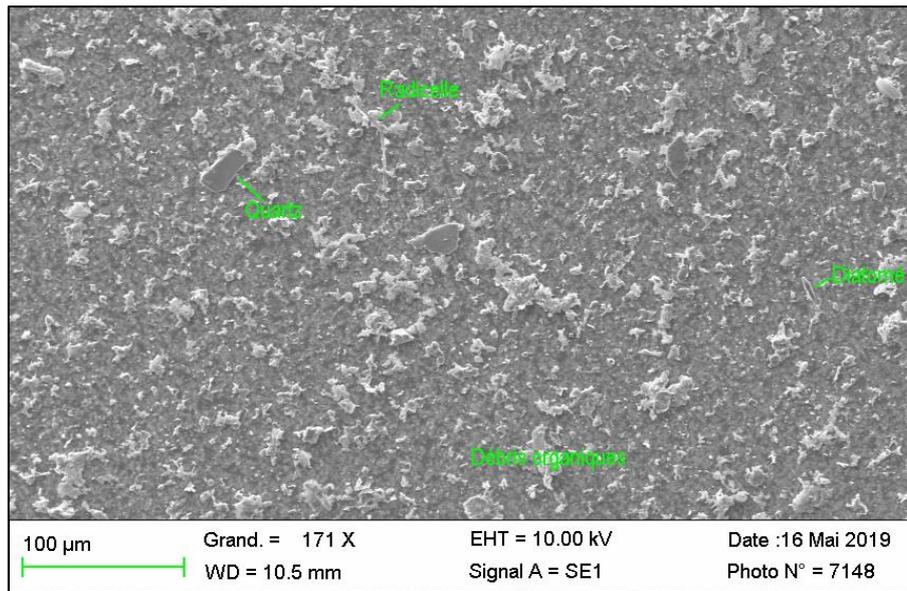


Figure 136 : photographie MEB de l'échantillon J1P17 (montée de la crue à la perte) montrant la fraction minérale (grains de quartz), la fraction pédologique (radicelle et débris/agrégats pédologiques) et la fraction biologique (diatomée). On observe clairement la grande dominance des débris organo-pédologiques

Pour la source on retrouve également un état initial proche de l'état final, peu de particules en général, avec principalement des agrégats composites et des particules minérales (Figure 137). Lors de la montée, on observe une augmentation du nombre d'agrégats et de grains de quartz et de calcite. On constate lors du pic une diminution franche des particules pédologiques et principalement des particules minérales, quartz et calcite. Pour l'état final, retour à l'état initial.

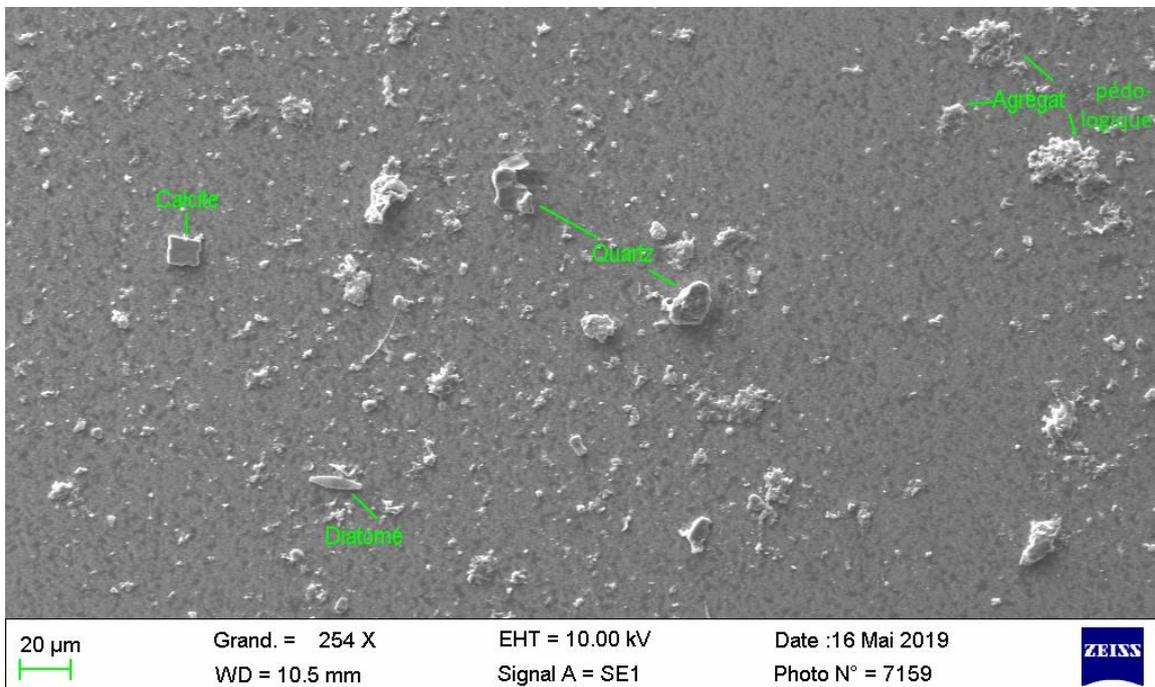


Figure 137 : photographie MEB de l'échantillon J1S03 (phase initiale à la source) montrant la fraction minérale (grains de quartz et calcite), la fraction pédologique (agrégats pédologiques) et la fraction biologique (diatomée). On observe que le filtre est, de manière générale, beaucoup moins chargé en particules par rapport à la perte.

On constate donc bien un lien entre hydrodynamisme et nature particulière : les proportions de chaque groupe de particules varient en fonction du régime hydrologique.

### e) Synthèse

Le Tableau 35 résume toutes les observations faites dans les chapitres précédents (granulométrie, morphogranulométrie et MEB).

- On constate à la perte, pour les différentes méthodes :
  - Des régimes initial et final proches : l'asymétrie (skewness) des distributions granulométriques est positive ; la forme est régulière, peu allongée, similaire aux échantillons de vase prélevés en amont dans la rivière du Bébec ; et enfin on observe au microscope de nombreuses particules biologiques (algues) et pédologiques (agrégats et racines) typiques d'un cours d'eau.
  - Lors de la montée de la crue, on observe une asymétrie plutôt négative sur les tailles mais également une très forte valeur dans la plupart des paramètres de forme, y compris l'élongation, indiquant l'arrivée de particules plus irrégulières (ce phénomène se répète sur le second pic) attribuées aux limons et colluvions ; alors qu'au microscope on observe une diminution de la quantité de particules biologiques et une augmentation dans les agrégats pédologiques.
  - Lors du pic de turbidité, on constate que les distributions granulométriques sont très asymétriques, avec une valeur négative ; les paramètres morphogranulométriques retrouvent des valeurs basses, proche de celles de la vase du Bébec, alors qu'au MEB on voit une grosse diminution du nombre de particules pédologiques au profit des particules plus minérales.
- A la source les méthodes utilisées permettent de voir :
  - Egalement des phases initial et final aux signatures identiques : les distributions montrent un taille médiane basse ; l'élongation est également très basse (formes régulières) et on observe peu de particules au MEB, d'origine mélangée, principalement minérale et pédologique.
  - Lors de la montée de la turbidité, la taille médiane reste basse mais la valeur d'élongation augmente (formes plus allongées) et on observe une plus grande proportion de particules pédologiques au MEB.
  - Lors du pic de turbidité, la taille augmente, l'élongation reste élevée (formes allongées) et on voit au MEB une majorité de particules minérales.

Tableau 35 : Synthèse des observations sur les sédiments pendant la crue

PERTE	INITIAL	MONTEE	PIC	FINAL
GRANULOMÈTRE LASER	Skewness positive	Skewness négative	Skewness très négative	Skewness positive
PARAMETRES DE FORME	valeur moyenne (arrondi)	valeur très élevée (forme irrégulière)	valeur basse (arrondi)	valeur basse (arrondi)
SIGNATURE SOURCE PRINCIPALE	Vase du Bébec	Limons/colluvions	Vase du Bébec	Vase du Bébec
MEB	Pédo-biologique	Pédologique	Minéral	Pédo-biologique
SOURCE	INITIAL	MONTEE	PIC	FINAL
GRANULOMÈTRE LASER	D50 bas	D50 bas	D50 élevé	D50 bas
ELONGATION	Elongation basse	Elongation élevée (allongé)	Elongation élevée (allongé)	Elongation basse
SIGNATURE SOURCE PRINCIPALE	Vase du Bébec	Craie altérée et limons	Craie altérée	Vase du Bébec
MEB	Particules en faible quantité, origine mixte	Pédologique et minéral	Minéral	Particules en faible quantité, origine mixte

Avec ces combinaisons d'observations, on peut interpréter les sources et les phénomènes contrôlant les variations dans le transfert particulaire observé lors de cette crue (Figure 138) :

- A la perte, les phases initiales correspondent aux phases finales. La signature montre une plus grande fraction de particules de forme régulières arrondies, correspondant à la vase de fond du Bébec et l'observation d'un grand nombre de particules biologiques au microscope. Cette signature varie dès le début de la crue vers une signature proche des limons et des colluvions, la forme est plus irrégulière et on observe plus d'agrégats pédologiques. Ce changement de signature pourrait être interprété comme la conséquence d'une forte érosion, caractéristique d'un début de crue. Lors de l'arrivée du pic de turbidité, on observe principalement un phénomène de dilution des particules biologiques et pédologiques, ce qui permet de voir principalement les particules minérales. Puis fin de la crue et retour aux observations initiale sur les échantillons finaux.
- A la source, on observe très peu de particules en suspension lors de la phase initiale, principalement des particules de forme régulière associée à la vase du Bébec. Lors du début de la crue, la turbidité monte et on observe également des particules plus allongées, associées notamment à la craie altérée probablement issue de l'érosion de la craie dans le réseau karstique mais elles peuvent également être associées aux limons, provenant de l'érosion du bassin versant. L'observation MEB permet de trancher sur un probable mélange des deux. Lors du pic de turbidité, contrairement à la perte, l'élongation reste élevée, la forme reste allongée, par contre on observe moins de particules pédologiques au microscope, les observations sont principalement minérales. On peut donc conclure que leur origine est différente de la perte, et provient probablement de la resuspension intra-karstique. Enfin, les échantillons après la crue (finaux) sont peu concentrés avec une forme proche de la vase du Bébec, comme pour les échantillons initiaux.

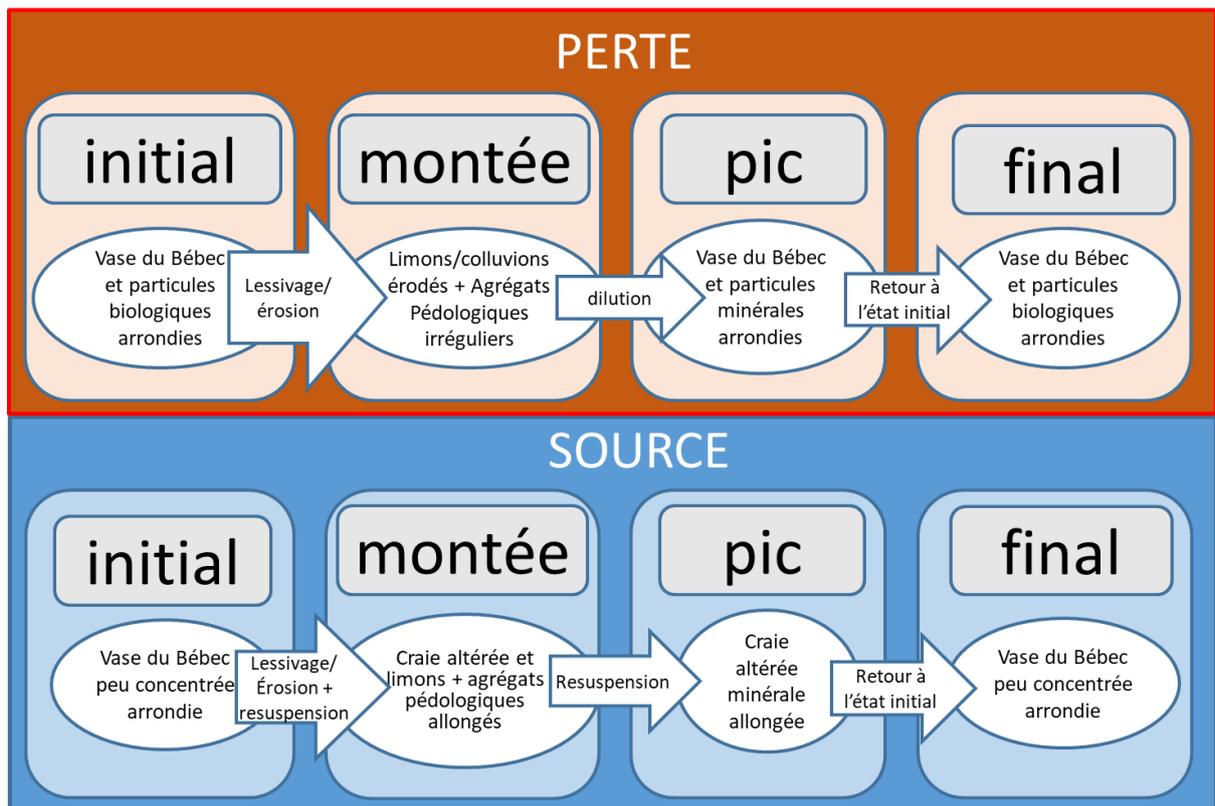


Figure 138: schéma conceptuel synthétisant les interprétations sur les transferts de sédiments pendant la crue

Les résultats obtenus par différentes méthodes (granulométrie, morphométrie, observation MEB) se sont bien complétés pour permettre la reconstruction temporelle des caractéristiques du transfert particulaire des différentes sources sédimentaires en réponse au forçage météorologique. Cette approche complémentaire permet de mieux appréhender les apports de chacune des méthodes et de distinguer ce que peut spécifiquement apporter la morphogranulométrie au suivi source to sink du transfert particulaire dans les bassins versants.

## E. SYNTHÈSE DE TOUTES LES ANALYSES MORPHOGRANULOMÉTRIQUES DU SITE

Tout d'abord, la morphogranulométrie des différentes sources sédimentaires a été définie. Cela a permis de réaliser un modèle linéaire qui a pu être utilisé comme référence pour associer les sources aux sédiments retrouvés à l'aval dans toutes les autres analyses sédimentaires réalisées sur ce site.

La mesure d'échantillons mensuels durant 3 ans (de fin 2016 à 2019) a montré que l'on retrouve énormément de variabilité en condition d'étiage à la perte comme à la source (mais la source est beaucoup plus stable). Néanmoins quelques crues saisonnières (automnal et estival pour la perte, estival pour la source) se sont distinguées des étiages.

Pour regarder les enregistrements antérieurs, la carotte sédimentaire réalisée à la source a permis de retracer un historique sédimentaire jusqu'à 2015. La réalisation d'analyse croisée granulométrie laser, spectrométrie et morphogranulométrie a permis d'identifier des niveaux sédimentaires avec des signatures de crue.

Deux évènements de crue ont été suivis pour observer des crues avérées sur tout leur déroulement. Une crue provoquée artificiellement a permis d'analyser une première réaction du système à une variation hydrodynamique de petite envergure. Des variations faibles ont été observées et un signal de crue a difficilement pu être identifié. Le suivi d'une crue hivernal avec une réaction hydrodynamique beaucoup plus marquée a permis d'observer des variations claires au niveau morphogranulométrique mais également sur les observations au microscope. L'analyse des différences perte et source a également pu mettre en évidence une potentielle phase de resuspension des sédiments intra-karstique lors de la fin de la crue.

En replaçant toutes ces analyses dans une seule ACP (Figure 139), il est possible de comparer les différentes méthodes/études entre elles. Les deux premières dimensions représentent 88% de la variabilité. L'axe 1 (67% de variabilité) est corrélé avec les paramètres morphométriques (Circularity, Convexity, Straightness, Extent, Eccentricity, Bluntness et Roughness) et l'axe 2 avec les paramètres de taille (Area Diameter, Width, Length et Crofton Diameter).

Les échantillons ont été regroupés en fonction de leur méthode (carotte, suivi de crue, suivi mensuel, sédiment du bassin versant, etc) et de leur nature/localisation (perte, source, limon, colluvions, etc).

On observe tout d'abord qu'à chaque point extrême (axe 1 positif : forme régulières, remplissage karstique et sol crayeux ; axe 1 négatif : forme irrégulière craie, vase de la source et silts, axe 2 positif : petite taille, craie altérée ; axe 2 négatif : grande taille, vase du Bébéc et de la source du Hannotot, silts et limons) correspondent aux sources sédimentaires. Cela confirme donc bien leur statut de sources et leur conservativité : les autres échantillons sont des mélanges de ces dernières, ils présentent donc des valeurs intermédiaires.

Positif sur l'axe 1, on retrouve Les échantillons de la carotte sédimentaire, qui montre ont des signatures différentes des prélèvements d'eau (ech mensuels et crue), probablement du fait de la nature différente de l'échantillonnage. La plupart des échantillons (échantillons unimodaux, Figure 108) ont une forme régulière, signature proche de celle du remplissage karstique (karstfilling) et du sol crayeux (chalksoil). Mais les échantillons bimodaux sont négatifs sur l'axe 1 (Figure 108) du fait de leur forme plus irrégulière et tendent vers la vase du Bébéc, les limons, l'argile à silex voir même la vase du Hannotot, la craie et les silts.

Tout comme ces échantillons bimodaux, certains points en rouge ont une forme très irrégulière et se retrouvent fortement négatifs sur l'axe 1. Ce sont les points de la crue de mars 2019 observés lors du

pic de crue à la perte du Bébec (Figure 131). On retrouve une augmentation des contributions ces sources (limons, craies, silts) pour tous les signaux de crues bien identifiés (Figure 110, Figure 121, Figure 135).

Les autres prélèvements d'eau sont nuls sur l'axe 1 et se distinguent plus par leur taille. Les échantillons mensuels sont également nuls sur l'axe 2 et se retrouvent donc proches du centre de l'ACP, pour la perte du Bébec comme pour la source du Hannebot. Les sources sédimentaires associées seraient les colluvions de limons et les colluvions mixtes. Une partie des échantillons mensuels sont proches des échantillons des suivis de crues (Crue OAK et Crue réelle de mars 2019) et montrent des valeurs plus positives sur l'axe 2, proches de celles de la craie altérée (alteredchalk).

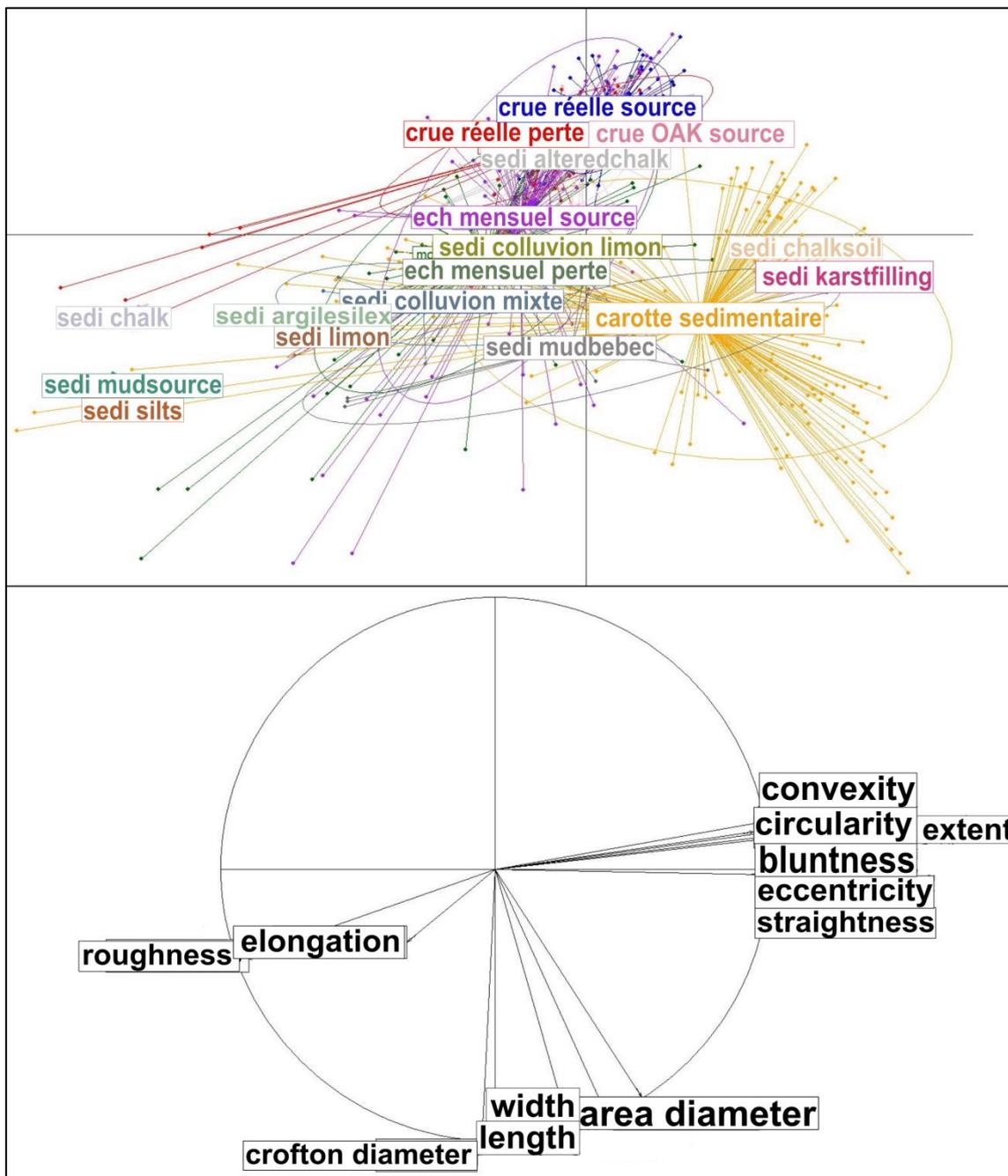


Figure 139 : Représentation graphique de l'ACP sur tous les échantillons analysés sur le site de Norville, dim 1 et 2 (respectivement 67% et 21% de la variabilité)

Toutes ces comparaisons semblent permettre la reconstruction de la dynamique spatio-temporelle des transferts sédimentaires à Norville :

L'analyse morphogranulométrique du bassin versant a permis de réaliser un modèle de prédiction de contribution des sources sédimentaires fiable. L'application de ce modèle sur les échantillons mensuels et de suivi de crue a permis d'observer des différences claires entre les matières en suspension de la perte du Bébec et de la source du Hannebot.

Les deux montrent des transferts relativement identiques durant les étiages mais la perte du Bébec montre l'arrivée de particules très irrégulières (Circularity, Bluntness, Roundness, Convexity, Straightness, Eccentricity bas, Elongation et roughness élevés) durant les crues, en particulier les crues estivales et automnales, qui présentent des signatures des sols crayeux et des colluvions limoneuses, avec moins de vase du Bébec. Ces particules proviennent de l'érosion, plus marquée lors des crues, en particulier lors de l'été et du début de l'automne, lorsque les sols sont secs. La crue hivernale suivie en mars 2019 montre également une augmentation similaire des contributions de colluvions et sols crayeux durant la montée de la crue.

À la source, les prélèvements de sédiments en suspension montrent des signatures de crue qui se détachent également de l'étiage, mais qui sont beaucoup moins marquées qu'à la perte. Cette signature correspond à une augmentation de l'élongation mais pas des autres paramètres de forme et de taille (contrairement à la perte qui présente une augmentation sur tous les paramètres lors des crues estivales et automnales). Le modèle attribue ce signal à celui des limons, colluvions et de la craie altérée. La différence par rapport à la perte vient probablement du fait qu'une partie des particules érodées ait été filtrée à l'entrée du système karstique ou sédimentée à l'intérieur, tandis que se sont ajoutés au mélange des sédiments de la craie encaissante, qui s'est également érodée lors du passage de l'eau en souterrain.

La carotte sédimentaire prélevée à la source va également dans ce sens, on identifie 2 niveaux de crue probable montrant des élongations plus importantes, indiquant la présence de particules plus allongées, attribuées à la craie altérée et aux limons par le modèle. Une phase de resuspension a également pu être identifiée lors de la crue suivie en mars 2019 en couplant les résultats morphogranulométriques avec des observations au microscope électronique à balayage.

La morphogranulométrie a donc permis, par une analyse spatiale, d'identifier les sources sédimentaires et de calculer leur contribution à l'entrée et la sortie d'un karst. L'analyse temporelle a mis en évidence certains forçages : météorologiques et saisonniers sur les deux sites (perte et source). En combinaison avec d'autres analyses, la morphogranulométrie a également permis de confirmer les sources sédimentaires des niveaux de la carotte sédimentaire identifiés comme niveau de crue par d'autres méthodes. En associant la morphogranulométrie avec de la microscopie à balayage (MEB) sur une crue, il a été possible d'identifier des phénomènes de resuspension et d'identifier la nature de ces particules et de quantifier leurs proportions.

Cette étude traduit d'une part l'efficacité du morphogranulomètre pour la surveillance et l'analyse des transferts de sédiments dans un système souterrain et d'autre part l'intérêt de compléter cela avec d'autres méthodes afin d'arriver à une compréhension précise des transferts sédimentaire au sein d'un hydrosystème souterrain.

Le chapitre suivant (chapitre V) va montrer une application directe de la méthode utilisée dans ce chapitre IV mais cette fois ci pour répondre à une problématique très appliquée : l'alimentation en eau d'une commune de Normandie.

# V. UTILISATION DE LA MORPHOMETRIE POUR L'IDENTIFICATION DE L'ORIGINE SEDIMENTAIRE DE LA TURBIDITE DANS UN FORAGE D'ALIMENTATION EN EAU POTABLE (EXEMPLE DE LA VILLE DE GISORS)

---

## A. CONTEXTE

### 1) Problématique

La Ville de Gisors connaît des problèmes récurrents d'apparition de turbidité dans l'eau brute du forage utilisé pour l'Alimentation en Eau Potable (AEP) de Saint-Paër, en particulier depuis 2016. D'après les observations, ces occurrences sont consécutives à des épisodes pluvieux intenses, mettant ainsi en évidence des circulations rapides dans le sous-sol en amont du site de captage.

Le forage de Saint-Paër est situé au sud de la commune de Saint-Denis le Ferment. Le site se place sur le rebord de la vallée de la Lévrière au pied du versant Est. Le cours de la Lévrière passe à 300 m du forage.

Son bassin versant couvre la surface définie par l'air d'alimentation du captage (Figure 140, données du portail Aires d'Alimentation de Captages, Office International de l'Eau, OIEau). Il s'étend sur toute la vallée de la Lévrière et ses plateaux adjacents, jusqu'au plateau à l'ouest de Gournay-en-Bray.

Le site de captage se place à l'interface entre les terrains crayeux sub-affleurants du versant et les terrains alluvionnaires de la vallée de la Lévrière. En conséquence, les formations superficielles sont très peu épaisses et inférieures au mètre. La craie du Campanien est directement sous-jacente. Les 15 premiers mètres sont altérés (craie fragmentée) et témoignent de forts processus chimiques et mécanismes de dissolution de la craie à cet endroit. Au-delà la craie est marneuse et compacte.

Les plateaux sont recouverts de formations tertiaires résiduelles avec du haut en bas :

- Colluvions résiduels hétérogènes constitués galets, blocs de grès, matrice de sables fins à grossiers ;
- Argiles de l'Yprésien (faciès Sparnacien), plutôt compactes et peu perméables ;
- Sables du Thanétien.

Comme mentionné précédemment, la craie du Campanien est la formation géologique affleurant au droit du forage. Elle constitue une grande partie de la moitié sud du bassin versant. Au nord, la craie du Campanien laisse place aux craies à silex du Santonien, Coniacien et Turonien qui affleurent dans la forêt domaniale de Lyons.

La couche de colluvions de surface plutôt perméable repose sur un front argileux peu profond qui l'est beaucoup moins. Ceci a pour conséquence d'engorger les terrains en hiver et de générer du ruissellement de surface et du ruissellement hypodermique. Cette couche d'argiles plastiques du Sparnacien dissocie donc bien les formations de surface de la craie sous-jacente sur le plan hydraulique.

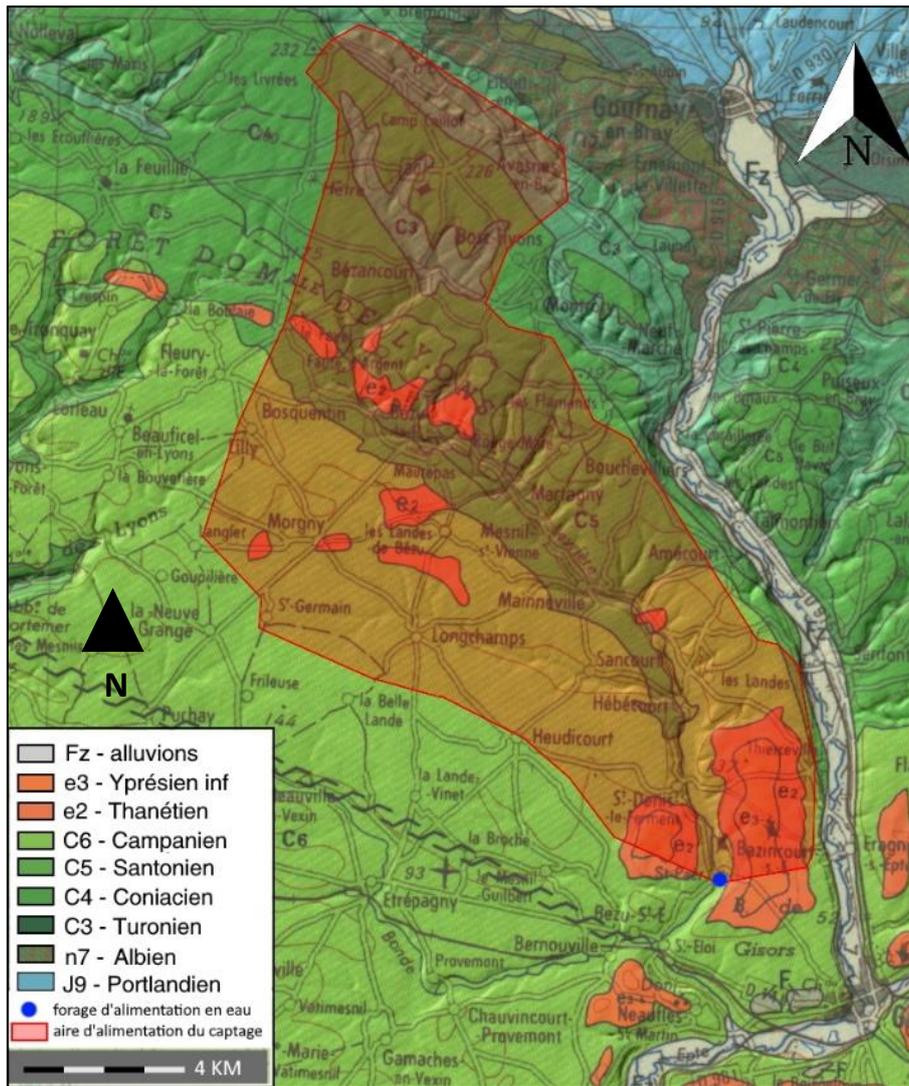


Figure 140 : Aire d'alimentation du captage (en rouge, OIEau) sur fond de carte géologique (carte 1 : 250 000 de Rouen, BRGM, 1979)

La craie, sans pour autant se trouver en charge sous ces argiles, dispose naturellement d'une bonne protection vis-à-vis des activités de surface. Ce constat est antinomique aux problèmes de qualité rencontrés par le forage. Il est toutefois possible que la formation peu perméable des argiles à silex soit discontinue et permette localement le transfert rapide d'eaux de surface vers le sous-sol.

La carte régionale des sols du SERDA (1988) indique que le plateau de Bazincourt est couvert de formations sablo-caillouteuses typiques de terrasses, et hydromorphes. Elles sont principalement composées de galets et cailloux de silex à fraction fine sableuse et grise. L'épaisseur de cet horizon n'excède pas 1 m. Ces formations sont sujettes à l'engorgement de surface jusqu'à saturation complète.

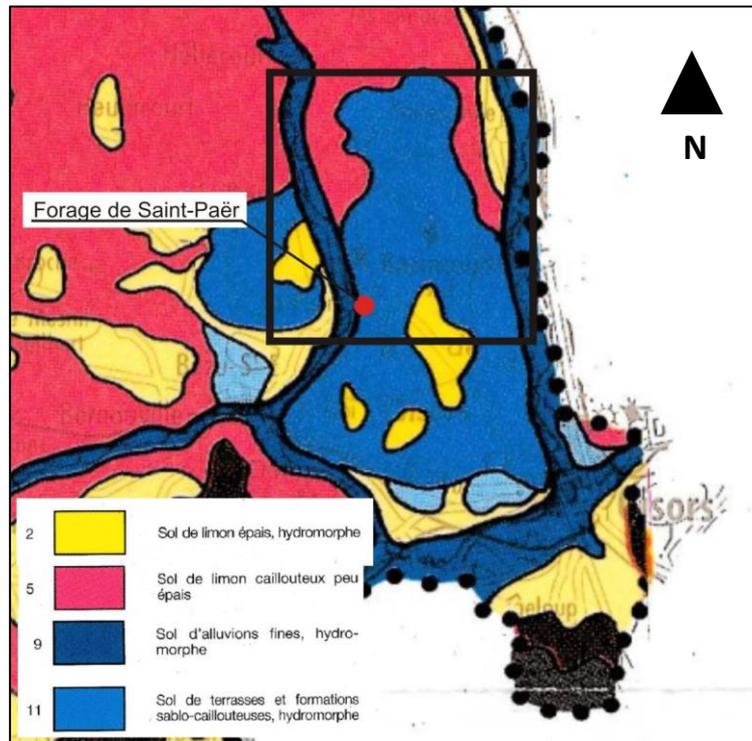


Figure 141 : Extrait de la carte régionale des sols (SERDA, 1988)

Cette étude fait suite à plusieurs pics de turbidité observé après un fort cumul de précipitations constaté entre les 25 décembre 2017 et 22 janvier 2018. La Ville a mandaté SUEZ Consulting pour tenter de trouver l'origine de la turbidité. La réalisation de reconnaissances de terrain visant à identifier la présence d'indices d'effondrements d'origine karstique susceptibles d'infiltrer l'eau de surface a permis de constater l'ampleur du phénomène de ruissellement sur le territoire compris entre les vallées de l'Epte et de la Lévrière. Une opération de multi-traçages a également été mise en œuvre par SUEZ Consulting au droit de 3 sites préférentiels d'infiltration. Aucune restitution positive n'a été constatée au droit du forage. Le rapport de SUEZ Consulting sur l'origine de la turbidité au captage de St-Paer émis en Septembre 2018 mentionne dans sa conclusion :

« Différentes pistes relatives à l'origine de la turbidité peuvent être retenues et d'autres peuvent être écartées. D'après l'analyse corrélative des signaux précipitations et turbidité, il est possible que le délai d'apparition puisse être de l'ordre de 2 heures. Ceci implique que l'origine de la turbidité est très proche du site de captage. La remise en cause des modalités d'exploitation du forage est écartée ; la turbidité constatée ne provient pas de la remise en suspension de MES lors de la mise en route des pompes.

L'identification de pertes depuis la Lévrière est rendue difficile par le niveau d'eau et la végétation de la ripisylve. Néanmoins, le long des tronçons prospectés, aucune perte ponctuelle ou linéaire significative n'est constatée. Les délais d'apparition de la turbidité au forage paraissent par ailleurs assez courts pour pouvoir être représentatifs du circuit complet depuis la pluie, le ruissellement, sa concentration et l'érosion de particules, la mise en charge de la Lévrière, la perte sous alluviale et le transfert le long de nappe alluviale sur près de 280 m ; le tout en deux heures.

Les résultats des opérations de traçages souterrains réalisés, dans les contraintes de réalisation imposées, n'ont pas fourni d'éléments probants quant à la contribution des sites d'infiltration d'eaux

de ruissellement tracés. La contribution d'eaux de ruissellement par indices karstiques implique que ceux-ci soient en communication avec des eaux de surface plus ou moins permanentes telles que des mares sur le plateau. Un indice karstique encore non tracé satisfait ces conditions et se trouve à l'aval immédiat de deux mares situées au lieu-dit les Ursulines.

Malheureusement les contraintes d'exploitation du forage de Saint-Paër et notamment l'absence de secours total de la production d'eau dans le cas d'une restitution d'un traceur colorimétrique, rendent impossible un éventuel test de traçage à l'uranne. »

Afin d'apporter des éléments supplémentaires à cette étude, une expertise des matières en suspension a été demandée par la Ville de Gisors au laboratoire M2C. Une étude combinant granulométrie laser, microscopie électronique à balayage et morphogranulométrie a donc été effectuée afin d'identifier l'origine de ces transferts sédimentaires provoquant ces pics de turbidité.

## 2) Hydrodynamisme et échantillonnage

Pour caractériser les particules responsables de la turbidité des eaux captées, trois échantillons ont été prélevés lors de la crue du 22 janvier 2018 : le 22 janvier à 13h (pic), le 23 janvier à 16h (décrue) et le 2 février (étiage).

Le cumul pluviométrique sur 5 jours est de 57,8 mm, avec une pluviométrie de 26,5 mm le jour du pic (Figure 142). La crue est caractérisée par un pic de turbidité à 13h30 atteignant 16 NTU dans l'eau brut de la station (Figure 143), avec un temps de passage de 26 heures.

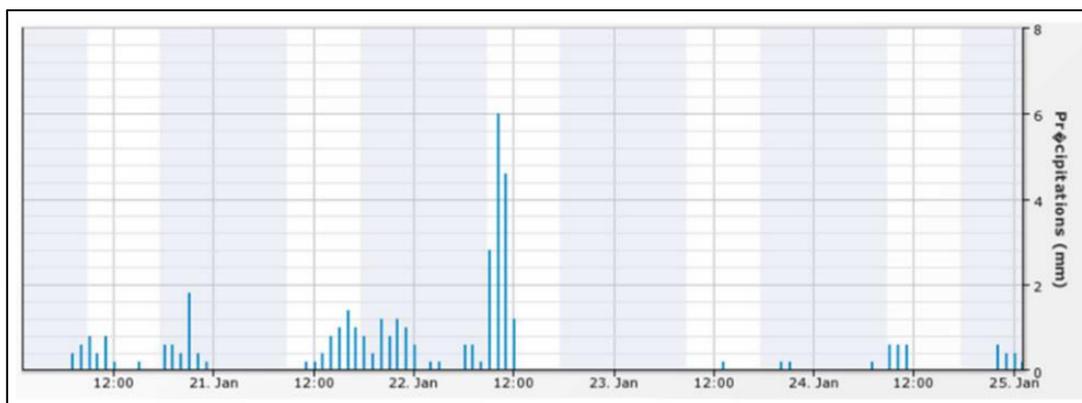


Figure 142 : Précipitations horaires du 20 au 25 janvier 2018 à la station de Gournay en Bray

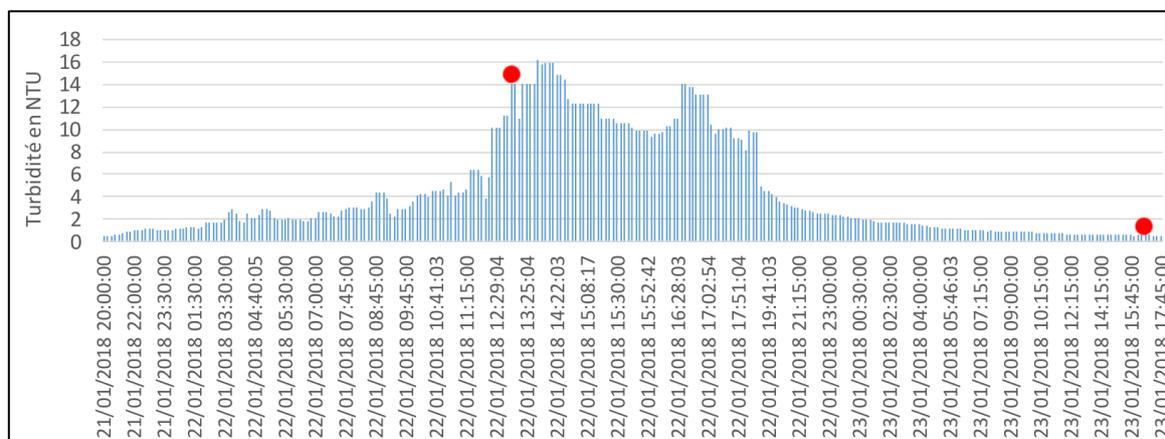


Figure 143: Turbidité mesurées à la station de pompage du forage de St-Paër, les points rouges correspondent aux prélèvements d'eau

Ce signal est caractéristique d'un forage impacté par une fissuration dense à laquelle se surimposent des arrivées karstiques. Ce constat est cohérent avec les informations bibliographiques dont on dispose au sujet du captage. La décomposition du pic en deux sommets indique la complexité de l'organisation du soubassement crayeux dans lequel il s'inscrit et la diversité des circuits d'écoulement qu'il intercepte (cette décomposition s'observe sur tous les pics de turbidité observés par SUEZ consulting en 2018).

## B. UTILISATION DE LA GRANULOMETRIE LASER POUR L'IDENTIFICATION DES POPULATIONS SEDIMENTAIRES

Afin d'identifier si différentes populations particulières apparaissent en fonction des différents régimes de crue. L'analyse granulométrique par méthode laser permet de mesurer la taille de chaque particule et ainsi d'identifier les populations sur la base de leur taille.

Les trois échantillons ont été mesurés par un granulomètre laser pour connaître le spectre granulométrique rendant compte de la distribution des tailles des matières en suspensions transportées. La comparaison des spectres moyens montre clairement l'apparition d'un mode granulométrique entre 1 et 10  $\mu\text{m}$  lors du pic de crue (22 janvier) alors que le mode entre 50 et 100  $\mu\text{m}$  est présent sur chacun des 3 échantillons (Figure 144). 70% des particules de l'échantillon de crue sont inférieures à 20  $\mu\text{m}$ .

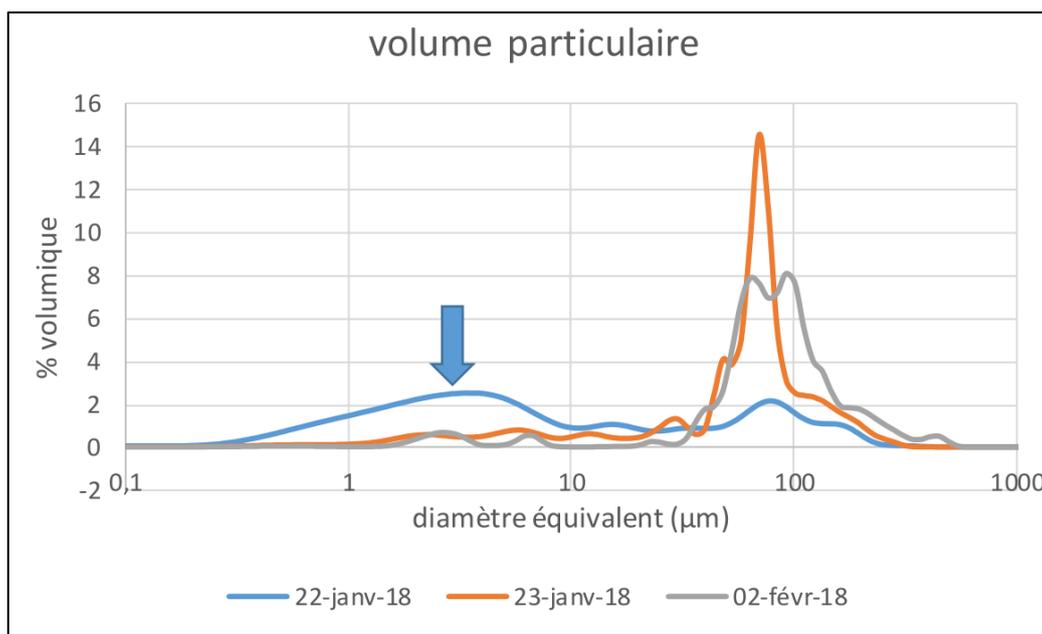


Figure 144 : Spectre granulométriques moyens en pourcentage volumique sur les 3 échantillons

Ceci illustre clairement le fait que le pic turbide résulte de l'engouffrement de nombreuses particules de taille entre 1 à 10  $\mu\text{m}$  de diamètre équivalent. Mais quelle est la nature et l'origine de cette population particulière ? Des observations au microscope électronique à balayage (MEB) permettent d'identifier la nature des particules.

## C. IDENTIFICATION DES DIFFERENTES POPULATION PAR OBSERVATION AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE (MEB)

Les observations au MEB montrent clairement des particules de nature complètement différente entre les 3 échantillons. Si le pic de crue turbide est massivement caractérisé par un recouvrement

de matière organique très fine sur tout le filtre, il est aussi caractérisé par la présence de diatomées et radiolaires absentes des autres échantillons. La nature des particules comprises de 50 µm à 100 µm est stable composées de débris végétaux, de gros grains de quartz et de calcite recristallisée (Tableau 36).

Tableau 36 : Synthèse des observations au MEB des échantillons

OBSERVATIONS	22 JANVIER 2018	23 JANVIER 2018	2 FEVRIER 2018
FOND DU FILTRE	Recouvert de matière organique dense	Recouvert de matière organique moins dense	assez propre, avec pores bien visibles
ELEMENTS BIOLOGIQUES	Quelques diatomées pennées et radiolaires	Rares chrysophycées	
ELEMENTS ORGANIQUES	Absence de floc Débris végétaux grossiers (50µm) Radicelles (80-100µm) Quelques voiles organiques	Absence de floc Débris végétaux Radicelles (80-100 µm) Voiles organiques en plaques avec des figures d'arrachement	Absence de Floc Rares débris végétaux  Radicelles (50-100µm)
ELEMENTS MINERAUX	Nombreux grains de quartz (5-10µm) Grains de calcite recristallisée (30-50µm) Quelques agrégats d'argile calcique (20-30µm)	Rares grains de quartz  Grains de calcite plus rares et plus petits (autour de 10 µm) Rares agrégats d'argile calcique de 20 à 30 µm	Rares grains de quartz  Quelques particules de calcite recristallisée en chainettes de 10 µm Quelques agrégats d'argiles (30µm)

Les observations MEB permettent d'identifier la nature des particules. Néanmoins, cette procédure est complexe, coûteuse et très discontinue au regard de l'extrême variabilité hydrologique et diversité des particules transportées dans les aquifères karstiques. Ainsi, ces observations ne peuvent être que qualitatives et permettent pas de faire des bilans de masse.

## D. UTILISATION DE LA MORPHOMETRIE POUR L'IDENTIFICATION DES SOURCES SEDIMENTAIRE

### 1) Analyses des variations morphogranulométriques

Afin de comparer les formes des particules. Les spectres de la bluntness et la straightness mesurés sur les répliqués sont comparés sur les Figure 145 et Figure 146.

Les distributions permettent d'observer que le pic turbide de la crue est principalement caractérisé par l'augmentation de la population particulaire transportée mais aussi l'arrivée d'une population particulaire nouvelle aux valeurs de bluntness (variant de 0 pour les particules non-émoussées à 1 pour les particules les plus émoussées) et straightness (variant de 0 pour les particules les plus « coudées » à 1 pour les particules les plus droites) plus faibles. Ceci illustre l'arrivée d'une population aux particules plus anguleuses et moins émoussées comme des petits grains de quartz et des diatomées.

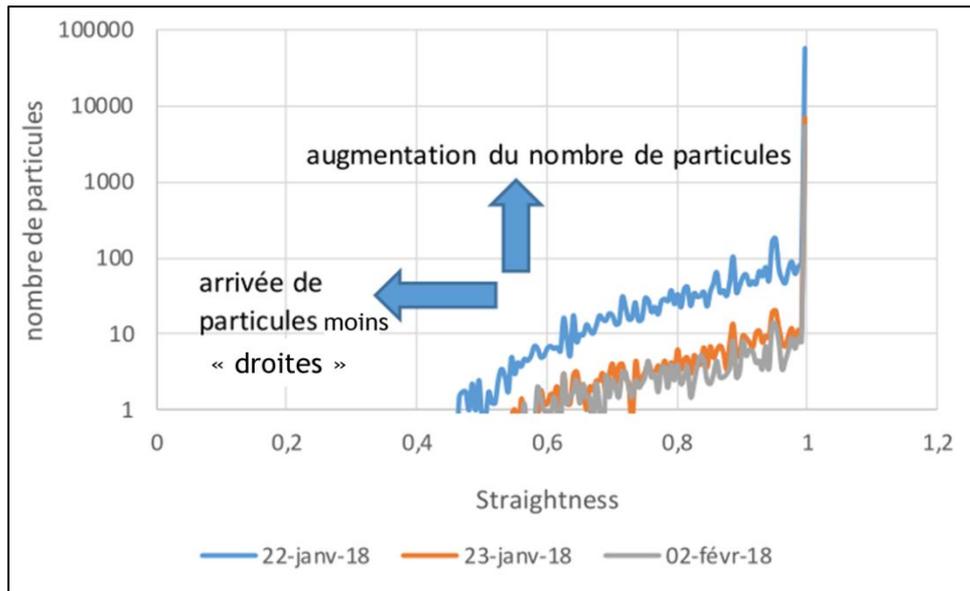


Figure 145 : Distributions moyennes des fréquences de Straightness pour les 3 échantillons

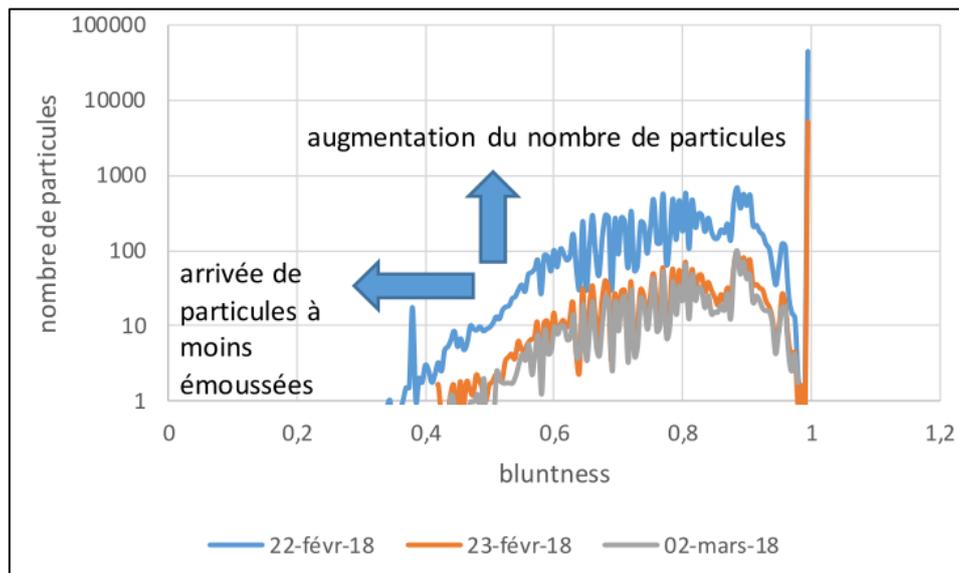


Figure 146 : Distributions moyennes des fréquences de Bluntness pour les 3 échantillons

On observe donc des différences nettes entre le nombre, la taille et la forme des particules en fonction du régime hydrologique. Durant la crue, on observe un plus grand nombre de particules, l'arrivée d'une population de particules plus petites en supplément de la population retrouvée en étiage et en récession, l'apparition de diatomées et de particules organiques en grande quantité ainsi que des formes plus irrégulières. Pour associer cette signature à un ou plusieurs sédiments, l'analyse des sources sédimentaires sur le bassin versant est nécessaire.

## 2) Analyses des sources sédimentaires

L'étude réalisée par SUEZ Consulting a recensé les différents points d'infiltrations potentiels du bassin versant correspondant à un temps de transfert de 2h. Un test de multi-traçage artificiel a été

réalisé dans trois d'entre eux (Figure 147). Aucune restitution positive n'est observée au captage, il semble donc qu'aucun de ces points ne soit connecté avec le forage.

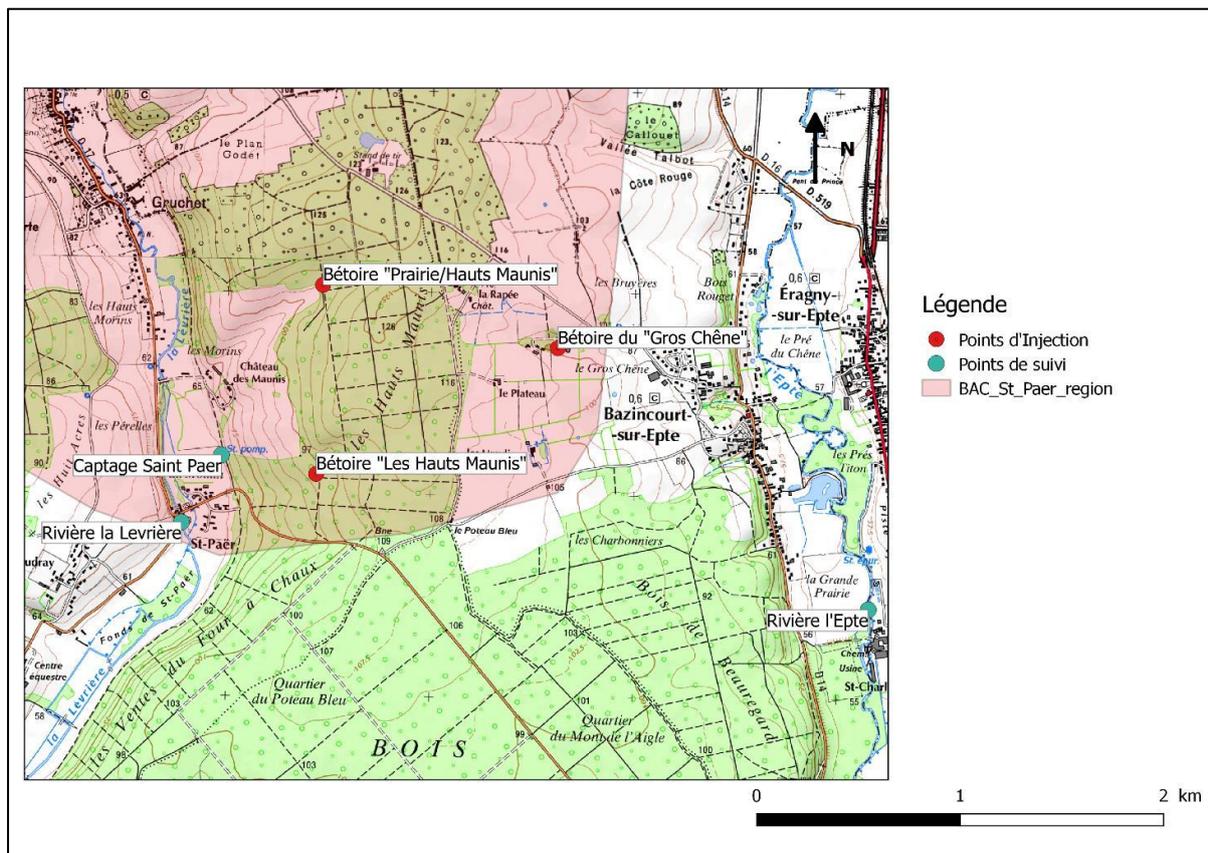


Figure 147 : Situation géographique des sites d'injection et de suivi de l'opération de traçage réalisée par SUEZ Consulting

Un point d'infiltration n'a pas fait l'objet de traçage et constitue l'endroit le plus probable pour une infiltration possible via les plateaux. Ce point se situe à proximité du hameau Les Ursulines et se trouve en aval de deux mares (Figure 148).



Figure 148 : Situation des mares et du point d'infiltration (indice karstique) n'ayant pas fait l'objet de traçage projeté sur vue aérienne

Une infiltration potentielle via la Lévrière ou l'Epte est également envisageable. C'est pourquoi les deux cours d'eau ont été échantillonnés (points 1-2 et 7-8 sur la Figure 149), tout comme les 2 mares mentionnées précédemment (points 4, 5 et 6 sur la Figure 149). Enfin, un prélèvement de sol limoneux a également été réalisé (point 3 sur la Figure 149). Le Tableau 37 liste tous ces échantillons.

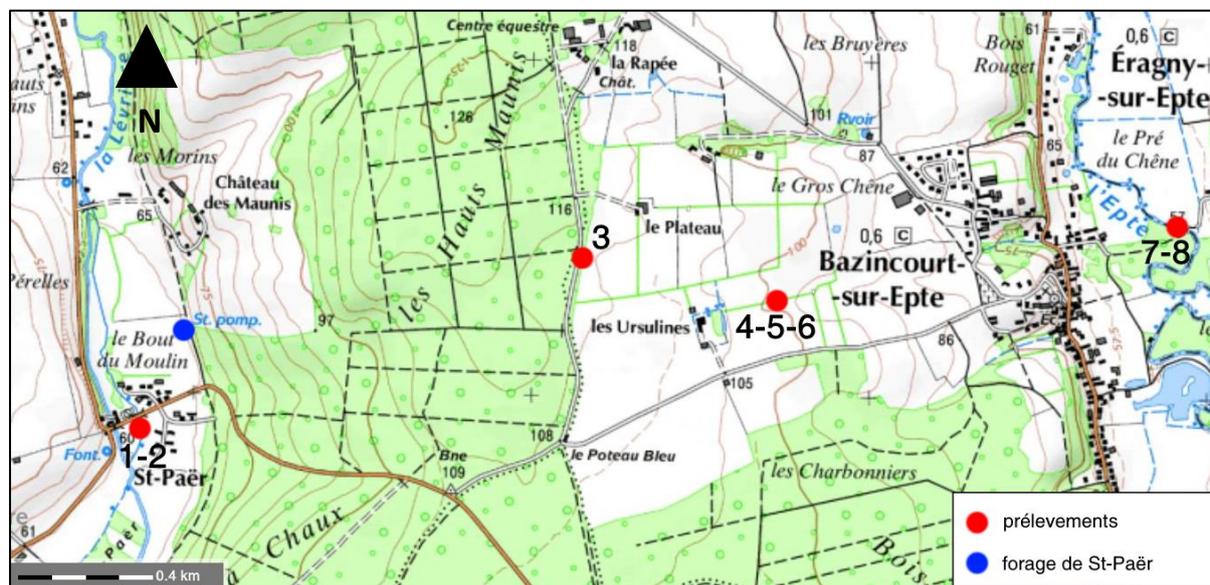


Figure 149 : localisation des points d'échantillonnage des sédiments sélectionnés comme sources sédimentaires potentielles

Tableau 37 : Liste des échantillons des sédiments sélectionnés comme sources sédimentaires potentielles

nature	localisation	commentaire	numero
suspension	canal de la lévrière	NA	1
vase	canal de la lévrière	minéral/sableux	2
limons	sediments	NA	3
suspension	mare1	organique/bio	4
sediment	mare2	rouge/oxidé	5
suspension	mare2	organique	6
suspension	Epte	très peu turbide	7
sediment	Epte	NA	8

Si l'on place les sources sédimentaires et les échantillons du forage de St Paer sur une même ACP, on obtient la Figure 150. Sur l'axe 1 (54% de la variabilité), on observe les paramètres de forme (Bluntness, Convexity, Circularity, etc en positif ; et Roughness et Elongation en négatif). Les échantillons de la récession et de la crue au forage sont les plus positifs sur cet axe (forme plus régulière), tandis les matières en suspension de la seconde mare et l'étiage au forage sont les plus négatifs (forme plus irrégulière). Sur l'axe 2, anticorrélé avec les paramètres de taille, on observe la vase et les matières en suspension du canal de la Lévrière avec des valeurs très négatives. Les matières en suspension de la première mare ainsi que l'étiage et la récession du forage sont positives. La crue et les autres sources sont proches de la valeur nulle sur l'axe 2.

Le fait que les valeurs de crue et de récession sur l'axe 1 soient plus fortes que toutes les sources échantillonnées montre un apport de MES plus régulières qui pourrait provenir de la Lévrière et /ou de sources non échantillonnées. L'encaissant de la craie par exemple, dont l'érosion à l'intérieur du karst est fortement probable, pourrait constituer une telle source. . Par contre en période de

récession, les caractéristiques des MES au forage sont proches de celles de la mare et des formations superficielles. Une connexion avec la rivière est donc bien à prendre en considération.

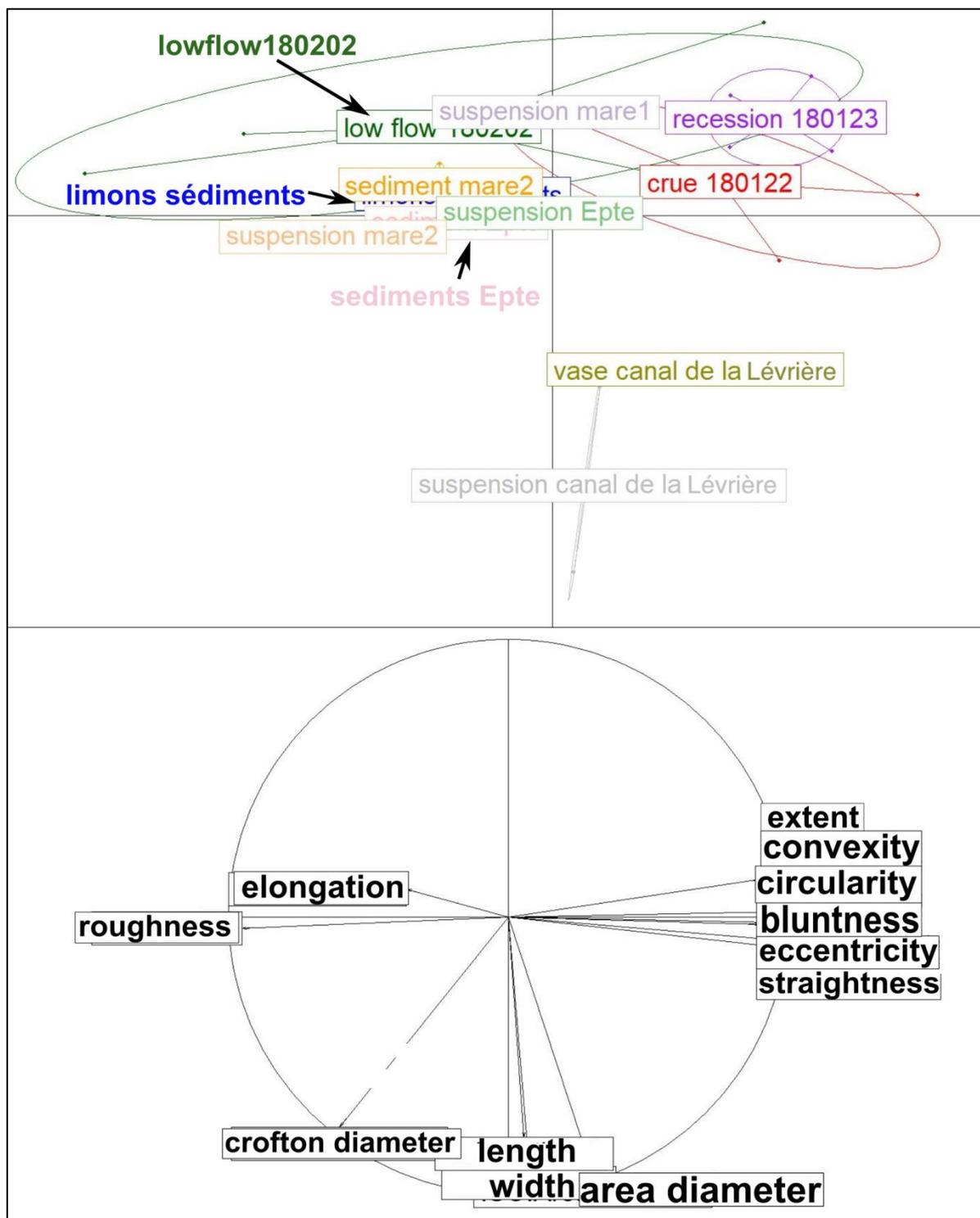


Figure 150 : Représentation des sources sédimentaires et des échantillons de la crue au forage de St Paer, sur les axes 1 et 2 (56 et 24% de la variabilité) de l'ACP des médianes leur paramètres morphogranulométriques

### 3)Modèle des sources sédimentaires et prédiction

Malgré l'échantillonnage non exhaustif des sources, il est possible de réaliser un modèle, l'interprétation de ce modèle devra prendre en compte l'absence de certaines sources. L'AFD sur les sources échantillonnées montre une bonne distinction des différents échantillons.

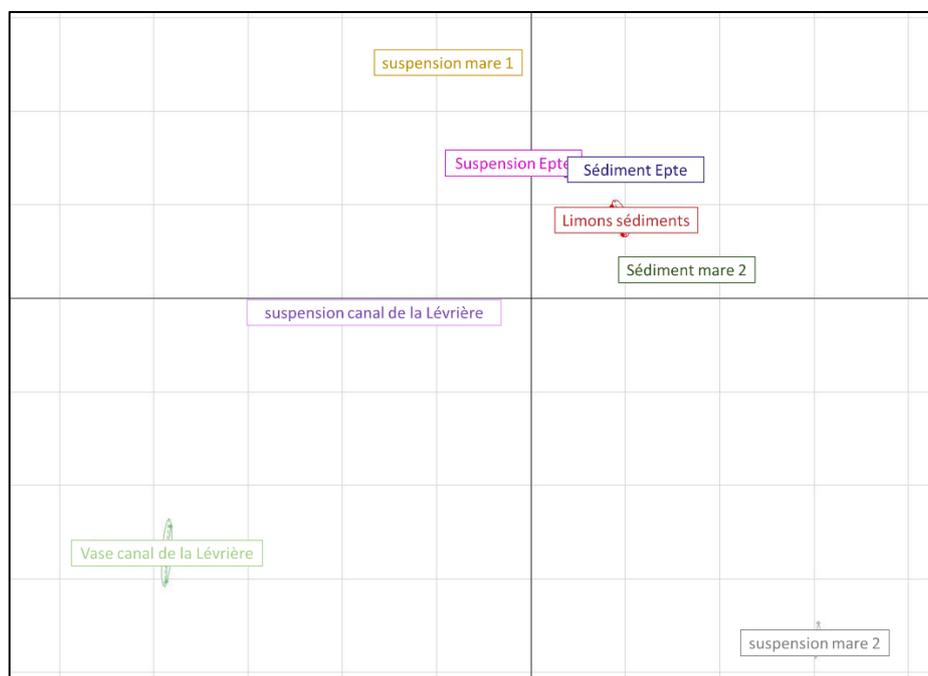


Figure 151 : Projections des sources échantillonnées dans le plan défini par les axes de l'AFD sur l'ACP des médianes des sources sédimentaires

L'équation du modèle linéaire est la suivante : (Dim1, 2, 3, 4 et 5 sont les dimensions de l'ACP sur laquelle l'AFD est basée)

$$\text{score} = 29.8 \times \text{Dim1} + 9.5 \times \text{Dim2} + 6.1 \times \text{Dim3} + 3.7 \times \text{Dim4} + 1.7 \times \text{Dim5}$$

On observe aucune recombinaison (Tableau 38), ce qui correspond bien avec les groupes bien détachés observés précédemment avec l'ACP.

Tableau 38 : Matrice de confusion montrant les recombinaisons entre les différents groupes de l'AFD sur les médianes des distributions

fac	limons sediments	sediment Epte	sediment mare2	suspension canal de la lievre	suspension Epte	suspension mare1	suspension mare2	vase canal de la lievre
limons sediments	3	0	0	0	0	0	0	0
sediment Epte	0	3	0	0	0	0	0	0
sediment mare2	0	0	3	0	0	0	0	0
suspension canal de la lievre	0	0	0	3	0	0	0	0
suspension Epte	0	0	0	0	3	0	0	0
suspension mare1	0	0	0	0	0	3	0	0
suspension mare2	0	0	0	0	0	0	3	0
vase canal de la lievre	0	0	0	0	0	0	0	3

La contribution de chaque source a donc pu être calculée pour chaque échantillon (Tableau 39). On y observe des variations claires, illustrées par la Figure 152.

Tableau 39 : pourcentage de contribution de chaque source sédimentaire calculé par l'AFD pour les échantillons de la crue de janvier 2018 au forage de St Paer

fac	limons sediments	sediment Epte	sediment mare2	suspension canal de la lievre	suspension Epte	suspension mare1	suspension mare2	vase canal de la lievre	regime
Gisors180122	5%	5%	17%	21%	27%	10%	15%	1%	crue
Gisors180123	3%	8%	15%	21%	32%	14%	5%	2%	recession
Gisors180202	0%	0%	19%	15%	26%	22%	19%	0%	letiage

On observe sur cet histogramme, en couleurs chaudes (rouge, oranges et brun) les sédiments et vases (Limon, sédiments du canal de l'Epte et mare 2), et en couleurs froides (bleus et gris) les matières en suspension des mares et cours d'eau (canal et Epte). On constate que pour tous les échantillons, il y a une claire dominance des matières en suspension par rapport aux sédiments. Lors de l'étiage, cette dominance est accrue d'environ 10% de plus que pendant la crue et la récession.

En regardant les différents sédiments, on voit que lors de l'étiage, seuls les sédiments de la seconde mare sont présents, alors que les autres sédiments n'apparaissent que durant la crue et la récession. Cette arrivée de nouvelles sources se fait principalement au détriment des matières en suspension des deux mares et du canal de la Lévrière, au contraire des matières en suspension de l'Epte qui varient relativement peu entre les différents régimes.

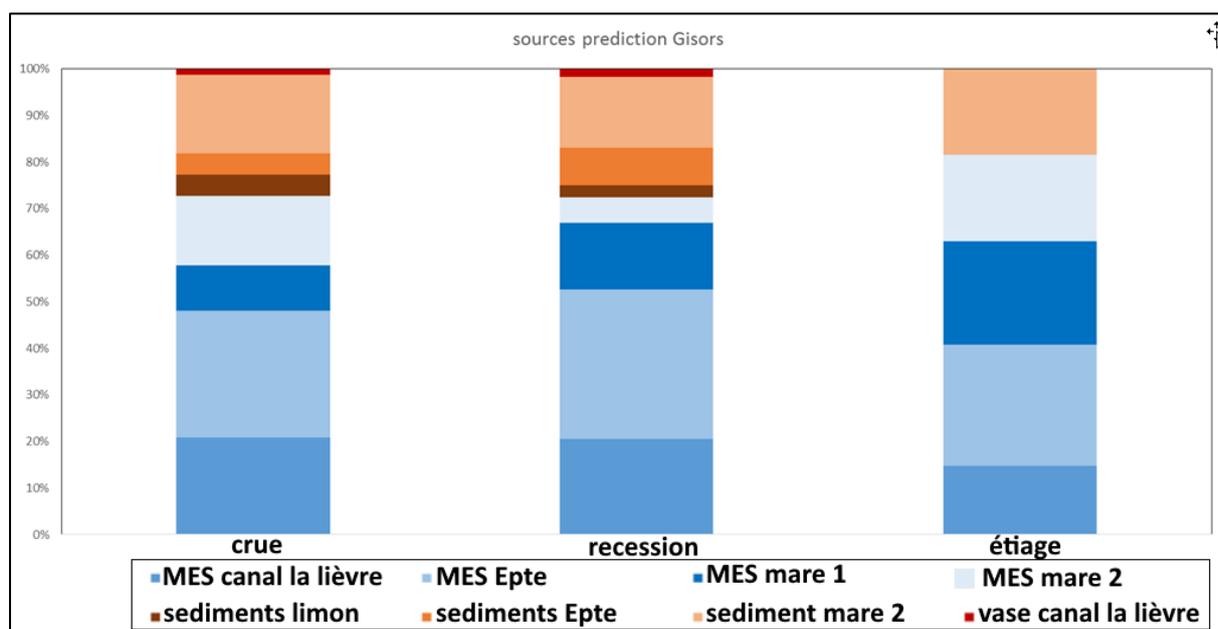


Figure 152 : histogrammes des variation des sources sédimentaires au forage de St Paer lors de la crue de janvier 2018 prédit par le modèle de l'AFD

Le modèle apporte donc des informations très claires sur l'apport des sources au sein du forage :

- Lors de la crue on observe des apports sédimentaires plus importants, provenant principalement des limons de l'Epte et du canal de la Lévrière. Ces apports peuvent être reliés à deux facteurs : l'érosion liée au ruissellement des précipitations et la remise en suspension liée à un hydrodynamisme plus important des particules des cours d'eau (Epte et Lévrière).
- En prenant en compte l'augmentation de turbidité d'un facteur 10 par rapport à l'étiage, les sédiments supplémentaires provoquant cette turbidité ne sont pas que liés à ces apports de sédiments de fond de cours d'eau (qui ne correspondent qu'à 10% de plus qu'en étiage) mais également une augmentation dans la contribution globale, et donc également des matières en suspension des mares et des cours d'eau. Cela s'explique également par un plus fort hydrodynamisme remettant beaucoup plus de particules en suspensions.
- Même lors de l'étiage, on observe une connexion possible avec l'Epte et la Lévrière, ainsi que les mares. Toutefois, les quantités de sédiments sont faibles avec une turbidité inférieure à 1 NTU.

## E. SYNTHÈSE DE L'ANALYSE DES SEDIMENTS AU FORAGE D'ALIMENTATION EN EAU POTABLE DE LA VILLE DE GISORS

Cette analyse a permis d'observer que :

- Pour l'échantillon de l'étiage, La turbidité est de 0.6 NTU. On observe des tailles suivant une population granulométrique unique, distribuée autour d'un mode d'environ 80  $\mu\text{m}$ . Les observations au microscope montrent la présence de radicules et particules organiques ainsi que des grains de quartz et calcite. De manière générale, les particules sont assez rares. Les observations du morphogranulomètre indique des formes plus régulières pour l'étiage. Avec un modèle de contribution des sources sédimentaires, on constate que les particules proviendraient des matières en suspension des mares et cours d'eau environnants (Epte et Lévrière) et des sédiments des mares.
- Lors de la crue, la turbidité est de 12.7 NTU. Les tailles de particules sont réparties entre 2 modes principaux, un autour de 5  $\mu\text{m}$ , l'autre de 80  $\mu\text{m}$ . Ce mode de fines n'est pas présent à l'étiage, et cela se retrouve avec les observations au MEB. Le filtre de l'échantillon de crue semble recouvert d'un film dense de particules fines organiques. Des diatomées sont également présentes, caractéristiques des eaux de surface. On observe également une augmentation dans le nombre de particules de quartz et de calcite, qui correspondent au mode de 80  $\mu\text{m}$ . Les particules sont de formes relativement irrégulières sur les observations morphométriques. L'appareil n'a pas une résolution suffisante pour analyser les particules inférieures à 20  $\mu\text{m}$ , on ne mesure donc pas la forme du mode des fines. Le modèle montre la présence des mêmes sources qu'en étiage, mais également l'apparition de nouvelles sources sédimentaires : les limons du plateau et les sédiments de l'Epte et du canal de la Lévrière. Ces sédiments seraient remis en suspension par un écoulement plus tumultueux du fait des fortes précipitations.
- La récession constitue un intermédiaire entre l'étiage et la crue. La turbidité est de 1.7 NTU, et les particules suivent le mode à 80  $\mu\text{m}$ . Le film de particules fines est moins dense et il n'y a plus de diatomée. Les particules ont toujours des formes plus irrégulières qu'à l'étiage, mais cela est moins prononcé que lors du pic de crue. Le modèle identifie à nouveau une origine provenant des matières en suspension principalement mais aussi des sédiments, tout comme lors de la crue.

Ces analyses combinées permettent d'apporter plusieurs informations. D'une part l'origine probable de connexions avec l'Epte, le canal de la Lévrière et les mares, en étiage comme en crue. Lors de la crue, l'apparition de diatomée confirme cette connexion avec des eaux de surface. Une grande quantité de particules organiques très fines (inférieures à 20  $\mu\text{m}$ ) est détectée mais elles n'ont pas pu être reliées à une source sédimentaire du fait de leur taille trop petite pour le morphogranulomètre. Ces particules sont les principales responsables de l'augmentation de turbidité, puisqu'elles représentent 70% de la distribution granulométrique. Le modèle basé sur les données morphogranulométriques renseigne toutefois sur l'apparition des limons et des sédiments de l'Epte et du canal, qui ne sont pas retrouvés lors de l'étiage.

Les limites restent donc la fourchette de mesure du morphogranulomètre, ne permettant pas de mesurer une grande part des particules de la crue mais aussi le manque d'exhaustivité dans l'échantillonnage des sources. La craie du Campanien (constituant l'encaissant du réseau karstique) ainsi que les alluvions de la Lévrière (en bordure desquelles se trouve le forage) sont deux sources potentielles qui permettraient de compléter le modèle.

Les perspectives pour dépasser ces limites seraient bien entendu de réaliser une nouvelle campagne d'échantillonnage de sources sédimentaires, mais également de suivre un nouveau pic de turbidité pour mesurer les prélèvements avec le zoom le plus puissant ( $0.185 \mu\text{m}/\text{px}$ ) qui permet de mesurer des particules de plus petites taille (chapitre II.D). Cela permettrait de voir une plus grande fraction de particules composant la crue. Afin de confirmer les conclusions sur les origines probables, l'utilisation d'autres méthodes de traçages serait également pertinente (traçage géochimique et isotopique des sédiments, de l'eau, traçage artificiel).

## CONCLUSION GENERALE

---

La problématique de la thèse était de tester la morphogranulométrie comme proxy du transfert particulaire et ses applications dans le suivi source to sink. Les grands objectifs fixés étaient les suivants :

- (1) Définir la capacité du morphogranulomètre à identifier des sédiments purs entre eux et identifier des paramètres clefs pour une mesure optimale ;
- (2) Créer un premier modèle de prédiction des contributions des sources pures au sein de mélanges créés en laboratoire à partir des échantillons purs identifiés précédemment ;
- (3) Mettre en place un protocole de mesure et d'analyse pour le morphogranulomètre ;
- (4) Identifier les sources sédimentaires et leur contribution dans différents bassins versants naturels en étudiant les différences de taille et de forme des sédiments sur différents points de mesures clefs de ces hydrosystèmes.

Le premier objectif a été adressé avec les tests méthodologiques sur les différents sédiments et les préparations. Parmi les trente-six paramètres calculés par le morphogranulomètre, douze paramètres ont été sélectionnés comme suffisants pour décrire toute la variabilité de taille et de forme des vingt-six échantillons mesurés. Ces douze paramètres ont permis de différencier cinq groupes d'échantillons purs selon leur taille et leur forme. Ces résultats constituent une ébauche de ce qui pourrait former un inventaire des tailles et des formes des différents sédiments selon leur nature, leur origine, leur préparation, leur milieu de dépôts, etc.

Le second objectif découle directement du premier, puisque les différents échantillons purs ont bien été discriminés par leur taille et forme, les proportions de plusieurs pôles purs ont pu être déterminées dans un mélange. En utilisant deux échantillons sources contrastés (sable et argile broyée) dans des mélanges de différentes proportions, le modèle a prédit correctement les différents pourcentages. En utilisant un troisième pôle moins bien discriminé (matière organique), la précision de prédiction chute drastiquement, le modèle linéaire n'a pas permis de bien retrouver les proportions mélangées. L'absence d'autres échantillons purs en quantité suffisante a empêché un test avec un autre troisième pôle mieux discriminé que la matière organique, qui a la particularité de présenter de fortes hétérogénéités entre les différents types de matière organique.

Les expérimentations réalisées avec l'appareil et sur les données a permis la réalisation du troisième objectif : la mise en place d'un protocole détaillé pour la mesure et le traitement des données. Ce protocole permet de réaliser une mesure optimale et identique pour chaque échantillon, ce qui est essentiel pour les comparer entre eux.

Enfin, le quatrième et dernier objectif implique l'application de la méthodologie de discrimination d'échantillons sources et de modèle de mélange des deux précédents points sur des cas appliqués. Une analyse spatiale des variations de taille et de forme sur un bassin versant minier constitue le premier cas étudié. La rivière Thio coule du sud-ouest vers le nord-est. La partie sud-est du bassin versant est caractérisée par des roches métamorphiques altérées, exploitée pour ses gisements de Nickel, tandis que la partie nord-ouest est plutôt sédimentaire. Des échantillons de sédiments sont prélevés sur les rives de crue des différents affluents de la rivière Thio s'écoulant sur ces deux parties, ainsi que sur la rivière principale. Ce cas relativement simple permet d'appliquer le protocole développé sur les tests précédents. En identifiant les différentes variations morphogranulométriques de ces échantillons, les différents forçages contrôlant la taille et la forme des grains ont été identifiés. Un modèle de traçage regroupant les sources sédimentaires vis-à-vis des forçages

identifiés est établi et semble pertinent. En effet, les proportions de chaque « groupe de source » augmentent au sein du mélange lors de la confluence d'un des affluents appartenant au groupe. La plupart des échantillons étant prélevés à une période unique, la nécessité d'un suivi temporel est établie.

Le second cas d'étude est justement constitué d'une analyse spatiale et temporelle. Il consiste en l'étude des transferts sédimentaires au sein d'un système karstique composé d'un cours d'eau se perdant complètement dans le karst via une doline puis ressortant via une source. Plusieurs autres méthodes comme la granulométrie laser et le microscope électronique à balayage ont été utilisées en complément du morphogranulomètre. Un suivi longue durée (mensuel durant trois ans et étude d'une carotte sédimentaire) combiné avec un suivi à pas de temps court ciblé sur de courte durée (horaire durant 4 à 5 jours) pour observer les événements extrêmes a permis d'observer les variations temporelles sur l'entrée (la perte du cours d'eau) et la sortie (la source) du système karstique. Les signatures des matières en suspensions sont très variables selon les saisons et les crues. Le modèle de traçage des sources sédimentaires a montré à la perte que lors des crues, les matières en suspensions provenaient de l'érosion des sédiments provenant du bassin versant, alors qu'en période d'étiage, on observait plus de sédiments provenant de la resuspension du fond de la rivière. A la source, le signal des matières en suspension provenant de l'érosion du bassin versant était plus faible, mais des particules provenant de l'intérieur du système karstique (resuspension ou érosion) ont été observées.

Enfin, le cas de Gisors est une application directe à un problème de société des méthodes utilisées précédemment. Ces méthodes sont appliquées afin de comprendre les transferts de sédiments à l'origine des pics de turbidité mesurés dans un forage d'alimentation en eau potable. La combinaison de mesures au granulomètre laser et au microscope électronique à balayage a permis de confirmer la présence d'eaux de surfaces et le morphogranulomètre a pu produire un modèle des origines probables des particules composant la turbidité. Des sources non présentes lors de l'étiage le sont lors de la crue : ce sont les sédiments, qui sont remis en suspension lors de fortes précipitations et sont potentiellement à l'origine de ces pics de turbidité. Malheureusement, la fourchette de taille mesurable au morphogranulomètre n'a pas pu permettre d'analyser la totalité des particules présentes dans l'échantillon de crue avec le morphogranulomètre. De plus, le prélèvement des sources n'a pas été exhaustif et demande d'être complété. Ces limites restent toutefois correctible car il est possible de remesurer de nouveaux échantillons avec un zoom plus important et de refaire une campagne de prélèvement de sources sédimentaires.

Ces trois cas appliqués montrent que le morphogranulomètre est efficace et pertinent pour la surveillance et l'analyse des transferts de sédiments, mais aussi que son utilisation apporte des informations complémentaires aux autres méthodes de traçage sédimentaire ; notamment la granulométrie qu'elle permet de compléter avantageusement.

Répondre à une question en amène toujours une multitude de nouvelles. Ces travaux ne font pas exception et ont mis en évidence plusieurs limitations et perspectives pour l'utilisation du morphogranulomètre comme outil pour l'étude « source-to-sink » des transferts sédimentaires. En voici certaines :

- Un des problèmes pour une mesure fiable et représentative de l'état naturel d'un sédiment vient du conditionnement et surtout de la préparation de l'échantillon. Comme cela a été observé dans l'analyse méthodologique, toute préparation modifie la forme des particules. L'objectif étant de perturber le moins possible la structure du sédiment analysé, il est envisageable de développer le morphogranulomètre pour la mesure in-situ sur le terrain.

Cette perspective, envisagée dès le début du projet de thèse, n'a pas pu être mise en place malgré les échanges avec le constructeur, ce dernier étant peu intéressé par le projet. Mais cela reste tout à fait possible d'un point de vue technique. De la même manière, il serait concevable d'équiper la caméra d'une reconnaissance des couleurs visibles et UV (pour détecter la fluorescence organique), ce qui enrichirait la gamme de paramètres mesurables par la machine.

- La reconnaissance de forme des échantillons purs a permis de créer une ébauche d'inventaire des différentes valeurs morphogranulométriques d'échantillons purs. A terme, il est envisageable de créer une base de données de la morphogranulométrie des sédiments purs permettant d'identifier la nature potentielle des sources mesurés sur le terrain directement à partir de valeurs théoriques. Toutefois, une des limites d'un tel projet reste que de nombreux sédiments peuvent montrer des formes similaires tout en ayant des natures, origines et transports différents et que la caractérisation des sources sur le terrain reste primordiale.
- Enfin, l'utilisation du morphogranulomètre peut et doit se faire en parallèle avec d'autres méthodes de traçage sédimentaire (sediment fingerprinting). Pour l'étude réalisée sur le bassin versant de Thio, des analyses géochimiques, isotopiques et colorimétriques ont été réalisés et font l'objet de la thèse de Virginie Sellier. Il sera donc possible de confronter ces résultats dans un futur proche. Dans cet objectif d'associer la morphogranulométrie aux mesures courantes de traçage sédimentaire, l'utilisation de l'outil Sed\_SAT a été infructueuse mais cela est principalement due à la structure demandée par l'outil pour les données d'entrées. Il est envisageable de développer un outil similaire où il serait possible d'entrer les distributions morphogranulométriques complètes et d'associer les paramètres de taille et de forme directement avec les paramètres bio-géo-chimiques des autres techniques de traçage sédimentaire.

## RÉFÉRENCES

---

- Acornley, R.M., Sear, D.A., 1999. Sediment transport and siltation of brown trout (*Salmo trutta* L.) spawning gravels in chalk streams. *Hydrol. Process.* 13, 447. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19990228\)13:3<447::AID-HYP749>3.3.CO;2-7](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19990228)13:3<447::AID-HYP749>3.3.CO;2-7)
- Agut, D., Moreno García, J.C., 2016. *L'Égypte des pharaons : de Narmer à Dioclétien*, 3150 av. J.-C.-284 apr. J.-C., Mondes anciens. Belin, Paris.
- Amann, B., Lobsiger, S., Fischer, D., Tylmann, W., Bonk, A., Filipiak, J., Grosjean, M., 2014. Spring temperature variability and eutrophication history inferred from sedimentary pigments in the varved sediments of Lake Żabińskie, north-eastern Poland, AD 1907-2008. *Glob. Planet. Change* 123, 86–96. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.10.008>
- Arasan et al., 2011. The Relationship between the Fractal Dimension and Shape Properties of Particles. *KSCE J. Civ. Eng. Neering* 15, 1219–1225. <https://doi.org/10.1007/s12205-011-1310-x>
- Aroma-Zone Argiles, n.d. Aroma-Zone Argiles [WWW Document]. URL <https://www.aroma-zone.com/tous-nos-produits/extraits-naturels/argiles.html?mode=grid&limit=12> (accessed 10.20.17).
- Bagheri et al., 2014. On the characterization of size and shape of irregular particles. *Powder Technol.* 270, 141–153.
- Barclay, D.R., Buckingham, M.J., 2009. On the shapes of natural sand grains. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 114. <https://doi.org/10.1029/2008JB005993>
- Bartos, C., Kukovec, Á., Ambrus, R., Farkas, G., Radacsi, N., Szabó-Révész, P., 2015. Comparison of static and dynamic sonication as process intensification for particle size reduction using a factorial design. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* 87, 26–34. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2014.10.015>
- BéGÉNAT, n.d. BéGÉNAT : préparations pour l'enseignement des Sciences de la Vie et de la Terre [WWW Document]. URL <http://begenat.com/presentation.php> (accessed 10.20.17).
- Blott, S., Pye, K., 2001. Gradistat : A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surf. Process. Landf.* 26, 1237 – 1248. <https://doi.org/10.1002/esp.261>
- Bodycomb, 2013. Are we there yet? How many particles do you need for Image Analysis ?
- Bonniwell, E.C., Matisoff, G., Whiting, P.J., 1999. Determining the times and distances of particle transit in a mountain stream using fallout radionuclides. *Geomorphology* 27, 75–92. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(98\)00091-9](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(98)00091-9)
- BRGM, 2018. Nouvelle-Calédonie | BRGM [WWW Document]. URL <https://www.brgm.fr/regions/reseau-regional/nouvelle-caledonie> (accessed 12.13.19).
- Brown, 1984. The global loss of topsoil. *J. Soil Water Conserv.* 39, 162–165.
- Brown, 1981. Eroding the Base of Civilization. *EPA J.* 7, 10.
- Buffle, J., Leeuwen, H.P. van, 1992. *Environmental particles. Vol. 1. (IUPAC Environmental analytical and physical chemistry series).*
- Burns, W.A., Mankiewicz, P.J., Bence, A.E., Page, D.S., Parker, K.R., 1997. A principal-component and least-squares method for allocating polycyclic aromatic hydrocarbons in sediment to multiple sources. *Environ. Toxicol. Chem.* 16, 1119–1131. <https://doi.org/10.1002/etc.5620160605>
- Cadogan et al., 2014. Efficiencies of chitosan nanoparticles and crab shell particles in europium uptake from aqueous solutions through biosorption: Synthesis and characterization. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 95, 232–240.
- Cailleux, A., 1943. Distinction des sables marins et fluviatiles. *Bull. Société Géologique Fr.* S5-XIII, 125–138. <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.S5-XIII.4-6.125>
- Campaña, I., Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Bermúdez de Castro, J.M., Carbonell, E., 2016. Assessing automated image analysis of sand grain shape to identify sedimentary facies, Gran Dolina archaeological site (Burgos, Spain). *Sediment. Geol.* 346, 72–83. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.09.010>
- Carlo Erba Reagents, n.d. Sand purified RS - For flash chromatography [WWW Document]. URL <https://www.carloerbareagents.com/en/catalog/product/view/id/422820/category/28637> (accessed 10.20.17).
- Carter, J.E.H., Owens, P.N., Walling, D.E., Leeks, G.J.L., 2003. Fingerprinting suspended sediment sources in a large urban river system. *Sci. Total Environ.* 314–316, 513–534. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(03\)00071-8](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00071-8)

- Cashman, M.J., Gellis, A., Sanisaca, L.G., Noe, G.B., Cogliandro, V., Baker, A., 2018. Bank-derived material dominates fluvial sediment in a suburban Chesapeake Bay watershed. *River Res. Appl.* 34, 1032–1044. <https://doi.org/10.1002/rra.3325>
- Casin, P., 1996. L'analyse en composantes principales généralisée. *Rev. Stat. Appliquée* 44, 63–81.
- Castella-Müller, J., Antoine, C., Knispel, S., Castella, E., 1998. Physico—chemical and sediment characteristics of small water bodies in a fringing wetland (Lake Neuchâtel, Switzerland). *SIL Proc. 1922-2010* 27, 3438–3439. <https://doi.org/10.1080/03680770.1998.11902466>
- Chedeville, 2015. Étude de la variabilité du fonctionnement hydro-sédimentaire des karsts de l'Ouest du Bassin de Paris à partir de la comparaison des remplissages sédimentaires karstiques anciens, actuels et du signal turbide des eaux souterraines. Université de Rouen.
- Chessel, D., Hanafi, M., 1996. Analyses de la co-inertie de K-nuages de points. *Rev. Stat. Appliquée* 44, 35–60.
- Clark, 1981. Quantitative Shape Analysis: A Review. *Math. Geol.* 13, 303–320.
- Cojan, Renard, 2013. *Sédimentologie*. Dunod.
- Collins, A., Walling, D., 2002. Selecting Fingerprint Properties for Discriminating Potential Suspended Sediment Sources in River Basins. *J. Hydrol.* 261, 218–244. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00011-2)
- Collins, A., Zhang, Y., McChesney, D., Walling, D., Haley, S., Smith, P., 2011. Sediment source tracing in a lowland agricultural catchment in southern England using a modified procedure combining statistical analysis and numerical modelling. *Sci. Total Environ.* 414, 301–17. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.10.062>
- Collins, A.L., Walling, D.E., Leeks, G.J.L., 1997a. Use of the geochemical record preserved in floodplain deposits to reconstruct recent changes in river basin sediment sources. *Geomorphology* 19, 151–167. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(96\)00044-X](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(96)00044-X)
- Collins, A.L., Walling, D.E., Leeks, G.J.L., 1997b. Source type ascription for fluvial suspended sediment based on a quantitative composite fingerprinting technique. *CATENA* 29, 1–27. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(96\)00064-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(96)00064-1)
- Collins, A.L., Walling, D.E., Sickingabula, H.M., Leeks, G.J.L., 2001. Suspended sediment source fingerprinting in a small tropical catchment and some management implications. *Appl. Geogr.* 21, 387–412. [https://doi.org/10.1016/S0143-6228\(01\)00013-3](https://doi.org/10.1016/S0143-6228(01)00013-3)
- Collins, A.L., Zhang, Y., McChesney, D., Walling, D.E., Haley, S.M., Smith, P., 2012. Sediment source tracing in a lowland agricultural catchment in southern England using a modified procedure combining statistical analysis and numerical modelling. *Sci. Total Environ.* 414, 301–317. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.10.062>
- Copard, Y., Eyrolle, F., Radakovitch, O., Poirel, A., Raimbault, P., Gairoard, S., Di-Giovanni, C., 2018. Badlands as a hot spot of petrogenic contribution to riverine particulate organic carbon to the Gulf of Lion (NW Mediterranean Sea): POC flux from badlands to the NW Mediterranean sea. *Earth Surf. Process. Landf.* 43, 2495–2509. <https://doi.org/10.1002/esp.4409>
- Corder, G.W., Foreman, D.I., 2014. *Nonparametric Statistics: A Step-by-Step Approach*. John Wiley & Sons.
- Coulon et al., 2015. Morpho-granular approach to characterize harbour sediments and their agglomeration/dispersion behaviour. *Powder Technol.* 275, 139–151.
- Cox, E.P., 1927. A Method of Assigning Numerical and Percentage Values to the Degree of Roundness of Sand Grains. *J. Paleontol.* 1, 179–183.
- Culture Collection of Algae (SAG), G.-A.-U.G.-, n.d. Culture Collection of Algae (SAG) - Georg-August-Universität Göttingen [WWW Document]. URL <https://www.uni-goettingen.de/en/184982.html> (accessed 10.20.17).
- Czajkowska et al., 2015. Determination of coating thickness of minitablets and pellets by dynamic image analysis. *Int. J. Pharm.* 495, 347–353. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2015.08.102>
- Danger, M., Allard, B., Arnous, M.B., Carrias, J.-F., Mériquet, J., Ten-Hage, L., Lacroix, G., 2012. Effects of food-web structure on the quantity and the elemental quality of sedimenting material in shallow lakes. *Hydrobiologia* 679, 251–266. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0890-2>
- Das, 2007. Modeling 3D shape of sand grains using discrete element method. University of South Florida.
- Davis, C.M., Fox, J.F., 2009. Sediment Fingerprinting: Review of the Method and Future Improvements for Allocating Nonpoint Source Pollution. *J. Environ. Eng.* 135, 490–504. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2009\)135:7\(490\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2009)135:7(490))
- Debret, M., Sebag, D., Desmet, M., Balsam, W., Copard, Y., Mourier, B., Susperrigui, A.-S., Arnaud, F., Bentaleb, I., Chapron, E., Lallier-Vergès, E., Winiarski, T., 2011. Spectrocolorimetric interpretation of sedimentary dynamics: The new “Q7/4 diagram.” *Earth-Sci. Rev.* 109, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.07.002>

- Dolédéc, S., Chessel, D., 1994. Co-inertia analysis: an alternative method for studying species–environment relationships. *Freshw. Biol.* 31, 277–294. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.1994.tb01741.x>
- Dominik, J., Burrus, D., Vernet, J.-P., 1987. Transport of the environmental radionuclides in an alpine watershed. *Earth Planet. Sci. Lett.* 84, 165–180. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(87\)90083-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(87)90083-5)
- Donaldson, G., Goff, J., Chagué, C., Gadd, P., Fierro, D., 2019. The Waikari River tsunami: New Zealand’s largest historical tsunami event. *Sediment. Geol.* 383, 148–158. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2019.02.006>
- Dray, S., Chessel, D., Thioulouse, J., 2003. Co-Inertia analysis and the linking of ecological data tables. *Ecology* 84, 3078–3089. <https://doi.org/10.1890/03-0178>
- Droppo, I.G., 2001. Rethinking what constitutes suspended sediment. *Hydrol. Process.* 15, 1551–1564. <https://doi.org/10.1002/hyp.228>
- Du, P., Walling, D., 2016. Fingerprinting surficial sediment sources: Exploring some potential problems associated with the spatial variability of source material properties. *J. Environ. Manage.* 194. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.05.066>
- Dupont, J., Lafite, R., 1986. Importance et role du materiel organique vivant et inerte dans les suspensions de la Baie de Seine, in: ResearchGate. Presented at the La Baie de Seine (GRECO-MANCHE), IFREMER. Actes de Colloques n. 4, Université de Caen, p. 155 à 162.
- Dur et al., 2004. The relationship between particle-size distribution by laser granulometry and image analysis by transmission electron microscopy in a soil clay fraction. *Eur. J. Soil Sci.* 55, 265–270. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2004.00597.x>
- Duran, 2015. Approches physique, conceptuelle et statistique du fonctionnement hydrologique d’un karst sous couverture. Université de Rouen.
- Đuriš et al., 2016. Optimal pixel resolution for sand particles size and shape analysis. *Powder Technol.* 302, 177–186.
- Dussart, L., Jouenne, T., Massei, N., Lerch, T., Wang, H., Junter, G., Dupont, J., Lacroix, M., 2001. Physiological modifications of bacteria fixed on suspended material as hydrological tracers ? New Approaches Charact. *Groundw. Flow.*
- Eggers, M.D., Ehrlich, R.N., 2006. CHANGES OF FINE QUARTZ SANDS IN GLACIAL AND INTERGLACIAL INTERVALS OF THE FENI AND GARDAR DRIFTS , NORTH ATLANTIC : FOURIER SHAPE ANALYSIS 1.
- Eisma, D., Schuhmacher, T., Boekel, H., Van Heerwaarden, J., Franken, H., Laan, M., Vaars, A., Eijgenraam, F., Kalf, J., 1990. A camera and image-analysis system for in situ observation of flocs in natural waters. *Neth. J. Sea Res.* 27, 43–56. [https://doi.org/10.1016/0077-7579\(90\)90033-D](https://doi.org/10.1016/0077-7579(90)90033-D)
- Essington, T.E., Carpenter, S.R., 2000. Mini-Review: Nutrient Cycling in Lakes and Streams: Insights from a Comparative Analysis. *Ecosystems* 3, 131–143. <https://doi.org/10.1007/s100210000015>
- Evrard, O., Némery, J., Gratiot, N., Duvert, C., Ayrault, S., Lefevre, I., Poulenard, J., Prat, C., Bonté, P., Esteves, M., 2010. Sediment dynamics during the rainy season in tropical highland catchments of central Mexico using fallout radionuclides. *Geomorphology* 124, 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.08.007>
- Evrard, O., Poulenard, J., Némery, J., Ayrault, S., gratiot, nicolas, Duvert, C., Prat, C., Lefèvre, I., Bonté, P., Esteves, M., 2013. Tracing sediment sources in a tropical highland catchment of central Mexico by using conventional and alternative fingerprinting methods. *Hydrol. Process.* 27. <https://doi.org/10.1002/hyp.9421>
- Fettweis, M., Baeye, M., Lee, B.J., Chen, P., Yu, J.C.S., 2012. Hydro-meteorological influences and multimodal suspended particle size distributions in the Belgian nearshore area (southern North Sea). *Geo-Mar. Lett.* 32, 123–137. <https://doi.org/10.1007/s00367-011-0266-7>
- Flury, B., 1986. Proportionality of  $\Sigma k\Sigma$  covariance matrices. *Stat. Probab. Lett.* 4, 29–33.
- Folk, R.L., 1969. Toward Greater Precision in Rock-Color Terminology. *GSA Bull.* 80, 725–728. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1969\)80\[725:TGPIRT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1969)80[725:TGPIRT]2.0.CO;2)
- Folk, Ward, 1957. A study in the significance of grain size parameters. *J. Sediment. Petrol.* 27, 3–26. <https://doi.org/10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- Ford, D., Williams, P., 2013. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118684986.ch2>
- Foster, I.D.L., Lees, J.A., Owens, P.N., Walling, D.E., 1998. Mineral magnetic characterization of sediment sources from an analysis of lake and floodplain sediments in the catchments of the Old Mill reservoir and Slapton Ley, South Devon, UK. *Earth Surf. Process. Landf.* 23, 685–703. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199808\)23:8<685::AID-ESP873>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199808)23:8<685::AID-ESP873>3.0.CO;2-8)
- Fournier, 2012. Analyses granulométriques - principes et méthodes. CNRS.

- Fournier, 2006. Identification des modes de transports et de la vulnérabilité du karst de la craie. Application de nouveaux outils statistiques d'analyse des données aux système du Hannebott. Université de Rouen.
- Fournier, M., Massei, N., Mahler, B.J., Bakalowicz, M., Dupont, J.P., 2008. Application of multivariate analysis to suspended matter particle size distribution in a karst aquifer. *Hydrol. Process.* 22, 2337–2345. <https://doi.org/10.1002/hyp.6828>
- Fournier, M., Motelay-Massei, A., Massei, N., Aubert, M., Bakalowicz, M., Dupont, J.P., 2009. Investigation of Transport Processes inside Karst Aquifer by Means of STATIS. *Ground Water* 47, 391–400. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2008.00532.x>
- Franco, F., Pérez-Maqueda, L.A., Pérez-Rodríguez, J.L., 2004. The effect of ultrasound on the particle size and structural disorder of a well-ordered kaolinite. *J. Colloid Interface Sci.* 274, 107–117. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2003.12.003>
- Gellis, A.C., Fuller, C.C., Van Metre, P., Filstrup, C.T., Tomer, M.D., Cole, K.J., Sabitov, T.Y., 2019. Combining sediment fingerprinting with age-dating sediment using fallout radionuclides for an agricultural stream, Walnut Creek, Iowa, USA. *J. Soils Sediments* 19, 3374–3396. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2168-z>
- Gellis, A.C., Sanisaca, L.G., 2018. Sediment Fingerprinting to Delineate Sources of Sediment in the Agricultural and Forested Smith Creek Watershed, Virginia, USA. *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.* 54, 1197–1221. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12680>
- Gorman Sanisaca, L.E., Gellis, A.C., Lorenz, D.L., 2017. Determining the sources of fine-grained sediment using the Sediment Source Assessment Tool (Sed\_SAT) (USGS Numbered Series No. 2017–1062), Open-File Report. U.S. Geological Survey, Reston, VA.
- Grimshaw, D.L., Lewin, J., 1980. Source identification for suspended sediments. *J. Hydrol.* 47, 151–162. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(80\)90053-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(80)90053-0)
- Grosjean et al., 2004. Enumeration, measurement, and identification of net zooplankton samples using the ZOOSCAN digital imaging system. *J. Mar. Sci.* 61, 518–525. <https://doi.org/10.1016/j.jicesjms.2004.03.012>
- Gruszowski, K.E., Foster, I.D.L., Lees, J.A., Charlesworth, S.M., 2003. Sediment sources and transport pathways in a rural catchment, Herefordshire, UK. *Hydrol. Process.* 17, 2665–2681. <https://doi.org/10.1002/hyp.1296>
- Haddadchi, A., Olley, J., Laceby, P., 2014. Accuracy of mixing models in predicting sediment source contributions. *Sci. Total Environ.* 497–498, 139–152. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.105>
- Haddadchi, A., Ryder, D., Evrard, O., Olley, J., 2013. Sediment fingerprinting in fluvial systems: review of tracers, sediment sources and mixing models. *Int. J. Sediment Res.* 28, 560–578. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(14\)60013-5](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(14)60013-5)
- Hallin, C., Almström, B., Larson, M., Hanson, H., 2019. Longshore Transport Variability of Beach Face Grain Size: Implications for Dune Evolution. *J. Coast. Res.* 35, 751–764. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-18-00153.1>
- Hawley, N., Robbins, J.A., Eadie, B.J., 1986. The partitioning of 7beryllium in fresh water. *Geochim. Cosmochim. Acta* 50, 1127–1131. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(86\)90393-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(86)90393-5)
- He, H., Courard, L., Pirard, E., Michel, F., 2016. SHAPE ANALYSIS OF FINE AGGREGATES USED FOR CONCRETE. *Image Anal. Stereol.* 35, 159–166. <https://doi.org/10.5566/ias.1400>
- He, Q., Walling, D.E., 1996. Interpreting particle size effects in the adsorption of 137Cs and unsupported 210Pb by mineral soils and sediments. *J. Environ. Radioact.* 30, 117–137. [https://doi.org/10.1016/0265-931X\(96\)89275-7](https://doi.org/10.1016/0265-931X(96)89275-7)
- Helland, P.E., Huang, P.-H., Diffendal, R.F., 1997. SEM Analysis of Quartz Sand Grain Surface Textures Indicates Alluvial/Colluvial Origin of the Quaternary “Glacial” Boulder Clays at Huangshan (Yellow Mountain), East-Central China. *Quat. Res.* 48, 177–186. <https://doi.org/10.1006/qres.1997.1916>
- Hill, M.O., Smith, A.J.E., 1976. Principal Component Analysis of Taxonomic Data with Multi-State Discrete Characters. *Taxon* 25, 249–255. <https://doi.org/10.2307/1219449>
- Hill, P.S., Syvitski, J.P., Cowan, E.A., Powell, R.D., 1998. In situ observations of flocc settling velocities in Glacier Bay, Alaska. *Mar. Geol.* 145, 85–94. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(97\)00109-6](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(97)00109-6)
- Hjulström, F., 1935. Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. Inaugural dissertation., Almqvist & Wiksells, Uppsala.
- Horowitz, A.J., 1991. primer on sediment-trace element chemistry. Lewis Publishers.
- Husson, Josse, Pages, 2010. Principal component methods - hierarchical clustering - partitional clustering: why would we need to choose for visualizing data? Agrocampus.

- Ilic et al., 2015. Size and shape particle analysis by applying image analysis and laser diffraction of Inhalable dust in a dental laboratory. *Measurement* 66, 109–117.
- International Humic Substances Society | IHSS, n.d. Source Materials for IHSS Samples. URL <http://humic-substances.org/source-materials-for-ihss-samples/> (accessed 10.20.17).
- ISO, I.O. for S., 2008. ISO 9276-6 Representation of particle Size - descriptive and quantitative representation of particle shape and morphology.
- ISO, I.O. for S., 2004. ISO 13322-1 Particle size analysis — Image analysis methods — Static image analysis methods.
- Jia, Y., Liu, X., Zhang, S., Shan, H., Zheng, J., 2019. Sediment Resuspension Process in the Modern Yellow River Delta, in: Jia, Y., Liu, X., Zhang, S., Shan, H., Zheng, J. (Eds.), *Wave-Forced Sediment Erosion and Resuspension in the Yellow River Delta*, Springer Oceanography. Springer Singapore, Singapore, pp. 123–162. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-7032-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-13-7032-8_5)
- Jolliffe, I.T., 1986. Principal Component Analysis and Factor Analysis, in: *Principal Component Analysis*, Springer Series in Statistics. Springer, New York, NY, pp. 115–128. [https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1904-8\\_7](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1904-8_7)
- Kapui, Z., Kereszturi, A., Kiss, K., Szalai, Z., Újvári, G., Hickman-Lewis, K., Foucher, F., Westall, F., 2018. Fluvial or aeolian grains? Separation of transport agents on Mars using earth analogue observations. *Planet. Space Sci., Interdisciplinary observation and understanding of the Solar System* 163, 56–76. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2018.06.007>
- Kaufman, L., Rousseeuw, P.J., 1990. Partitioning Around Medoids (Program PAM), in: *Finding Groups in Data*. John Wiley & Sons, Inc., pp. 68–125. <https://doi.org/10.1002/9780470316801.ch2>
- Kennedy, S.K., Ehrlich, R., 1985. Origin of shape changes of sand and silt in a high-gradient stream system. *J. Sediment. Res.* 55, 57–64. <https://doi.org/10.1306/212F8607-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Koiter, A.J., Owens, P.N., Petticrew, E.L., Lobb, D.A., 2013. The behavioural characteristics of sediment properties and their implications for sediment fingerprinting as an approach for identifying sediment sources in river basins. *Earth-Sci. Rev.* 125, 24–42. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.05.009>
- Krein, A., Petticrew, E., Udelhoven, T., 2003. The use of fine sediment fractal dimensions and colour to determine sediment sources in a small watershed. *CATENA* 53, 165–179. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(03\)00021-3](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(03)00021-3)
- Kronvang, B., Laubel, A., Larsen, S.E., Friberg, N., 2003. Pesticides and heavy metals in Danish streambed sediment. *Hydrobiologia* 494, 93–101. <https://doi.org/10.1023/A:1025441610434>
- Krumbein, 1941. Measurement and Geological Significance of Shape and Roundness of Sedimentary Particles. *J. Sediment. Res. Vol. 11*. <https://doi.org/10.1306/D42690F3-2B26-11D7-8648000102C1865D>
- Krumbein, W., Pettijohn, F., 1938. *Manual of Sedimentary Petrography*, Appleton-Century-Crofts: New York. ed.
- Lacroix, M., Rodet, J., Wang, H.Q., Masséi, N., Dupont, J.-P., 2000. Origine des matières en suspension dans un système aquifère karstique : apports de la microgranulométrie. *Comptes Rendus Académie Sci. - Ser. IIA - Earth Planet. Sci.* 330, 347–354. [https://doi.org/10.1016/S1251-8050\(00\)00161-0](https://doi.org/10.1016/S1251-8050(00)00161-0)
- Lal, R., 2003. Soil erosion and the global carbon budget. *Environ. Int.* 29, 437–450. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00192-7](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00192-7)
- Lamba, J., Karthikeyan, K.G., Thompson, A.M., 2015. Apportionment of suspended sediment sources in an agricultural watershed using sediment fingerprinting. *Geoderma* 239–240, 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.09.024>
- Lavit, C., Escoufier, Y., Sabatier, R., Traissac, P., 1994. The ACT (STATIS method). *Comput. Stat. Data Anal.* 18, 97–119. [https://doi.org/10.1016/0167-9473\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0167-9473(94)90134-1)
- Le Cloarec, M.-F., Bonté, P., Lefèvre, I., Mouchel, J.-M., Colbert, S., 2007. Distribution of <sup>7</sup>Be, <sup>210</sup>Pb and <sup>137</sup>Cs in watersheds of different scales in the Seine River basin: Inventories and residence times. *Sci. Total Environ., Human activity and material fluxes in a regional river basin: the Seine River watershed* 375, 125–139. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.020>
- Le Gall, M., Evrard, O., Foucher, A., Laceby, P., Salvador-Blanes, S., ThiL, F., Dapoigny, A., Lefevre, I., Cerdanc, o, Ayrault, S., 2016. Quantifying sediment sources in a lowland agricultural catchment pond using <sup>137</sup>Cs activities and radiogenic <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ratios. *Sci. Total Environ.* 566–567, 968–980. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.093>
- Le Roux, J.J., Sumner, P.D., Lorentz, S.A., Germishuys, T., 2013. Connectivity aspects in sediment migration modelling using the Soil and Water Assessment Tool. *Geosciences* 3, 1–12.

- Lee, B.J., Fettweis, M., Toorman, E., Molz, F.J., 2012. Multimodality of a particle size distribution of cohesive suspended particulate matters in a coastal zone. *J. Geophys. Res. Oceans* 117. <https://doi.org/10.1029/2011JC007552>
- Legendre, P., 2019. Numerical Ecology, in: Fath, B. (Ed.), *Encyclopedia of Ecology* (Second Edition). Elsevier, Oxford, pp. 487–493. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10595-0>
- Legout, C., Poulencard, J., Nemery, J., Navratil, O., Grangeon, T., Evrard, O., Esteves, M., 2013. Quantifying suspended sediment sources during runoff events in headwater catchments using spectrophotometry. *J. Soils Sediments* 13, 1478–1492. <https://doi.org/10.1007/s11368-013-0728-9>
- Leibrandt et al., 2015. Towards fast and routine analyses of volcanic ash morphometry for eruption surveillance applications. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 297, 11–27.
- Lemma, H., Nyssen, J., Frankl, A., Poesen, J., Adgo, E., Billi, P., 2019. Bedload transport measurements in the Gilgel Abay River, Lake Tana Basin, Ethiopia. *J. Hydrol.* 577, 123968. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123968>
- Lepillier, M., 1975. Le système karstique de Villequier (Seine Maritime) - étude hydrogéologique, hydrochimique et sédimentologique d'une circulation souterraine typique du Crétacé supérieur normand (Bull. trim. S.G.N.A.M.H. LXII (2)).
- Leroy et al., 2011. Optical analysis of particle size and chromite liberation from pulp samples of a UG2 ore regrinding circuit. *Miner. Eng.* 24, 1340–1347.
- Li, J.-W., Ye, W., Zhang, G.-L., Zhu, L.-D., Jiang, Y.-J., Gong, Z.-T., 2013. Grain Size Evidence of Multiple Origins of Red Clays in the Jinhua-Quzhou Basin, South China. *Pedosphere* 23, 686–695. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(13\)60061-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60061-2)
- Lim, K.-J., Choi, J.-D., Kim, K.-S., Sagong, M., Engel, B.A., 2003. Development of Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control (SATEEC) in Small Scale Watershed. *Mag. Korean Soc. Agric. Eng.* 45, 85–96.
- Liu et al., 2015. Optimising shape analysis to quantify volcanic ash morphology. *GeoResJ* 8, 14–30. <https://doi.org/10.1016/j.grj.2015.09.001>
- M. Mosquera-Fernández et al., 2016. Quantitative image analysis to characterize the dynamics of *Listeria monocytogenes* biofilms. *Int. J. Food Microbiol.* 236, 130–137. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.07.015>
- Malvern Instruments, 2015. A basic guide to particle characterization.
- Martínez-Carreras, N., Udelhoven, T., Krein, A., Gallart, F., Iffly, J.F., Ziebel, J., Hoffmann, L., Pfister, L., Walling, D., 2010. The Use of Sediment Colour Measured by Diffuse Reflectance Spectrometry to Determine Sediment Sources: Application to the Attert River Catchment (Luxembourg). *J. Hydrol.* 49–63. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.12.017>
- Massei, 2001. Transport de particules en suspension dans l'aquifère crayeux karstique et à l'interface craie-alluvions. Université de Rouen.
- Massei, N., Fournier, M., Lattelais, C., Dupont, 2019. Variabilité des eaux souterraines dans l'aquifère de la craie du bassin de Paris.
- Mazzullo, J., Ehrlich, R., Pilkey, O.H., 1982. Local and distal origin of sands in the Hatteras Abyssal Plain. *Mar. Geol.* 48, 75–88. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(82\)90130-X](https://doi.org/10.1016/0025-3227(82)90130-X)
- McCully, P., 2001. *Silenced Rivers: The Ecology and Politics of Large Dams: Enlarged and Updated Edition*, Enlarged&Updated edition. ed. Zed Books, London ; New York.
- McKight, P.E., Najab, J., 2010. Kruskal-Wallis Test, in: *The Corsini Encyclopedia of Psychology*. American Cancer Society, pp. 1–1. <https://doi.org/10.1002/9780470479216.corpsy0491>
- Meyers, P.A., 2003. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: a summary of examples from the Laurentian Great Lakes. *Org. Geochem.* 34, 261–289. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00168-7](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00168-7)
- Meyers, P.A., Ishiwatari, R., 1993. Lacustrine organic geochemistry—an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. *Org. Geochem.* 20, 867–900. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(93\)90100-P](https://doi.org/10.1016/0146-6380(93)90100-P)
- Mikkelsen et al., 2005. In situ particle size distributions and volume concentrations from a LISST-100 laser particle sizer and a digital floc camera. *Cont. Shelf Res.* 25, 1959–1978. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2005.07.001>
- Milligan, 1996. IN SITU PARTICLE (FLOC) SIZE MEASUREMENTS WITH THE BENTHOS 373 PLANKTON SILHOUETTE CAMERA. *J. Sea Res.* 36, 93–100.
- Milliman, J.D., Meade, R.H., 1983. World-Wide Delivery of River Sediment to the Oceans. *J. Geol.* 91, 1–21. <https://doi.org/10.1086/628741>

- Mingard et al., 2009. A National Measurement Good Practice Guide : Improving the consistency of particle size measuring, Measurement good practice guide.
- Molinaroli, E., Guerzoni, S., Sarretta, A., Cucco, A., Umgiesser, G., 2007. Links between hydrology and sedimentology in the Lagoon of Venice, Italy. *J. Mar. Syst.* 68, 303–317. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2006.12.003>
- Motha, J.A., Wallbrink, P.J., Hairsine, P.B., Grayson, R.B., 2004. Unsealed roads as suspended sediment sources in an agricultural catchment in south-eastern Australia. *J. Hydrol.* 286, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.07.006>
- Mukundan, R., Walling, D.E., Gellis, A.C., Slattery, M.C., Radcliffe, D.E., 2012. Sediment Source Fingerprinting: Transforming From a Research Tool to a Management Tool1. *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.* 48, 1241–1257. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2012.00685.x>
- Munsell, A.H., 1905. A Color Notation. G. H. Ellis Company.
- Murtagh, F., Legendre, P., 2014. Ward's Hierarchical Clustering Method: Clustering Criterion and Agglomerative Algorithm. *J. Classif.* 31, 274–295. <https://doi.org/10.1007/s00357-014-9161-z>
- Newcombe, C.P., Jensen, J.O.T., 1996. Channel Suspended Sediment and Fisheries: A Synthesis for Quantitative Assessment of Risk and Impact. *North Am. J. Fish. Manag.* 16, 693–727. [https://doi.org/10.1577/1548-8675\(1996\)016<0693:CSSAFA>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8675(1996)016<0693:CSSAFA>2.3.CO;2)
- Olley, J.M., Murray, A.S., Mackenzie, D.H., Edwards, K., 1993. Identifying sediment sources in a gullied catchment using natural and anthropogenic radioactivity. *Water Resour. Res.* 29, 1037–1043. <https://doi.org/10.1029/92WR02710>
- Olson, 1981. Archaeology: Lessons on future soil use. *J. Soil Water Conserv.* 36, 261–264.
- Olson et al., 2011. Particle shape factors and their use in image analysis – part1 : theory. *J. GXP Compliance* 15, 85–96.
- Ongley, E.D., Bynoe, M.C., 1982. Physical and geochemical characteristics of suspended solids, Wilton Creek, Ontario. *Hydrobiologia* 91–92, 41–57. <https://doi.org/10.1007/BF00940095>
- Palazón, L., Latorre, B., Gaspar, L., Blake, W.H., Smith, H.G., Navas, A., 2015. Comparing catchment sediment fingerprinting procedures using an auto-evaluation approach with virtual sample mixtures. *Sci. Total Environ.* 532, 456–466. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.003>
- Passega, 1957. Texture as Characteristic of Clastic Deposition. *AAPG Bull.* 41. <https://doi.org/10.1306/0bda594e-16bd-11d7-8645000102c1865d>
- Patault, E., 2018. Analyse multi-échelle des processus d'érosion hydrique et de transferts sédimentaires en territoire agricole : exemple du bassin versant de la Canche (France). Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Lille Douai.
- Patault, E., Alary, C., Franke, C., Abriak, N.-E., 2019. Quantification of tributaries contributions using a confluence-based sediment fingerprinting approach in the Canche river watershed (France). *Sci. Total Environ.* 668, 457–469. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.458>
- Pérez-Maqueda, L.A., Duran, A., Pérez-Rodríguez, J.L., 2005. Preparation of submicron talc particles by sonication. *Appl. Clay Sci., EUROCLAY 2003* 28, 245–255. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2004.01.012>
- Perugini et al., 2011. Application of fractal fragmentation theory to natural pyroclastic deposits: Insights into volcanic explosivity of the Valentano scoria cone (Italy). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 202, 200–210.
- Phillips, J.D., Marion, D.A., 2001. Residence times of alluvium in an east Texas stream as indicated by sediment color. *CATENA* 45, 49–71. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00139-4](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00139-4)
- Phillips, J.M., Russell, M.A., Walling, D.E., 2000. Time-integrated sampling of fluvial suspended sediment: a simple methodology for small catchments. *Hydrol. Process.* 14, 2589–2602. [https://doi.org/10.1002/1099-1085\(20001015\)14:14<2589::AID-HYP94>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/1099-1085(20001015)14:14<2589::AID-HYP94>3.0.CO;2-D)
- Pirard, E., 1993. Morphométrie Euclidienne des Figures Planes - Application à l'analyse des matériaux granulaires. Université de Liège, Liège, Belgique.
- Pirard et al., 2005. Sensitivity of particle size and shape parameters with respect to digitization.
- Pleuvret, 1997. Etude D'environnement Préalable À La Définition Des Périmètres de Protection Du Captage de Norville.
- Podczec, 1997. A shape factor to assess the shape of particles using image analysis. *Powder Technol.* 93, 47–53.
- Poli, A.L., Batista, T., Schmitt, C.C., Gessner, F., Neumann, M.G., 2008. Effect of sonication on the particle size of montmorillonite clays. *J. Colloid Interface Sci.* 325, 386–390. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.06.016>

- Post, D.F., Bryant, R.B., Batchily, A.K., Huete, A.R., Levine, S.J., Mays, M.D., Escadafal, R., 1993. Correlations Between Field and Laboratory Measurements of Soil Color. *Soil Color sssaspecialpubl*, 35–49. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub31.c3>
- Poulenard, J., Perrette, Y., Fanget, B., Quetin, P., Trevisan, D., Jean Marcel, D., 2009. Infrared Spectroscopy Tracing of Sediment Sources in a Small Rural Watershed (French Alps). *Sci. Total Environ.* 407, 2808–19. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.049>
- Pulley, S., Goubet, A., Moser, I., Browning, S., Collins, A.L., 2019. The sources and dynamics of fine-grained sediment degrading the Freshwater Pearl Mussel (*Margaritifera margaritifera*) beds of the River Torridge, Devon, UK. *Sci. Total Environ.* 657, 420–434. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.401>
- Rabinski et al., 2004. Dynamic digital image analysis: emerging technology for particle characterization. *Water Sci. Technol.* 50, 19–26.
- Rinne, 2015. Particle Characterisation Using Image Analysis Tools - Improving and developing methods for polyolefin catalysts. Helsinki Metropolia University of Applied Sciences.
- Ripley, 1996. Linear discriminant analysis, in: *Pattern Recognition and Neural Networks | Computational Statistics, Machine Learning and Information Science*. Cambridge University Press, pp. 91–120.
- Rodet, J., Chedeville, S., Laignel, B., 2013. Contraintes hydro-karstiques et dynamique sédimentaire associée. Presented at the 17èmes Journées de Spéléologie Scientifique, Han sur Lesse (Belgique).
- Rodriguez et al., 2013. Particle Shape Quantities and Measurement Techniques—A Review. *Electron. J. Geotech. Eng.* 18.
- Russell, M.A., Walling, D.E., Hodgkinson, R.A., 2001. Suspended sediment sources in two small lowland agricultural catchments in the UK. *J. Hydrol.* 252, 1–24. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00388-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00388-2)
- Sánchez-Soto, P.J., Haro, M. del C.J. de, Pérez-Maqueda, L.A., Varona, I., Pérez-Rodríguez, J.L., 2000. Effects of Dry Grinding on the Structural Changes of Kaolinite Powders. *J. Am. Ceram. Soc.* 83, 1649–1657. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01444.x>
- Saporta, G., 2011. Probabilités, analyse des données et statistique. editions technip.
- Saunders, K.M., Kamenik, C., Hodgson, D.A., Hunziker, S., Siffert, L., Fischer, D., Fujak, M., Gibson, J.A.E., Grosjean, M., 2012. Late Holocene changes in precipitation in northwest Tasmania and their potential links to shifts in the Southern Hemisphere westerly winds. *Glob. Planet. Change* 92–93, 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.04.005>
- Schmid, T., Rodríguez-Rastrero, M., Escribano, P., Palacios-Orueta, A., Ben-Dor, E., Plaza, A., Milewski, R., Huesca, M., Bracken, A., Cicuéndez, V., Pelayo, M., Chabrilat, S., 2016. Characterization of Soil Erosion Indicators Using Hyperspectral Data From a Mediterranean Rainfed Cultivated Region. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 9, 845–860. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2462125>
- Sellier, V., Navratil, O., Lacey, J.P., Allenbach, M., Lefèvre, I., Evrard, O., 2020. Investigating the use of fallout and geogenic radionuclides as potential tracing properties to quantify the sources of suspended sediment in a mining catchment in New Caledonia, South Pacific. *J. Soils Sediments* 20, 1112–1128. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02447-8>
- Shang, Y., Kaakinen, A., Beets, C.J., Prins, M.A., 2018. Aeolian silt transport processes as fingerprinted by dynamic image analysis of the grain size and shape characteristics of Chinese loess and Red Clay deposits. *Sediment. Geol., Analysis of sediment properties* 375, 36–48. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2017.12.001>
- Shen et al., 2013. Coagulation behaviors and in-situ flocs characteristics of composite coagulants in cyanide-containing wastewater: Role of cationic polyelectrolyte. *Sci. CHINA Chem.* 56, 1765–1774.
- Sherriff, S.C., Franks, S.W., Rowan, J.S., Fenton, O., Ó'hUallacháin, D., 2015. Uncertainty-based assessment of tracer selection, tracer non-conservativeness and multiple solutions in sediment fingerprinting using synthetic and field data. *J. Soils Sediments* 15, 2101–2116. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1123-5>
- Sinawi, G., Walling, D., 1996. The characteristics of composite suspended sediment particles transported during storm events in the river Exe, Devon, U.K. *Géomorphologie Relief Process. Environ.* 2, 29–40. <https://doi.org/10.3406/morfo.1996.876>
- Slimani, S., 2009. Les Fonctionnements hydrologiques de l'aquifère karstifié de la Craie de Haute-Normandie : conséquences des contextes morphologiques et structuraux (thesis). Rouen.
- Smith, H.G., Evrard, O., Blake, W.H., Owens, P.N., 2015. Preface—Addressing challenges to advance sediment fingerprinting research. *J. Soils Sediments* 15, 2033–2037. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1231-2>

- Sochan et al., 2015. Selection of shape parameters that differentiate sand grains, based on the automatic analysis of two-dimensional images. *Sediment. Geol.* 327, 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2015.07.007>
- Stanimirova, I., Walczak, B., Massart, D.L., Simeonov, V., Saby, C.A., Di Crescenzo, E., 2004. STATIS, a three-way method for data analysis. Application to environmental data. *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 73, 219–233. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2004.03.005>
- Stone, M., English, M.C., 1993. Geochemical composition, phosphorus speciation and mass transport of fine-grained sediment in two Lake Erie tributaries, in: Boers, P.C.M., Cappenberg, Th.E., van Raaphorst, W. (Eds.), *Proceedings of the Third International Workshop on Phosphorus in Sediments, Developments in Hydrobiology*. Springer Netherlands, pp. 17–29.
- Sundborg, Maza, Pemberton, Romanovsky, White, 1982. Sedimentation problems in river basins. *International Hydrological Programme UNESCO*, Paris.
- Tafesse et al., 2013. Evaluation of image analysis methods used for quantification of particle angularity. *Sedimentology* 60, 1100–1110. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2012.01367.x>
- Theuring, P., Collins, A., Rode, M., 2015. Source identification of fine-grained suspended sediment in the Kharaa River basin, northern Mongolia. *Sci. Total Environ.* 526, 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.134>
- Tiecher, T., Caner, L., Gomes Minella, J., Rheinheimer dos Santos, D., 2015. Combining visible-based-color parameters and geochemical tracers to improve sediment source discrimination and apportionment. *Sci. Total Environ.* 527–528, 135–149. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.103>
- Tyler, J., Kashiya, Y., Ohkouchi, N., Ogawa, N., Yokoyama, Y., Chikaraishi, Y., Staff, R.A., Ikehara, M., Bronk Ramsey, C., Bryant, C., Brock, F., Gotanda, K., Haraguchi, T., Yonenobu, H., Nakagawa, T., 2010. Tracking aquatic change using chlorine-specific carbon and nitrogen isotopes: The last glacial-interglacial transition at Lake Suigetsu, Japan. *Geochem. Geophys. Geosystems* 11, Q09010. <https://doi.org/10.1029/2010GC003186>
- Tysmans, D., Claeys, P., Deriemaeker, L., Maes, D., Finsy, R., Molle, M.V., 2006. Size and Shape Analysis of Sedimentary Grains by Automated Dynamic Image Analysis. *Part. Part. Syst. Charact.* 23, 381–387. <https://doi.org/10.1002/ppsc.200500965>
- Tysmans, D., Haesaerts, P., Bogemans, F., Claeys, P., Finsy, R., Van Molle, M., 2009. Heterogeneity in homogeneous Brabantian loess during the Late Pleniglacial. *Quat. Int., Loess in the Danube Region and Surrounding Loess Provinces: The Marsigli Memorial Volume* 198, 195–203. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.05.007>
- Udelhoven, T., Symader, W., 1995. Particle characteristics and their significance in the identification of suspended sediment sources. *Tracer Technol. Hydrol. Syst.* 153–162.
- Ulusoy et al., 2014a. Dynamic image based shape analysis of hard and lignite coal particles ground by laboratory ball and gyro mills. *Fuel Process. Technol.* 126, 350–358. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.05.017>
- Ulusoy et al., 2014b. Dynamic image analysis of calcite particles created by different mills. *Int. J. Miner. Process.* 133, 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2014.10.006>
- van der Bilt, W.G.M., Rea, B., Spagnolo, M., Roerdink, D.L., Jørgensen, S.L., Bakke, J., 2018. Novel sedimentological fingerprints link shifting depositional processes to Holocene climate transitions in East Greenland. *Glob. Planet. Change* 164, 52–64. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.03.007>
- Van Exem, A., Debret, M., Copard, Y., Verpoorter, C., De Wet, G., Lecoq, N., Sorrel, P., Werner, A., Roof, S., Laignel, B., Retelle, M., 2019. New source-to-sink approach in an arctic catchment based on hyperspectral core-logging (Lake Linné, Svalbard). *Quat. Sci. Rev.* 203, 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.10.038>
- Van Leussen et al., 1996. THE UNDERWATER VIDEO SYSTEM VIS. *J. Sea Res.* 36, 77–81.
- Velichko, A.A., Timireva, S.N., 1995. Morphoscopy and morphometry of quartz grains from loess and buried soil layers. *GeoJournal* 36, 143–149. <https://doi.org/10.1007/BF00813159>
- Walling, D., Woodward, J., Nicholas, A.P., 1993. A multi-parameter approach to fingerprint suspended-sediment sources. *Tracers Hydrol. Proc Int. Symp. Yokohama 1993* 215.
- Walling, D.E., 2013. The evolution of sediment source fingerprinting investigations in fluvial systems. *J. Soils Sediments* 13, 1658–1675. <https://doi.org/10.1007/s11368-013-0767-2>
- Walling, D.E., Owens, P.N., Leeks, G.J.L., 1999. Fingerprinting suspended sediment sources in the catchment of the River Ouse, Yorkshire, UK. *Hydrol. Process.* 13, 955–975. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199905\)13:7<955::AID-HYP784>3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199905)13:7<955::AID-HYP784>3.0.CO;2-G)

- Walling, D.E., Woodward, J.C., 1992. Use of radiometric fingerprints to derive information on suspended sediment sources. *Eros. Sediment Transp. Monit. Programme River Basin* 12.
- Wang, G., Wu, B., Wang, Z.-Y., 2005. Sedimentation problems and management strategies of Sanmenxia Reservoir, Yellow River, China. *Water Resour. Res.* 41. <https://doi.org/10.1029/2004WR003919>
- Ward, 1963. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. *J. Am. Stat. Assoc.* 58, 236–244. <https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>
- Wittmeier, H.E., Bakke, J., Vasskog, K., Trachsel, M., 2015. Reconstructing Holocene glacier activity at Langfjordjøkelen, Arctic Norway, using multi-proxy fingerprinting of distal glacier-fed lake sediments. *Quat. Sci. Rev.* 114, 78–99. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.02.007>
- Zölls et al., 2013. Flow Imaging Microscopy for Protein Particle Analysis—A Comparative Evaluation of Four Different Analytical Instruments. *AAPS J.* 15, 1200–1211.

## TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Schéma résumant les techniques de «sediment fingerprinting» (traçage sédimentaire) dans les Matières En Suspension (MES) des systèmes fluviaux (modifié par (Patault, 2018), d'après(Haddadchi et al., 2013)). Les sources présentées sont des exemples parmi de multiples possibilités inhérentes au bassin versant étudié.....	10
Figure 2: diagramme de Hjulström. Relation entre la taille du grain, la vitesse de flux et le type de mouvement sédimentaire (Hjulström, 1935).....	13
Figure 3: diagramme CM à partir duquel on peut déduire les mécanismes de transport pour des sédiments fluviaux (Passega, 1957).....	13
Figure 4: gammes de tailles mesurables par les méthodes granulométriques courantes (Malvern Instruments, 2015).....	14
Figure 5: schéma représentant la limite inférieure de la phase particulaire dans les hydrosystèmes (Buffle and Leeuwen, 1992).....	14
Figure 6 : charte de Krumbein (Krumbein, 1941).....	16
Figure 7 : Exemple de courbe estimant le nombre de particules nécessaires en fonction de la distribution des tailles de particules d'un échantillon (Bodycomb, 2013).....	17
Figure 8 : Schéma de principe d'un analyseur dynamique d'image de particule par vecteur sec (Czajkowska et al., 2015).....	18
Figure 9 : Schéma de principe d'un analyseur dynamique d'image de particule par vecteur liquide..	18
Figure 10 : exemples de paramètres de taille.....	20
Figure 11 : échelles des paramètres descripteurs de forme (Rodriguez 2013).....	21
Figure 12 : exemples de mesure de la Bluntness (ou émoussé, A) et la Roughness (ou rugosité, B) (Pirard, 1993).....	22
Figure 13 : a) à gauche : Courbe correspondante aux valeurs de rayons depuis le centre de gravité de la particule (ou coordonnée polaire du contour de la particule avec l'origine au centre de gravité, en ordonnée la distance $r$ et en abscisse l'angle $\theta$ en radian); b) à droite : variations angulaires, le contour est défini par une longueur et un angle (Clark, 1981).....	23
Figure 14 : Courbe de Koch, la valeur de dimension fractale $D=1.262$ .....	23
Figure 15: Exemple de distribution granulométrique d'un sable bien trié en volume.....	25
Figure 16: Exemple de distribution granulométrique d'un mélange d'un sable et d'une argile (kaolinite).....	25
Figure 17: couplage d'une distribution granulométrique avec une observation au MEB.....	26
Figure 18 : Principes de l'analyse de coinertie (ACOI). Les sets de données écologiques X et Y produisent deux représentations des sites dans deux hyperspaces. Des analyses séparées trouvent des axes maximisant l'inertie dans chaque hyperspace. L'étude ACOI vise à trouver les axes de	

coinertie sur lesquels les sites sont projetés. ACOI maximise la covariance carrée entre les projections des sites sur les axes de coinertie. (Dray et al., 2003) .....	27
Figure 19 : synthèse graphique des différentes analyses projetés sur le plan du compromis créé par coinertie (Massei et al., 2019) .....	28
Figure 20 : schéma des différents rôles des lots sédimentaires.....	32
Figure 21 : localisation des échantillons de sources sédimentaires prélevés sur fond de carte géologique adaptée à partir de (Duran, 2015) .....	33
Figure 22 : Schéma d'un piège à sédiment de type TIMS (Phillips et al., 2000) .....	34
Figure 23 : spectres granulométriques des échantillons de sable tamisés mesurés avec différents grossissements.....	37
Figure 24 : Distribution de taille des particules en pourcentage de volume de 3 échantillons (A : herbe carbonisée ; B : Argile Kaolinite ; C : Sable de Silice). Morpho 1, 2 et 3 sont les différents réplicats mesurés au morphogranulomètre, la courbe rouge est la mesure au granulomètre laser. .	38
Figure 25 : Distributions granulométriques laser de différents échantillons ayant subi du séchage ainsi que plusieurs degrés de broyage.....	39
Figure 26 : Représentation échantillons cohésifs tests pour le broyage sur les axes 1 et 2 de l'ACP suivant leur valeur sur les paramètres statistiques calculés avec gradistat (Blott and Pye, 2001). A : échantillons classés par préparation; B : paramètres statistiques calculés par gradistats ; C : échantillons classés par nature.....	40
Figure 27 : Représentation des échantillons cohésifs tests pour le broyage sur les axes 1 et 2 de l'ACP (48 et 30% de la variabilité respectivement) suivant leur valeur sur les paramètres de taille et de forme mesurés par le morphogranulomètre. A : échantillons classés par préparation (B05= broyés 5 minutes, B10= broyés 10 minutes) ; B : paramètres de taille et de forme.....	41
Figure 28 : Représentation des échantillons sur les axes 1 et 2 de l'ACP (48 et 30% de la variabilité) classés par nature et par préparation ; l'ACP a été réalisée sur tous les échantillons, les échantillons sont affichés un par un pour améliorer la lisibilité .....	42
Figure 29 : Distributions granulométrique lasers de différents échantillons ayant subi plusieurs degrés d'ultrasons.....	43
Figure 30 : Représentation de l'échantillon d'argile avec et sans ultrasons sur les axes 1 et 2 de l'ACP (68 et 23% de la variabilité respectivement) suivant leur valeur sur les paramètres de taille et de forme mesurés par le morphogranulomètre.....	44
Figure 31 : représentation des différents échantillons de pièges à sédiments, centrifugés ou non (bruts), sur les axes 1 et 2 de l'ACP (49% et 36% de variabilité) sur tous les paramètres de taille et de forme.....	46
Figure 32 : classification hiérarchique de Ward sur les résultats de l'ACP (HCPC) .....	47
Figure 33 : Représentation graphique en silhouette du partitionnement des échantillons optimal (en 5 groupes/clusters) .....	48
Figure 34 : paramètres de taille et de forme sur les dimensions 1 et 2 de l'ACP .....	50
Figure 35 : paramètres de taille et de forme sur les dimensions 1 et 3 de l'ACP .....	50
Figure 36 : représentation des échantillons sur les dimensions 1 et 2 de l'ACP .....	51
Figure 37 : représentation des échantillon sur les dimensions 1 et 3 de l'ACP .....	51
Figure 38 : Projections des individus dans le plan défini par les axes de l'AFD sur les 36 paramètres initiaux. Les groupes sont représentés par des ellipses de variance intra-groupe où les centres sont les médoïdes .....	52
Figure 39 : Projections des individus dans le plan défini par les axes de l'AFD sur les 12 paramètres sélectionnés, Les groupes sont représentés par des ellipses où les centres sont les moyennes et les ellipses les variances intra-groupes .....	53
Figure 40 : Diagramme 3D des échantillons de nature et préparation unique .....	55

Figure 41 : Images prises par le morphogranulomètre sur lesquels l'analyse d'image a été réalisée. A : Illite Rouge ; B : Sable Siliceux ; C : Bois carbonisé ; D : Diatomée Pinnularia Neomajor. ....	56
Figure 42 : Projections des individus dans le plan défini par les axes de l'AFD sur les 3 paramètres Area Diameter, Straightness et Bluntness .....	57
Figure 43 : Diagramme 3D des échantillons de calibration et de vérification .....	58
Figure 44 : Distribution des fréquences de taille (Area Diameter) sur les échantillons de nature et préparation uniques .....	59
Figure 45 : Distribution des fréquences de Bluntness sur les échantillons de nature et préparation uniques.....	60
Figure 46 : Distribution des fréquences de Straightness sur les échantillons de nature et préparation uniques.....	60
Figure 47 : Représentation des échantillons mélangés sur les axes 1 et 2 de l'ACP (72% de la variabilité) suivant leur valeur des paramètres morphogranulométriques ; A : échantillons classés par préparation et colorés en fonction de la proportion de sable ; B : paramètres de taille et de forme ; C : échantillons colorés en fonction de la proportion de matière organique ; D : échantillons colorés en fonction de la proportion d'argile.....	62
Figure 48 : Représentation des échantillons mélangés sur les axes 2 et 3 de l'ACP suivant leur valeur des paramètres morphogranulométriques ; A : échantillons classés par préparation ; B : paramètres de taille et de forme.....	63
Figure 49 : Diagramme 3D des échantillons de mélange .....	64
Figure 50 : ACP sur les médianes des mélanges uniquement avec des particules supérieures à 20 $\mu$ m , dimension 1 et 2 ; A : échantillons classés par préparation ; B : paramètres de taille et de forme .....	65
Figure 51 : Représentation des échantillons mélangés sur les axes 3 et 4 de l'ACP suivant leur valeur des paramètres morphogranulométriques, particules supérieures à 20 $\mu$ m ; A : échantillons classés par préparation ; B : paramètres de taille et de forme .....	66
Figure 52 : Graphique du pourcentage de sable prédit en fonction du pourcentage réel dans les mélanges argile-sable .....	69
Figure 53 : Graphique du pourcentage de sable prédit en fonction du pourcentage réel dans les mélanges argile-sable .....	70
Figure 54 : Graphique du pourcentage de sable prédit en fonction du pourcentage réel dans les mélanges argile-sable-matière organique .....	71
Figure 55 : schéma conceptuel du traitement des données morphogranulométriques pour la réalisation d'un modèle de prédiction des contribution des sources sédimentaires .....	73
Figure 56 : localisation du site de Thio sur l'île principale de Nouvelle Calédonie.....	75
Figure 57 : carte géologique du bassin versant du fleuve Thio (BRGM, 2018).....	76
Figure 58 : localisation des points de prélèvement des laisses de crues du fleuve Thio et de ses affluents (sources) .....	77
Figure 59 : Distributions granulométriques des échantillons de la rivière Thio et des affluents mesurées au granulomètre laser.....	79
Figure 60 : Distributions granulométriques des échantillons de la rivière Thio et affluents mesurées au morphogranulomètre .....	79
Figure 61 : barplot empilé des différents classement granulométrique de Folk calculé par Gradistat (Blott and Pye, 2001) .....	80
Figure 62 : cercle de corrélation des paramètres statistiques calculés avec Gradistat (Blott and Pye, 2001) sur les axes 1 et 2 l'ACP sur les échantillons de laisses de crue du bassin versant (58 et 18 % de variabilité expliqué) ; suffixe « f » ou « F » : calculé par la méthode de Folk et Ward arithmétique ; suffixe « M » ou « mm » : méthode des moments arithmétique ; suffixe « G » : méthode des	

moments géométrique ; suffixe « L » : méthode des moment Logarithmique ; suffixe « Fp » : méthode de Folk et Ward logarithmique (Blott and Pye, 2001) .....	81
Figure 63 : Représentation des échantillons de laisses de crue du bassin versant sur les axes 1 et 2 de l'ACP suivant leur valeur sur les paramètres statistiques calculés avec Gradistat (Blott and Pye, 2001) ; A : plan des individus groupés selon leur activité ; B : plan des individus groupés selon leur géologie ; C : plan des individus groupés selon leur position amont/aval ; D : plan des individus groupés selon leur affluent.....	82
Figure 64 : Distributions des fréquences des particules pour chaque échantillon sur plusieurs paramètres (Bluntness, Convexity, Elongation et Straightness), les courbes sont colorées en fonction de l'activité minière .....	83
Figure 65 : Distributions des fréquences des particules pour chaque échantillon sur plusieurs paramètres (Bluntness, Convexity, Elongation et Straightness), les courbes sont colorées en fonction de la localisation amont/aval.....	84
Figure 66 : Distribution des fréquences des particules pour chaque échantillon sur plusieurs paramètres (Bluntness, Convexity, Elongation et Straightness), les courbes sont colorées en fonction de leur affluent .....	85
Figure 67 : Représentation des médianes des échantillons du bassin de Thio sur les axes 1 et 2 de l'ACP (respectivement 64 et 24% de la variabilité) suivant leur valeur des 12 paramètres morphogranulométriques avec l'activité minière en facteur.....	86
Figure 68 : Représentation des médianes des échantillons du bassin de Thio sur les axes 2 et 3 de l'ACP (respectivement 24 et 9% de la variabilité) suivant leur valeur des 12 paramètres morphogranulométriques avec l'activité minière en facteur.....	87
Figure 69 : Représentation des médianes des échantillons du bassin de Thio sur les axes 1 et 2 de l'ACP suivant leur valeur des 12 paramètres morphogranulométriques avec leur géologie en facteur .....	88
Figure 70 : Projection des scores des individus sur les axes de l'AFD avec la géologie en facteur.....	88
Figure 71 : Représentation des médianes des échantillons du bassin de Thio sur les axes 1 et 2 de l'ACP suivant leur valeur des 12 paramètres morphogranulométriques avec les différents affluents en facteur.....	89
Figure 72 : Représentation des médianes des échantillons du bassin de Thio sur les axes 2 et 3 de l'ACP suivant leur valeur des 12 paramètres morphogranulométriques avec les différents affluents en facteur.....	90
Figure 73 : Carte de l'échantillonnage illustrant les groupes amont/aval pour les échantillons du fleuve Thio .....	90
Figure 74 : Projection des scores des individus sur les axes de l'AFD avec les affluents en facteur ....	91
Figure 75 : Graphique XY des médianes des paramètres Area Diameter et Elongation .....	92
Figure 76 : Projection des scores des individus sur les axes de l'AFD avec les groupes en facteur.....	93
Figure 77 : Histogramme des proportions de particules prédites dans chaque groupe d'affluents par l'AFD pour chaque groupe amont/aval des échantillons du fleuve Thio.....	95
Figure 78 : Histogramme des proportions de particules prédites dans chaque groupe d'affluents par l'AFD pour chaque échantillon de la rivière Thio (les échantillons sont classés du plus amont (TLT820) vers le plus aval (TLT815)).....	95
Figure 79 : localisation géographique du site de Norville.....	98
Figure 80: coupe géologique schématique du système karstique de Norville selon Pleuvret 1997 (Duran, 2015).....	99
Figure 81 : représentation schématique du karst de Norville .....	100
Figure 82 : Modèle conceptuel de la dynamique sédimentaire du karst de l'Ouest crayeux du Bassin de Paris en fonction des critères d'introduction, de production, de transport et de sédimentation des	

éléments solides transportés par les fluides (Chedeville 2015, modifié de Rodet, Chedeville, and Laignel 2013).....	101
Figure 83: localisation des échantillons de sources sédimentaires prélevés sur fond de carte géologique adaptée à partir de Duran, 2015.....	103
Figure 84 : Distributions granulométrique lasers des différents échantillons du bassin versant de la source du Hannetôt .....	104
Figure 85 : Représentation graphique de l'ACP sur les échantillons prélevés sur le bassin versant, dim 1 et 2 (respectivement 73% et 19% de la variabilité) .....	105
Figure 86 : Représentation graphique de l'ACP sur les échantillons prélevés sur le bassin versant, dim 2 et 3 (respectivement 19% et 6% de la variabilité) .....	106
Figure 87 : Projections des échantillons du bassin versant du Bébec dans le plan défini par les axes de l'AFD sur tous les paramètres .....	107
Figure 88 : Pression et turbidité à la perte du Bébec, les barres vertes correspondent à la date de prélèvement d'un échantillon.....	108
Figure 89 : Représentation graphique de l'ACP commune entre les échantillons mensuels prélevés à la perte du Bébec et les sources sédimentaires, dimensions 1 et 2 (respectivement 61% et 26% de la variabilité) .....	109
Figure 90 : Représentation graphique de l'ACP des résultats de la prédiction de l'AFD sur les échantillons mensuels prélevés à la perte du Bébec avec les sources sédimentaires en variables, dim 1 et 2 (respectivement 55% et 28% de la variabilité) .....	111
Figure 91 : boxplot du pourcentage de vase du Bébec pour chaque groupe de la perte .....	111
Figure 92 : Pression et turbidité à la source du Hannetôt, les barres vertes correspondent à la date de prélèvement d'un échantillon.....	112
Figure 93 : Représentation graphique de l'ACP sur les échantillons mensuels prélevés à la source du Hannetot, dim 1 et 2 (respectivement 62% et 17% de la variabilité) ; A : projection des individus avec un groupement par régime hydrologique ; B : projection des paramètres morphogranulométriques ; C : projection des individus avec un groupement combinant régime hydrologique et saison .....	113
Figure 94 : Représentation graphique de l'ACP commune entre les échantillons mensuels prélevés à la source du Hannetot et les sources sédimentaires, dim 1 et 2 (respectivement 58% et 25% de la variabilité) .....	114
Figure 95 : Représentation graphique de l'ACP des résultats de la prédiction de l'AFD sur les échantillons mensuels prélevés à la source du Hannetot avec leur régime hydrologique en facteur, dim 1 et 2 (respectivement 25% et 20% de la variabilité) .....	116
Figure 96 : Représentation graphique de l'ACP des résultats de la prédiction de l'AFD sur les échantillons mensuels prélevés à la source du Hannetot avec leur régime hydrologique et la saison en facteur, dim 3 et 4 (respectivement 16% et 12% de la variabilité).....	116
Figure 97 : schéma conceptuel des analyses statistiques menant à l'analyse en coinertie .....	118
Figure 98 : Synthèse graphique de l'analyse en coinertie sur les pourcentages de sources sédimentaires des échantillons mensuels à la perte (figure 13) en X et à la source (figure 18) en Y ; En haut à gauche la transformation des axes 1 à 2 des ACP X et Y sur le plan des axes 1 et 2 du compromis ; en haut à droite le trajet perte->source pour chacun des 30 échantillons ; en bas à gauche le pourcentage de variabilité expliqué par le plan du compromis ; et en bas à droite le cercle de corrélations des variables X et Y dans le plan du compromis (axes 1-2) .....	120
Figure 99 : projection des individus de X (ACP de la perte du Bébec) et Y (ACP de la source du Hannetôt) dans le plan du compromis (axes 1 et 2) ; NP : échantillons de la perte, NS : échantillons de la source ; les points d'étiage (low flow) sont en triangles et les points de crue sont en croix. ...	121
Figure 100 : photographie de l'intérieur de l'abris de la source du Hannetôt (à gauche) et localisation de la carotte NOR1703 à l'intérieur du bassin (à droite) .....	122

Figure 101 : photographie et description lithologique de la carotte NOR1703A .....	123
Figure 102 : distribution de taille des particules des différents niveaux de la carotte NOR1703A....	123
Figure 103: Représentation graphique de l'ACP des variables statistiques calculées par Gradistat avec la profondeur en facteur (surface : bleu ; profondeur max : rouge), les axes 1 et 2 représentent respectivement 51% et 31% de la variabilité totale .....	125
Figure 104: taille médiane (D50) en fonction de la profondeur de la carotte sédimentaire .....	126
Figure 105 : Représentation graphique de l'ACP sur les médianes des différents échantillons de la carotte NOR1703A avec la profondeur (en cm) en facteur, dim 1 et 2 (respectivement 69% et 26% de la variabilité) .....	127
Figure 106 : Représentation graphique des résultats de l'ACP sur les médianes des différents échantillons de la carotte NOR1703A avec le nombre de modes en facteur, dim 1 et 2 (respectivement 70 et 25% de la variabilité) .....	128
Figure 107 : paramètres de forme en fonction de la profondeur .....	129
Figure 108 : Représentation graphique des résultats de l'ACP sur les médianes des différents échantillons de la carotte NOR1703A et des sources sédimentaires, dim 1 et 2 (respectivement 71 et 24% de la variabilité).....	131
Figure 109 : Représentation graphique de l'ACP des résultats de la prédiction du modèle de l'AFD sur les résultats de l'ACP des sources sédimentaire appliqué aux différents échantillons de la carotte NOR1703A, dim 1 et 2 (respectivement 54 et 17% de la variabilité) .....	132
Figure 110 : proportion des sources sédimentaires de limons et vase du Bébec (Mud Bébec) en fonction de la profondeur des échantillons de la carotte sédimentaire .....	133
Figure 111: synthèse des analyses réalisées sur la carotte NOR1703 et corrélation entre les différents résultats ; de gauche à droite, avec la profondeur en ordonnée : photographie de la carotte, taille médiane (D50), Elongation médiane, proportions en limon et en vase du Bébec calculé par le modèle de source sédimentaires.....	134
Figure 112: Courbe de restitution de la fluorescéine mesurée par le fluorimètre Ggun à la source du Hannetot en fonction de la date et des évènements de l'expérimentation de terrain.....	135
Figure 113: pluviométrie, pression et concentration d'uranine à la source du Hannetot en fonction de la date .....	136
Figure 114: Evolution de la température, turbidité, pression et concentration d'uranine à la source du Hannetot lors de l'injection .....	136
Figure 115 : Evolution de la température, turbidité, pression et concentration d'uranine à la source du Hannetot lors de l'injection .....	137
Figure 116: illustration des échantillons sélectionnés (groupes 1 à 9) sur le diagramme de turbidité, pression et concentration d'uranine à la source du Hannetot en fonction de la date.....	138
Figure 117: distribution granulométrique des échantillons sélectionnés (groupes 1 à 9), ainsi que deux échantillons de crue (flood) et un échantillon d'étiage (low flow) mesurés par le granulomètre laser.....	138
Figure 118: Représentation graphique de l'ACP sur les variables statistiques calculées par Gradistat (Blott and Pye, 2001) à partir des distributions obtenue par granulométrie laser et regroupé suivant les groupe défini sur la Figure 116, dimensions 1 et 2 (50 et 32% de variabilité) .....	139
Figure 119: histogramme de la skewness en fonction des groupes d'échantillons .....	139
Figure 120: Représentation graphique de l'ACP des médianes des paramètres de taille et de forme mesurés par le morphogranulomètre et regroupés suivant les groupes définis sur la Figure 116, dimensions 1 et 2, 46 et 29% de la variabilité totale.....	141
Figure 121 : Représentation graphique de l'ACP des résultats de la prédiction de l'AFD sur les échantillons de l'injection d'eau avec les sources sédimentaires en variables, dim 1 et 2 (respectivement 36% et 22% de la variabilité) .....	142

Figure 122: photographie de la doline de la perte du Bébec débordant le 15 mars 2019.....	143
Figure 123: Evolution de la pluviométrie de la turbidité et des matières en suspension (MES) à la perte du Bébec et à la source du Hannetot avant, pendant et après la crue.....	144
Figure 124: identification des différentes phases de la crue avec les matières en suspension (MES) et la turbidité à la perte du Bébec en fonction de la date. Les barres correspondent aux échantillons mesurés au morphogranulomètre.....	144
Figure 125: identification des différentes phases de la crue avec les matières en suspension (MES) et la turbidité à la source du Hannetot en fonction de la date. Les barres correspondent aux échantillons mesurés au morphogranulomètre. ....	145
Figure 126: distributions granulométriques des particules des échantillons prélevés A : à la perte du Bébec mesurées au granulomètre laser ; B : à la source du Hannetot mesurées au granulomètre laser .....	146
Figure 127: Représentation graphique de l'ACP sur les variables statistiques des distributions granulométriques de la perte du Bébec obtenues par granulométrie laser avec les différents régimes en facteur, dimension 1 et 2 (respectivement 59% et 20% de la variabilité).....	147
Figure 128: skewness et turbidité à la perte en fonction de la date .....	148
Figure 129: Représentation graphique de l'ACP sur les statistiques des distributions granulométriques de la source du Hannetot obtenues par granulométrie laser avec les différents régimes en facteur, dimension 1 et 2 (58% et 22% de la variabilité) .....	149
Figure 130 : D50 et turbidité à la source en fonction de la date .....	150
Figure 131 : Représentation graphique de l'ACP sur les résultats morphogranulométriques des échantillons de la perte du Bébec avec les différents régimes en facteur, dimensions 1 et 2 (respectivement 59 et 19% de la variance) .....	151
Figure 132 : Représentation graphique de l'ACP sur les résultats morphogranulométriques des échantillons de la source du Hannetot avec les différents régimes en facteur, dimensions 1 et 2 (respectivement 58 et 22% de la variance) .....	152
Figure 133 : Représentation graphique de l'ACP sur les résultats morphogranulométriques des échantillons de la source du Hannetot avec les différents régimes en facteur, dimensions 2 et 3 (respectivement 22 et 10% de la variance) .....	153
Figure 134 : Elongation et turbidité à la perte du Bébec et à la source du Hannetot en fonction de la date .....	154
Figure 135 : synthèse graphique de l'analyse en coinertie de l'ACP sur le modèle de l'AFD des prédictions pour la perte (Tableau 30) en X et de l'ACP sur le modèle de l'AFD des prédictions pour la source (Tableau 31) en Y ; En haut à gauche la transformation des axes 1 à 3 des ACP X et Y sur le plan des axes 1 et 2 du compromis ; en haut à droite le trajet perte->source pour chacun des 24 échantillons ; en bas à gauche le pourcentage de variabilité expliqué par le plan du compromis ; et en bas à droite le cercle de corrélations des variables X et Y dans le plan du compromis (axes 1-2) $RV=0.24$ .....	156
Figure 136 : photographie MEB de l'échantillon J1P17 (montée de la crue à la perte) montrant la fraction minéral (grains de quartz), la fraction pédologique (radicelle et débris/agrégats pédologiques) et la fraction biologique (diatomée). On observe clairement la grande dominance des débris organo-pédologiques .....	158
Figure 137 : photographie MEB de l'échantillon J1S03 (phase initiale à la source) montrant la fraction minéral (grains de quartz et calcite), la fraction pédologique (agregats pédologiques) et la fraction biologique (diatomée). On observe que le filtre est, de manière générale, beaucoup moins chargé en particules par rapport à la perte.....	158
Figure 138: schéma conceptuel synthétisant les interprétations sur les transferts de sédiments pendant la crue.....	161

Figure 139 : Représentation graphique de l'ACP sur tous les échantillons analysés sur le site de Norville, dim 1 et 2 (respectivement 67% et 21% de la variabilité).....	163
Figure 140 : Aire d'alimentation du captage (en rouge, OIEau) sur fond de carte géologique (carte 1 : 250 000 de Rouen, BRGM, 1979).....	166
Figure 141 : Extrait de la carte régionale des sols (SERDA, 1988) .....	167
Figure 142 : Précipitations horaires du 20 au 25 janvier 2018 à la station de Gournay en Bray.....	168
Figure 143: Turbidité mesurées à la station de pompage du forage de St-Paer, les points rouges correspondent aux prélèvements d'eau.....	168
Figure 144 : Spectre granulométriques moyens en pourcentage volumique sur les 3 échantillons..	169
Figure 145 : Distributions moyennes des fréquences de Straightness pour les 3 échantillons .....	171
Figure 146 : Distributions moyennes des fréquences de Bluntness pour les 3 échantillons.....	171
Figure 147 : Situation géographique des sites d'injection et de suivi de l'opération de traçage réalisée par SUEZ Consulting .....	172
Figure 148 : Situation des mares et du point d'infiltration (indice karstique) n'ayant pas fait l'objet de traçage projeté sur vue aérienne .....	172
Figure 149 : localisation des points d'échantillonnage des sédiments sélectionnés comme sources sédimentaires potentielles .....	173
Figure 150 : Représentation des sources sédimentaires et des échantillons de la crue au forage de St Paer, sur les axes 1 et 2 (56 et 24% de la variabilité) de l'ACP des médianes leur paramètres morphogranulométriques.....	174
Figure 151 : Projections des sources échantillonnées dans le plan défini par les axes de l'AFD sur l'ACP des médianes des sources sédimentaires .....	175
Figure 152 : histogrammes des variations des sources sédimentaires au forage de St Paer lors de la crue de janvier 2018 prédit par le modèle de l'AFD .....	176
Figure 153 : photographie du morphogranulomètre .....	208
Figure 154 : interface du logiciel Callisto (mode image).....	209
Figure 155 : photographie de la camera.....	210
Figure 156 : tableau reliant la valeur de grossissement (« magnification ») et la résolution de l'image .....	210
Figure 157 : Diagramme 3D des échantillons de nature et préparation unique .....	215

## TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : comparaison des différentes méthodes granulométriques courantes (Malvern Instruments, 2015).....	14
Tableau 2 : liste des échantillons de sources sédimentaires prélevés sur le bassin versant.....	33
Tableau 3 : liste des échantillons de nature et préparation unique et nombre de répliqués pour chaque échantillon.....	34
Tableau 4 : corrélation entre les paramètres et les 3 dimensions de l'ACP ; les paramètres ayant les corrélations les plus fortes avec une dimension sont en jaune.....	49
Tableau 5 : Matrices de confusion de l'AFD sur les ACP ; tableau supérieur ACP avec tous les paramètres ; tableau inférieur ACP avec les 12 paramètres sélectionnés .....	54
Tableau 6 : matrice de confusion de l'AFD sur les échantillons avec les 3 paramètres Area Diameter – Straightness - Bluntness.....	54
Tableau 7 : Recombinaisons entre les prédictions du modèle de l'AFD et les échantillons de classification et de validation avec les 3 paramètres Area Diameter – Straightness - Bluntness .....	57

Tableau 8 : liste des échantillons et proportion de chaque nature.....	61
Tableau 9 : Matrice de confusion de l'AFD sur l'ACP des médianes des échantillons purs d'argile et sable.....	67
Tableau 10: Comparaison des pourcentages volumiques réels avec les pourcentages prédits avec le modèle de l'AFD sur les médianes des mélanges argile-sable .....	67
Tableau 11 : Matrice de confusion de l'AFD réalisée par la procédure statistique Sed_SAT .....	68
Tableau 12 : Comparaison des pourcentages volumiques réels avec les pourcentages prédits avec le modèle créé avec Sed SAT sur les médianes des mélanges argile-sable.....	68
Tableau 13 : Matrice de confusion de l'AFD sur les distribution complètes des échantillons purs d'argile et sable.....	69
Tableau 14 : Comparaison des pourcentages volumiques réels avec les pourcentages prédits avec les données morphogranulométriques pour les mélanges argile-sable.....	70
Tableau 15 : Matrice de confusion des échantillons purs d'argile, matière organique et sable.....	71
Tableau 16 : Comparaison des pourcentages volumiques réels avec les pourcentages prédits avec les données morphogranulométriques pour les mélanges argile-sable, argile-matière organique et sable-matière organique.....	71
Tableau 17 : liste des échantillons et nomenclature .....	78
Tableau 18 : Recombinaisons sur l'AFD entre les 2 bassins versants et la rivière (mix).....	87
Tableau 19 : Recombinaisons sur l'AFD entre les 2 bassins versants .....	87
Tableau 20 : Recombinaisons sur l'AFD entre les différentes géologies .....	88
Tableau 21 : Recombinaisons sur l'AFD entre les affluents et le fleuve Thio .....	91
Tableau 22 : Recombinaisons sur l'AFD entre les affluents.....	92
Tableau 23 : Recombinaisons sur l'AFD entre les groupes d'affluents.....	94
Tableau 24 : Proportions de particules prédites dans chaque groupe d'affluents par l'AFD pour chaque groupe amont/aval des échantillons du fleuve Thio.....	94
Tableau 25 : liste des échantillons de sources sédimentaires prélevés sur le bassin versant.....	103
Tableau 26 : Matrice de confusion montrant les recombinaisons entre les différents groupes de l'AFD sur les médianes des distributions.....	107
Tableau 27 : pourcentage de contribution de chaque source sédimentaire calculé par l'AFD pour les échantillons de la perte du Bébec.....	110
Tableau 28 : pourcentage de contribution de chaque source sédimentaire calculé par l'AFD pour les échantillons de la source du Hannetot .....	115
Tableau 29 : pourcentage de contribution de chaque source sédimentaire calculé par l'AFD pour les échantillons de l'expérimentation OAK .....	142
Tableau 30 : tableau des pourcentages de contribution des sources pour la crue de mars 2019 à la perte.....	154
Tableau 31 : tableau des pourcentages de contribution des sources pour la crue de mars 2019 à la source.....	155
Tableau 32 : Date des échantillons observés au MEB .....	157
Tableau 33 : Résumé des observations sur les échantillons de la perte .....	157
Tableau 34 : Résumé des observations sur les échantillons de la source .....	157
Tableau 35 : Synthèse des observations sur les sédiments pendant la crue.....	160
Tableau 36 : Synthèse des observations au MEB des échantillons .....	170
Tableau 37 : Liste des échantillons des sédiments sélectionnés comme sources sédimentaires potentielles .....	173
Tableau 38 : Matrice de confusion montrant les recombinaisons entre les différents groupes de l'AFD sur les médianes des distributions.....	175

Tableau 39 : pourcentage de contribution de chaque source sédimentaire calculé par l'AFD pour les échantillons de la crue de janvier 2018 au forage de St Paer.....	175
Tableau 40 : liste des associations entre les différents échantillons. S'il est écrit « TRUE » Le test indique une vraie indépendance entre les deux échantillons sur le paramètre correspondant. Si le test retourne « FALSE », alors aucune indépendance n'est mesurée. Seules 5 paires sur les 435 listées ne montrent pas d'indépendance sur aucun des 3 paramètres. ....	201
Tableau 41 : liste des associations entre les différents groupes. S'il est écrit « TRUE » Le test indique une vraie indépendance entre les deux groupes sur le paramètre correspondant. Si le test retourne « FALSE », alors aucune indépendance n'est mesurée. Toutes les combinaisons montrent une indépendance sur au moins une des 3 paramètres.....	206
Tableau 42 : tableau des colinéarités entre les paramètres, en rouge sont surlignés les paramètres très colinéaires.....	207

# ANNEXE 1 :RESULTATS DES TESTS D'INDEPENDANCE DE KRUSKAL-WALLIS

Tableau 40 : liste des associations entre les différents échantillons. S'il est écrit « TRUE » Le test indique une vraie indépendance entre les deux échantillons sur le paramètre correspondant. Si le test retourne « FALSE », alors aucune indépendance n'est mesurée. Seules 5 paires sur les 435 listées ne montrent pas d'indépendance sur aucun des 3 paramètres.

	Straightness	Diameter	Bluntness	Nb FALSE
clay_IlliteyellowL-pollen_Pin	FALSE	FALSE	FALSE	3
clay_SmectiteMontmorilloniteL-pollen_elm	FALSE	FALSE	FALSE	3
MO_GrasscharL-MO_WiesenbodenL	FALSE	FALSE	FALSE	3
pollen_birch-pollen_prunus	FALSE	FALSE	FALSE	3
pollen_pine-pollen_fir	FALSE	FALSE	FALSE	3
MO_PeatSoilL-MO_SiltLoanL	TRUE	FALSE	FALSE	2
oxyde_HematiteL-pollen_erable	FALSE	FALSE	TRUE	2
oxyde_HematiteL-pollen_Pin	FALSE	TRUE	FALSE	2
pollen_bouleau-pollen_chene	FALSE	TRUE	FALSE	2
pollen_bouleau-pollen_lin	FALSE	TRUE	FALSE	2
pollen_chene-pollen_lin	FALSE	TRUE	FALSE	2
pollen_chene-pollen_prunus	FALSE	TRUE	FALSE	2
pollen_erable-pollen_Pin	FALSE	TRUE	FALSE	2
pollen_lin-pollen_prunus	FALSE	TRUE	FALSE	2
Argile_IlliteJauneL-Argile_SmectiteMontmorilloniteL	TRUE	TRUE	FALSE	1
Argile_IlliteJauneL-oxyde_HematiteL	TRUE	TRUE	FALSE	1
Argile_IlliteJauneL-pollen_anemone	FALSE	TRUE	TRUE	1
Argile_IlliteJauneL-pollen_chene	TRUE	FALSE	TRUE	1
Argile_IlliteJauneL-pollen_epicea	FALSE	TRUE	TRUE	1
Argile_IlliteJauneL-pollen_erable	FALSE	TRUE	TRUE	1
Argile_IlliteJauneL-pollen_gramine	FALSE	TRUE	TRUE	1
Argile_IlliteJauneL-pollen_orme	TRUE	TRUE	FALSE	1
Argile_IlliteJauneL-sable_standardpurifieL	FALSE	TRUE	TRUE	1
Argile_IlliteRougeL-Argile_IlliteVerteL	FALSE	TRUE	TRUE	1
Argile_IlliteRougeL-Argile_kaoliniteBlancheL	FALSE	TRUE	TRUE	1
Argile_IlliteRougeL-Argile_SmectiteMontmorilloniteL	FALSE	TRUE	TRUE	1
Argile_IlliteRougeL-pollen_epicea	FALSE	TRUE	TRUE	1
Argile_IlliteRougeL-pollen_orme	FALSE	TRUE	TRUE	1
Argile_IlliteRougeL-pollen_Pin	TRUE	FALSE	TRUE	1
Argile_IlliteVerteL-Argile_kaoliniteBlancheL	FALSE	TRUE	TRUE	1
Argile_IlliteVerteL-Argile_SmectiteMontmorilloniteL	FALSE	TRUE	TRUE	1
Argile_IlliteVerteL-pollen_bouleau	TRUE	FALSE	TRUE	1
Argile_IlliteVerteL-pollen_epicea	FALSE	TRUE	TRUE	1
Argile_IlliteVerteL-pollen_erable	TRUE	FALSE	TRUE	1
Argile_IlliteVerteL-pollen_orme	FALSE	TRUE	TRUE	1
Argile_IlliteVerteL-pollen_prunus	TRUE	FALSE	TRUE	1
Argile_kaoliniteBlancheL-Argile_SmectiteMontmorilloniteL	FALSE	TRUE	TRUE	1
Argile_kaoliniteBlancheL-MO_BCGrassL	FALSE	TRUE	TRUE	1
Argile_kaoliniteBlancheL-oxyde_HematiteL	TRUE	FALSE	TRUE	1
Argile_kaoliniteBlancheL-pollen_bouleau	TRUE	FALSE	TRUE	1
Argile_kaoliniteBlancheL-pollen_epicea	FALSE	TRUE	TRUE	1
Argile_kaoliniteBlancheL-pollen_orme	FALSE	TRUE	TRUE	1
Argile_kaoliniteBlancheL-sable_standardpurifieL	TRUE	TRUE	FALSE	1
Argile_SmectiteMontmorilloniteL-MO_BCGrassL	FALSE	TRUE	TRUE	1
Argile_SmectiteMontmorilloniteL-oxyde_HematiteL	TRUE	TRUE	FALSE	1
Argile_SmectiteMontmorilloniteL-pollen_epicea	FALSE	TRUE	TRUE	1
Argile_SmectiteMontmorilloniteL-pollen_erable	TRUE	TRUE	FALSE	1
Argile_SmectiteMontmorilloniteL-pollen_Pin	TRUE	TRUE	FALSE	1
Argile_SmectiteMontmorilloniteL-pollen_sapin	TRUE	TRUE	FALSE	1
diatom_Pinnularia-MO_ChernozemL	FALSE	TRUE	TRUE	1
diatom_Pinnularia-MO_GrasscharL	FALSE	TRUE	TRUE	1
diatom_Pinnularia-MO_hexaneSOOTL	FALSE	TRUE	TRUE	1
diatom_Pinnularia-pollen_anemone	TRUE	TRUE	FALSE	1
diatom_Pinnularia-pollen_bouleau	TRUE	TRUE	FALSE	1
diatom_Pinnularia-pollen_chene	TRUE	TRUE	FALSE	1
diatom_Pinnularia-pollen_epicea	FALSE	TRUE	TRUE	1
diatom_Pinnularia-pollen_gramine	TRUE	TRUE	FALSE	1
diatom_Pinnularia-pollen_lin	TRUE	TRUE	FALSE	1
diatom_Pinnularia-pollen_orme	FALSE	TRUE	TRUE	1
diatom_Pinnularia-pollen_prunus	TRUE	TRUE	FALSE	1
MO_A20L-MO_BCGrassL	FALSE	TRUE	TRUE	1
MO_A20L-MO_SiltLoanL	FALSE	TRUE	TRUE	1
MO_A20L-pollen_anemone	FALSE	TRUE	TRUE	1
MO_A20L-pollen_epicea	FALSE	TRUE	TRUE	1
MO_A20L-pollen_orme	FALSE	TRUE	TRUE	1
MO_A20L-pollen_sapin	FALSE	TRUE	TRUE	1
MO_BCGrassL-MO_GrasscharL	TRUE	TRUE	FALSE	1
MO_BCGrassL-MO_hexaneSOOTL	TRUE	FALSE	TRUE	1
MO_BCGrassL-MO_PeatSoilL	TRUE	TRUE	FALSE	1
MO_BCGrassL-MO_SiltLoanL	TRUE	TRUE	FALSE	1
MO_BCGrassL-MO_WiesenbodenL	TRUE	TRUE	FALSE	1
MO_BCGrassL-pollen_epicea	FALSE	TRUE	TRUE	1

MO_BCGrassL-pollen_orme	FALSE	TRUE	TRUE	1
MO_BeulahZapL-pollen_epicea	FALSE	TRUE	TRUE	1
MO_BeulahZapL-pollen_orme	FALSE	TRUE	TRUE	1
MO_ChernozemL-MO_GrasscharL	TRUE	TRUE	FALSE	1
MO_ChernozemL-MO_hexaneSOOTL	FALSE	TRUE	TRUE	1
MO_ChernozemL-MO_PeatSoiL	TRUE	TRUE	FALSE	1
MO_ChernozemL-MO_SiltLoanL	TRUE	TRUE	FALSE	1
MO_ChernozemL-MO_WiesenbodenL	TRUE	TRUE	FALSE	1
MO_ChernozemL-pollen_epicea	FALSE	TRUE	TRUE	1
MO_ChernozemL-pollen_orme	FALSE	TRUE	TRUE	1
MO_GrasscharL-MO_PeatSoiL	TRUE	TRUE	FALSE	1
MO_GrasscharL-MO_SiltLoanL	TRUE	TRUE	FALSE	1
MO_GrasscharL-pollen_epicea	FALSE	TRUE	TRUE	1
MO_hexaneSOOTL-pollen_epicea	FALSE	TRUE	TRUE	1
MO_hexaneSOOTL-pollen_orme	FALSE	TRUE	TRUE	1
MO_PeatSoiL-MO_WiesenbodenL	TRUE	TRUE	FALSE	1
MO_PeatSoiL-MO_WoodcharL	TRUE	FALSE	TRUE	1
MO_PeatSoiL-pollen_anemone	FALSE	TRUE	TRUE	1
MO_PeatSoiL-pollen_epicea	FALSE	TRUE	TRUE	1
MO_PeatSoiL-pollen_Pin	FALSE	TRUE	TRUE	1
MO_PeatSoiL-pollen_sapin	FALSE	TRUE	TRUE	1
MO_SiltLoanL-MO_WiesenbodenL	TRUE	TRUE	FALSE	1
MO_SiltLoanL-MO_WoodcharL	TRUE	FALSE	TRUE	1
MO_SiltLoanL-pollen_anemone	FALSE	TRUE	TRUE	1
MO_SiltLoanL-pollen_epicea	FALSE	TRUE	TRUE	1
MO_SiltLoanL-pollen_Pin	FALSE	TRUE	TRUE	1
MO_SiltLoanL-pollen_sapin	FALSE	TRUE	TRUE	1
MO_WiesenbodenL-pollen_epicea	FALSE	TRUE	TRUE	1
MO_WoodcharL-pollen_epicea	FALSE	TRUE	TRUE	1
oxyde_Hematitel-pollen_bouleau	TRUE	FALSE	TRUE	1
oxyde_Hematitel-pollen_epicea	FALSE	TRUE	TRUE	1
oxyde_Hematitel-pollen_gramine	FALSE	TRUE	TRUE	1
oxyde_Hematitel-pollen_orme	TRUE	TRUE	FALSE	1
pollen_anemone-pollen_bouleau	TRUE	TRUE	FALSE	1
pollen_anemone-pollen_chene	TRUE	TRUE	FALSE	1
pollen_anemone-pollen_epicea	FALSE	TRUE	TRUE	1
pollen_anemone-pollen_gramine	TRUE	TRUE	FALSE	1
pollen_anemone-pollen_lin	TRUE	TRUE	FALSE	1
pollen_anemone-pollen_Pin	FALSE	TRUE	TRUE	1
pollen_anemone-pollen_prunus	TRUE	TRUE	FALSE	1
pollen_anemone-pollen_sapin	FALSE	TRUE	TRUE	1
pollen_anemone-sable_standardpurifieL	FALSE	TRUE	TRUE	1
pollen_bouleau-pollen_epicea	FALSE	TRUE	TRUE	1
pollen_bouleau-pollen_erable	TRUE	FALSE	TRUE	1
pollen_bouleau-pollen_gramine	TRUE	TRUE	FALSE	1
pollen_chene-pollen_epicea	FALSE	TRUE	TRUE	1
pollen_chene-pollen_gramine	TRUE	TRUE	FALSE	1
pollen_epicea-pollen_erable	FALSE	TRUE	TRUE	1
pollen_epicea-pollen_gramine	FALSE	TRUE	TRUE	1
pollen_epicea-pollen_lin	FALSE	TRUE	TRUE	1
pollen_epicea-pollen_orme	FALSE	TRUE	TRUE	1
pollen_epicea-pollen_Pin	FALSE	TRUE	TRUE	1
pollen_epicea-pollen_prunus	FALSE	TRUE	TRUE	1
pollen_epicea-pollen_sapin	FALSE	TRUE	TRUE	1
pollen_epicea-sable_standardpurifieL	FALSE	TRUE	TRUE	1
pollen_erable-pollen_gramine	FALSE	TRUE	TRUE	1
pollen_erable-pollen_orme	TRUE	TRUE	FALSE	1
pollen_erable-pollen_prunus	TRUE	FALSE	TRUE	1
pollen_erable-pollen_sapin	TRUE	TRUE	FALSE	1
pollen_erable-sable_standardpurifieL	FALSE	TRUE	TRUE	1
pollen_gramine-pollen_Pin	FALSE	TRUE	TRUE	1
pollen_gramine-sable_standardpurifieL	FALSE	TRUE	TRUE	1
pollen_lin-pollen_Pin	FALSE	TRUE	TRUE	1
pollen_lin-pollen_sapin	TRUE	FALSE	TRUE	1
pollen_orme-pollen_Pin	TRUE	TRUE	FALSE	1
pollen_orme-pollen_sapin	TRUE	TRUE	FALSE	1
pollen_Pin-sable_standardpurifieL	FALSE	TRUE	TRUE	1
Argile_IlliteJauneL-Argile_IlliteRougeL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteJauneL-Argile_IlliteVerteL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteJauneL-Argile_kaoliniteBlancheL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteJauneL-diatom_Pinnularia	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteJauneL-MO_A20L	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteJauneL-MO_BCGrassL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteJauneL-MO_BeulahZapL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteJauneL-MO_ChernozemL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteJauneL-MO_GrasscharL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteJauneL-MO_hexaneSOOTL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteJauneL-MO_PeatSoiL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteJauneL-MO_SiltLoanL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteJauneL-MO_WiesenbodenL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteJauneL-MO_WoodcharL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteJauneL-pollen_bouleau	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteJauneL-pollen_lin	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteJauneL-pollen_prunus	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteJauneL-pollen_sapin	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteRougeL-diatom_Pinnularia	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteRougeL-MO_A20L	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteRougeL-MO_BCGrassL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteRougeL-MO_BeulahZapL	TRUE	TRUE	TRUE	0

Argile_IlliteRougeL-MO_ChernozemL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteRougeL-MO_GrasscharL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteRougeL-MO_hexaneSOOTL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteRougeL-MO_PeatSoill	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteRougeL-MO_SiltLoanL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteRougeL-MO_WiesenbodenL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteRougeL-MO_WoodcharL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteRougeL-oxyde_Hematitel	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteRougeL-pollen_anemone	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteRougeL-pollen_bouleau	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteRougeL-pollen_chene	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteRougeL-pollen_erable	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteRougeL-pollen_gramine	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteRougeL-pollen_lin	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteRougeL-pollen_prunus	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteRougeL-pollen_sapin	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteRougeL-sable_standardpurifieL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteVerteL-diatom_Pinnularia	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteVerteL-MO_A20L	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteVerteL-MO_BCGrassL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteVerteL-MO_BeulahZapL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteVerteL-MO_ChernozemL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteVerteL-MO_GrasscharL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteVerteL-MO_hexaneSOOTL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteVerteL-MO_PeatSoill	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteVerteL-MO_SiltLoanL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteVerteL-MO_WiesenbodenL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteVerteL-MO_WoodcharL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteVerteL-oxyde_Hematitel	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteVerteL-pollen_anemone	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteVerteL-pollen_chene	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteVerteL-pollen_gramine	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteVerteL-pollen_lin	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteVerteL-pollen_Pin	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteVerteL-pollen_sapin	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_IlliteVerteL-sable_standardpurifieL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_kaoliniteBlanchetL-diatom_Pinnularia	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_kaoliniteBlanchetL-MO_A20L	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_kaoliniteBlanchetL-MO_BeulahZapL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_kaoliniteBlanchetL-MO_ChernozemL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_kaoliniteBlanchetL-MO_GrasscharL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_kaoliniteBlanchetL-MO_hexaneSOOTL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_kaoliniteBlanchetL-MO_PeatSoill	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_kaoliniteBlanchetL-MO_SiltLoanL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_kaoliniteBlanchetL-MO_WiesenbodenL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_kaoliniteBlanchetL-MO_WoodcharL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_kaoliniteBlanchetL-pollen_anemone	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_kaoliniteBlanchetL-pollen_chene	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_kaoliniteBlanchetL-pollen_erable	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_kaoliniteBlanchetL-pollen_gramine	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_kaoliniteBlanchetL-pollen_lin	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_kaoliniteBlanchetL-pollen_Pin	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_kaoliniteBlanchetL-pollen_prunus	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_kaoliniteBlanchetL-pollen_sapin	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_SmectiteMontmorilloniteL-diatom_Pinnularia	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_SmectiteMontmorilloniteL-MO_A20L	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_SmectiteMontmorilloniteL-MO_BeulahZapL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_SmectiteMontmorilloniteL-MO_ChernozemL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_SmectiteMontmorilloniteL-MO_GrasscharL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_SmectiteMontmorilloniteL-MO_hexaneSOOTL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_SmectiteMontmorilloniteL-MO_PeatSoill	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_SmectiteMontmorilloniteL-MO_SiltLoanL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_SmectiteMontmorilloniteL-MO_WiesenbodenL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_SmectiteMontmorilloniteL-MO_WoodcharL	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_SmectiteMontmorilloniteL-pollen_anemone	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_SmectiteMontmorilloniteL-pollen_bouleau	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_SmectiteMontmorilloniteL-pollen_chene	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_SmectiteMontmorilloniteL-pollen_gramine	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_SmectiteMontmorilloniteL-pollen_lin	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_SmectiteMontmorilloniteL-pollen_prunus	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile_SmectiteMontmorilloniteL-sable_standardpurifieL	TRUE	TRUE	TRUE	0
diatom_Pinnularia-MO_A20L	TRUE	TRUE	TRUE	0
diatom_Pinnularia-MO_BCGrassL	TRUE	TRUE	TRUE	0
diatom_Pinnularia-MO_BeulahZapL	TRUE	TRUE	TRUE	0
diatom_Pinnularia-MO_PeatSoill	TRUE	TRUE	TRUE	0
diatom_Pinnularia-MO_SiltLoanL	TRUE	TRUE	TRUE	0
diatom_Pinnularia-MO_WiesenbodenL	TRUE	TRUE	TRUE	0
diatom_Pinnularia-MO_WoodcharL	TRUE	TRUE	TRUE	0
diatom_Pinnularia-oxyde_Hematitel	TRUE	TRUE	TRUE	0
diatom_Pinnularia-pollen_erable	TRUE	TRUE	TRUE	0
diatom_Pinnularia-pollen_Pin	TRUE	TRUE	TRUE	0
diatom_Pinnularia-pollen_sapin	TRUE	TRUE	TRUE	0
diatom_Pinnularia-sable_standardpurifieL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_A20L-MO_BeulahZapL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_A20L-MO_ChernozemL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_A20L-MO_GrasscharL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_A20L-MO_hexaneSOOTL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_A20L-MO_PeatSoill	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_A20L-MO_WiesenbodenL	TRUE	TRUE	TRUE	0

MO_A20L-MO_WoodcharL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_A20L-oxyde_Hematitel	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_A20L-pollen_bouleau	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_A20L-pollen_chene	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_A20L-pollen_erable	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_A20L-pollen_gramine	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_A20L-pollen_lin	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_A20L-pollen_Pin	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_A20L-pollen_prunus	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_A20L-sable_standardpurifieL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BCGrassL-MO_BeulahZapL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BCGrassL-MO_ChernozemL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BCGrassL-MO_WoodcharL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BCGrassL-oxyde_Hematitel	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BCGrassL-pollen_anemone	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BCGrassL-pollen_bouleau	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BCGrassL-pollen_chene	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BCGrassL-pollen_erable	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BCGrassL-pollen_gramine	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BCGrassL-pollen_lin	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BCGrassL-pollen_Pin	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BCGrassL-pollen_prunus	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BCGrassL-pollen_sapin	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BCGrassL-sable_standardpurifieL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BeulahZapL-MO_ChernozemL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BeulahZapL-MO_GrasscharL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BeulahZapL-MO_hexaneSOOTL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BeulahZapL-MO_PeatSoilL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BeulahZapL-MO_SiltLoanL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BeulahZapL-MO_WiesenbodenL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BeulahZapL-MO_WoodcharL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BeulahZapL-oxyde_Hematitel	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BeulahZapL-pollen_anemone	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BeulahZapL-pollen_bouleau	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BeulahZapL-pollen_chene	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BeulahZapL-pollen_erable	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BeulahZapL-pollen_gramine	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BeulahZapL-pollen_lin	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BeulahZapL-pollen_Pin	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BeulahZapL-pollen_prunus	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BeulahZapL-pollen_sapin	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_BeulahZapL-sable_standardpurifieL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_ChernozemL-MO_WoodcharL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_ChernozemL-oxyde_Hematitel	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_ChernozemL-pollen_anemone	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_ChernozemL-pollen_bouleau	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_ChernozemL-pollen_chene	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_ChernozemL-pollen_erable	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_ChernozemL-pollen_gramine	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_ChernozemL-pollen_lin	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_ChernozemL-pollen_Pin	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_ChernozemL-pollen_prunus	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_ChernozemL-pollen_sapin	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_ChernozemL-sable_standardpurifieL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_GrasscharL-MO_hexaneSOOTL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_GrasscharL-MO_WoodcharL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_GrasscharL-oxyde_Hematitel	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_GrasscharL-pollen_anemone	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_GrasscharL-pollen_bouleau	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_GrasscharL-pollen_chene	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_GrasscharL-pollen_erable	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_GrasscharL-pollen_gramine	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_GrasscharL-pollen_lin	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_GrasscharL-pollen_orme	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_GrasscharL-pollen_Pin	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_GrasscharL-pollen_prunus	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_GrasscharL-pollen_sapin	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_GrasscharL-sable_standardpurifieL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_hexaneSOOTL-MO_PeatSoilL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_hexaneSOOTL-MO_SiltLoanL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_hexaneSOOTL-MO_WiesenbodenL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_hexaneSOOTL-MO_WoodcharL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_hexaneSOOTL-oxyde_Hematitel	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_hexaneSOOTL-pollen_anemone	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_hexaneSOOTL-pollen_bouleau	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_hexaneSOOTL-pollen_chene	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_hexaneSOOTL-pollen_erable	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_hexaneSOOTL-pollen_gramine	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_hexaneSOOTL-pollen_lin	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_hexaneSOOTL-pollen_Pin	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_hexaneSOOTL-pollen_prunus	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_hexaneSOOTL-pollen_sapin	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_hexaneSOOTL-sable_standardpurifieL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_PeatSoilL-oxyde_Hematitel	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_PeatSoilL-pollen_bouleau	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_PeatSoilL-pollen_chene	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_PeatSoilL-pollen_erable	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_PeatSoilL-pollen_gramine	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_PeatSoilL-pollen_lin	TRUE	TRUE	TRUE	0

MO_PeatSoiIL-pollen_orme	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_PeatSoiIL-pollen_prunus	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_PeatSoiIL-sable_standardpurifieL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_SiltLoanL-oxyde_Hematitel	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_SiltLoanL-pollen_bouleau	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_SiltLoanL-pollen_chene	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_SiltLoanL-pollen_erable	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_SiltLoanL-pollen_gramine	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_SiltLoanL-pollen_lin	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_SiltLoanL-pollen_orme	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_SiltLoanL-pollen_prunus	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_SiltLoanL-sable_standardpurifieL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_WiesenbodenL-MO_WoodcharL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_WiesenbodenL-oxyde_Hematitel	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_WiesenbodenL-pollen_anemone	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_WiesenbodenL-pollen_bouleau	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_WiesenbodenL-pollen_chene	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_WiesenbodenL-pollen_erable	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_WiesenbodenL-pollen_gramine	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_WiesenbodenL-pollen_lin	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_WiesenbodenL-pollen_orme	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_WiesenbodenL-pollen_Pin	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_WiesenbodenL-pollen_prunus	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_WiesenbodenL-pollen_sapin	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_WiesenbodenL-sable_standardpurifieL	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_WoodcharL-oxyde_Hematitel	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_WoodcharL-pollen_anemone	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_WoodcharL-pollen_bouleau	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_WoodcharL-pollen_chene	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_WoodcharL-pollen_erable	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_WoodcharL-pollen_gramine	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_WoodcharL-pollen_lin	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_WoodcharL-pollen_orme	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_WoodcharL-pollen_Pin	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_WoodcharL-pollen_prunus	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_WoodcharL-pollen_sapin	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_WoodcharL-sable_standardpurifieL	TRUE	TRUE	TRUE	0
oxyde_Hematitel-pollen_anemone	TRUE	TRUE	TRUE	0
oxyde_Hematitel-pollen_chene	TRUE	TRUE	TRUE	0
oxyde_Hematitel-pollen_lin	TRUE	TRUE	TRUE	0
oxyde_Hematitel-pollen_prunus	TRUE	TRUE	TRUE	0
oxyde_Hematitel-pollen_sapin	TRUE	TRUE	TRUE	0
oxyde_Hematitel-sable_standardpurifieL	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen_anemone-pollen_erable	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen_anemone-pollen_orme	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen_bouleau-pollen_orme	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen_bouleau-pollen_Pin	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen_bouleau-pollen_sapin	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen_bouleau-sable_standardpurifieL	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen_chene-pollen_erable	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen_chene-pollen_orme	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen_chene-pollen_Pin	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen_chene-pollen_sapin	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen_chene-sable_standardpurifieL	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen_erable-pollen_lin	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen_gramine-pollen_lin	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen_gramine-pollen_orme	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen_gramine-pollen_prunus	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen_gramine-pollen_sapin	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen_lin-pollen_orme	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen_lin-sable_standardpurifieL	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen_orme-pollen_prunus	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen_orme-sable_standardpurifieL	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen_Pin-pollen_prunus	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen_prunus-pollen_sapin	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen_prunus-sable_standardpurifieL	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen_sapin-sable_standardpurifieL	TRUE	TRUE	TRUE	0

Tableau 41 : liste des associations entre les différents groupes. S'il est écrit « TRUE » Le test indique une vraie indépendance entre les deux groupes sur le paramètre correspondant. Si le test retourne « FALSE », alors aucune indépendance n'est mesurée. Toutes les combinaisons montrent une indépendance sur au moins une des 3 paramètres.

	Diameter	Bluntness	Straightness	Nb FALSE
soil_loam-peat	FALSE	FALSE	TRUE	2
coal_geol-soil_loam	TRUE	FALSE	TRUE	1
coal_geol-Vertisoil	TRUE	FALSE	TRUE	1
diatom-OM_carbonised	TRUE	TRUE	FALSE	1
diatom-soil_Chernozem	TRUE	TRUE	FALSE	1
oxide-pollen	TRUE	TRUE	FALSE	1
soil_Chernozem-soil_loam	TRUE	FALSE	TRUE	1
soil_Chernozem-peat	TRUE	FALSE	TRUE	1
soil_Chernozem-Vertisoil	TRUE	FALSE	TRUE	1
soil_loam-Vertisoil	TRUE	FALSE	TRUE	1
peat-Vertisoil	TRUE	FALSE	TRUE	1
Argile-Charbon_geol	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile-diatom	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile-MO_carbonise	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile-oxyde	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile-pollen	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile-Sable	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile-sol_Chernozem	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile-Sol_loam	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile-tourbe	TRUE	TRUE	TRUE	0
Argile-Vertisol	TRUE	TRUE	TRUE	0
Charbon_geol-diatom	TRUE	TRUE	TRUE	0
Charbon_geol-MO_carbonise	TRUE	TRUE	TRUE	0
Charbon_geol-oxyde	TRUE	TRUE	TRUE	0
Charbon_geol-pollen	TRUE	TRUE	TRUE	0
Charbon_geol-Sable	TRUE	TRUE	TRUE	0
Charbon_geol-sol_Chernozem	TRUE	TRUE	TRUE	0
Charbon_geol-tourbe	TRUE	TRUE	TRUE	0
diatom-oxyde	TRUE	TRUE	TRUE	0
diatom-pollen	TRUE	TRUE	TRUE	0
diatom-Sable	TRUE	TRUE	TRUE	0
diatom-Sol_loam	TRUE	TRUE	TRUE	0
diatom-tourbe	TRUE	TRUE	TRUE	0
diatom-Vertisol	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_carbonise-oxyde	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_carbonise-pollen	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_carbonise-Sable	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_carbonise-sol_Chernozem	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_carbonise-Sol_loam	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_carbonise-tourbe	TRUE	TRUE	TRUE	0
MO_carbonise-Vertisol	TRUE	TRUE	TRUE	0
oxyde-Sable	TRUE	TRUE	TRUE	0
oxyde-sol_Chernozem	TRUE	TRUE	TRUE	0
oxyde-Sol_loam	TRUE	TRUE	TRUE	0
oxyde-tourbe	TRUE	TRUE	TRUE	0
oxyde-Vertisol	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen-Sable	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen-sol_Chernozem	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen-Sol_loam	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen-tourbe	TRUE	TRUE	TRUE	0
pollen-Vertisol	TRUE	TRUE	TRUE	0
Sable-sol_Chernozem	TRUE	TRUE	TRUE	0
Sable-Sol_loam	TRUE	TRUE	TRUE	0
Sable-tourbe	TRUE	TRUE	TRUE	0
Sable-Vertisol	TRUE	TRUE	TRUE	0

# ANNEXE 2 : RESULTATS DES TESTS DE COLINEARITE

Tableau 42 : tableau des colinéarités entre les paramètres, en rouge sont surlignés les paramètres très colinéaires

	Area Diameter	Inner Diameter	Mean Diameter	Perim Diameter	Corfon Diameter	Width	Length	ETI Width	ETI Length	Outgrowth	Skeleton Length	Feret Ratio.1	Max.Distance	Geodesic.Length	Fibre.Thickness
Area Diameter	1.00	0.99	1.00	0.92	0.92	1.00	0.98	1.00	0.98	0.70	0.98	0.24	0.98	0.45	0.92
Inner Diameter	0.99	1.00	0.99	0.89	0.89	0.99	0.95	1.00	0.95	0.63	0.95	0.33	0.96	0.43	0.94
Mean Diameter	1.00	0.99	1.00	0.93	0.93	1.00	0.99	0.99	0.99	0.71	0.99	0.21	0.99	0.45	0.91
Perim Diameter	0.92	0.89	0.93	1.00	1.00	0.92	0.95	0.91	0.95	0.78	0.95	0.12	0.95	0.55	0.87
Corfon Diameter	0.92	0.89	0.93	1.00	1.00	0.92	0.95	0.91	0.95	0.78	0.95	0.12	0.95	0.55	0.87
Width	1.00	0.99	1.00	0.92	0.92	1.00	0.98	1.00	0.97	1.00	0.98	0.10	0.98	0.45	0.92
Length	0.98	0.95	0.99	0.95	0.95	0.98	1.00	0.98	1.00	0.78	1.00	0.10	0.98	0.45	0.92
ETI Width	1.00	1.00	0.99	0.95	0.95	1.00	0.97	1.00	0.96	0.55	0.97	0.30	0.97	0.44	0.87
ETI Length	0.98	0.95	0.99	0.95	0.95	0.98	1.00	0.98	1.00	0.78	1.00	0.10	0.98	0.45	0.92
Outgrowth	0.70	0.63	0.71	0.78	0.78	0.67	0.78	0.65	0.78	1.00	0.78	0.20	0.78	0.46	0.86
Skeleton Length	0.98	0.95	0.99	0.96	0.96	0.97	1.00	0.97	1.00	0.78	1.00	0.10	0.97	0.44	0.87
Feret Ratio.1	0.24	0.33	0.21	0.12	0.12	0.27	0.10	0.30	0.07	-0.20	0.10	1.00	0.10	0.14	0.38
Max.Distance	0.98	0.96	0.99	0.95	0.95	0.98	1.00	0.97	1.00	0.78	1.00	0.10	0.97	0.44	0.87
Geodesic.Length	0.45	0.43	0.45	0.55	0.55	0.46	0.47	0.46	0.46	0.57	0.47	0.14	0.47	0.51	1.00
Fibre.Thickness	0.92	0.94	0.91	0.87	0.87	0.92	0.87	0.93	0.86	0.38	0.87	0.38	0.87	0.51	1.00
Bumness	-0.60	-0.54	-0.62	-0.77	-0.77	-0.60	-0.68	-0.58	-0.69	-0.62	-0.69	-0.16	-0.68	-0.47	-0.47
Roughness	0.33	0.23	0.35	0.56	0.56	0.33	0.46	0.30	0.47	0.61	0.47	0.36	0.46	0.30	0.11
Elongation	-0.22	-0.32	-0.19	-0.11	-0.11	-0.26	-0.08	-0.28	-0.06	0.21	-0.08	-1.00	-0.09	-0.14	-0.37
Aspectratio	0.36	0.44	0.33	0.22	0.22	0.38	0.22	0.40	0.19	-0.04	0.21	0.70	0.22	0.23	0.62
ETI.Elongation	-0.31	-0.40	-0.28	-0.20	-0.20	-0.34	-0.17	-0.36	-0.15	0.12	-0.17	-0.99	-0.18	-0.20	-0.44
ETI.Roundness	0.38	0.47	0.28	0.28	0.28	0.42	0.25	0.44	0.23	-0.02	0.15	0.97	0.25	0.27	0.55
ETI.Length	1.00	1.00	0.99	0.95	0.95	0.97	1.00	0.96	1.00	0.65	0.78	1.00	0.65	0.46	0.86
ETI.Width	0.98	0.95	0.99	0.95	0.95	0.97	1.00	0.96	1.00	0.65	0.78	1.00	0.65	0.46	0.86
Outgrowth	0.70	0.63	0.71	0.78	0.78	0.67	0.78	0.65	0.78	1.00	0.78	0.20	0.78	0.46	0.86
Feret Ratio.1	0.24	0.33	0.21	0.12	0.12	0.27	0.10	0.30	0.07	-0.20	0.10	1.00	0.10	0.14	0.38
Max.Distance	0.98	0.96	0.99	0.95	0.95	0.98	1.00	0.97	1.00	0.78	1.00	0.10	0.97	0.44	0.87
Geodesic.Length	0.45	0.43	0.45	0.55	0.55	0.46	0.47	0.46	0.46	0.57	0.47	0.14	0.47	0.51	1.00
Fibre.Thickness	0.92	0.94	0.91	0.87	0.87	0.92	0.87	0.93	0.86	0.38	0.87	0.38	0.87	0.51	1.00
Bumness	-0.60	-0.54	-0.62	-0.77	-0.77	-0.60	-0.68	-0.58	-0.69	-0.62	-0.69	-0.16	-0.68	-0.47	-0.47
Roughness	0.33	0.23	0.35	0.56	0.56	0.33	0.46	0.30	0.47	0.61	0.47	0.36	0.46	0.30	0.11
Elongation	-0.22	-0.32	-0.19	-0.11	-0.11	-0.26	-0.08	-0.28	-0.06	0.21	-0.08	-1.00	-0.09	-0.14	-0.37
Aspectratio	0.36	0.44	0.33	0.22	0.22	0.38	0.22	0.40	0.19	-0.04	0.21	0.70	0.22	0.23	0.62
ETI.Elongation	-0.31	-0.40	-0.28	-0.20	-0.20	-0.34	-0.17	-0.36	-0.15	0.12	-0.17	-0.99	-0.18	-0.20	-0.44
ETI.Roundness	0.38	0.47	0.28	0.28	0.28	0.42	0.25	0.44	0.23	-0.02	0.15	0.97	0.25	0.27	0.55
ETI.Length	1.00	1.00	0.99	0.95	0.95	0.97	1.00	0.96	1.00	0.65	0.78	1.00	0.65	0.46	0.86
ETI.Width	0.98	0.95	0.99	0.95	0.95	0.97	1.00	0.96	1.00	0.65	0.78	1.00	0.65	0.46	0.86
Outgrowth	0.70	0.63	0.71	0.78	0.78	0.67	0.78	0.65	0.78	1.00	0.78	0.20	0.78	0.46	0.86
Feret Ratio.1	0.24	0.33	0.21	0.12	0.12	0.27	0.10	0.30	0.07	-0.20	0.10	1.00	0.10	0.14	0.38
Max.Distance	0.98	0.96	0.99	0.95	0.95	0.98	1.00	0.97	1.00	0.78	1.00	0.10	0.97	0.44	0.87
Geodesic.Length	0.45	0.43	0.45	0.55	0.55	0.46	0.47	0.46	0.46	0.57	0.47	0.14	0.47	0.51	1.00
Fibre.Thickness	0.92	0.94	0.91	0.87	0.87	0.92	0.87	0.93	0.86	0.38	0.87	0.38	0.87	0.51	1.00
Bumness	-0.60	-0.54	-0.62	-0.77	-0.77	-0.60	-0.68	-0.58	-0.69	-0.62	-0.69	-0.16	-0.68	-0.47	-0.47
Roughness	0.33	0.23	0.35	0.56	0.56	0.33	0.46	0.30	0.47	0.61	0.47	0.36	0.46	0.30	0.11
Elongation	-0.22	-0.32	-0.19	-0.11	-0.11	-0.26	-0.08	-0.28	-0.06	0.21	-0.08	-1.00	-0.09	-0.14	-0.37
Aspectratio	0.36	0.44	0.33	0.22	0.22	0.38	0.22	0.40	0.19	-0.04	0.21	0.70	0.22	0.23	0.62
ETI.Elongation	-0.31	-0.40	-0.28	-0.20	-0.20	-0.34	-0.17	-0.36	-0.15	0.12	-0.17	-0.99	-0.18	-0.20	-0.44
ETI.Roundness	0.38	0.47	0.28	0.28	0.28	0.42	0.25	0.44	0.23	-0.02	0.15	0.97	0.25	0.27	0.55
ETI.Length	1.00	1.00	0.99	0.95	0.95	0.97	1.00	0.96	1.00	0.65	0.78	1.00	0.65	0.46	0.86
ETI.Width	0.98	0.95	0.99	0.95	0.95	0.97	1.00	0.96	1.00	0.65	0.78	1.00	0.65	0.46	0.86
Outgrowth	0.70	0.63	0.71	0.78	0.78	0.67	0.78	0.65	0.78	1.00	0.78	0.20	0.78	0.46	0.86
Feret Ratio.1	0.24	0.33	0.21	0.12	0.12	0.27	0.10	0.30	0.07	-0.20	0.10	1.00	0.10	0.14	0.38
Max.Distance	0.98	0.96	0.99	0.95	0.95	0.98	1.00	0.97	1.00	0.78	1.00	0.10	0.97	0.44	0.87
Geodesic.Length	0.45	0.43	0.45	0.55	0.55	0.46	0.47	0.46	0.46	0.57	0.47	0.14	0.47	0.51	1.00
Fibre.Thickness	0.92	0.94	0.91	0.87	0.87	0.92	0.87	0.93	0.86	0.38	0.87	0.38	0.87	0.51	1.00
Bumness	-0.60	-0.54	-0.62	-0.77	-0.77	-0.60	-0.68	-0.58	-0.69	-0.62	-0.69	-0.16	-0.68	-0.47	-0.47
Roughness	0.33	0.23	0.35	0.56	0.56	0.33	0.46	0.30	0.47	0.61	0.47	0.36	0.46	0.30	0.11
Elongation	-0.22	-0.32	-0.19	-0.11	-0.11	-0.26	-0.08	-0.28	-0.06	0.21	-0.08	-1.00	-0.09	-0.14	-0.37
Aspectratio	0.36	0.44	0.33	0.22	0.22	0.38	0.22	0.40	0.19	-0.04	0.21	0.70	0.22	0.23	0.62
ETI.Elongation	-0.31	-0.40	-0.28	-0.20	-0.20	-0.34	-0.17	-0.36	-0.15	0.12	-0.17	-0.99	-0.18	-0.20	-0.44
ETI.Roundness	0.38	0.47	0.28	0.28	0.28	0.42	0.25	0.44	0.23	-0.02	0.15	0.97	0.25	0.27	0.55
ETI.Length	1.00	1.00	0.99	0.95	0.95	0.97	1.00	0.96	1.00	0.65	0.78	1.00	0.65	0.46	0.86
ETI.Width	0.98	0.95	0.99	0.95	0.95	0.97	1.00	0.96	1.00	0.65	0.78	1.00	0.65	0.46	0.86
Outgrowth	0.70	0.63	0.71	0.78	0.78	0.67	0.78	0.65	0.78	1.00	0.78	0.20	0.78	0.46	0.86
Feret Ratio.1	0.24	0.33	0.21	0.12	0.12	0.27	0.10	0.30	0.07	-0.20	0.10	1.00	0.10	0.14	0.38
Max.Distance	0.98	0.96	0.99	0.95	0.95	0.98	1.00	0.97	1.00	0.78	1.00	0.10	0.97	0.44	0.87
Geodesic.Length	0.45	0.43	0.45	0.55	0.55	0.46	0.47	0.46	0.46	0.57	0.47	0.14	0.47	0.51	1.00
Fibre.Thickness	0.92	0.94	0.91	0.87	0.87	0.92	0.87	0.93	0.86	0.38	0.87	0.38	0.87	0.51	1.00
Bumness	-0.60	-0.54	-0.62	-0.77	-0.77	-0.60	-0.68	-0.58	-0.69	-0.62	-0.69	-0.16	-0.68	-0.47	-0.47
Roughness	0.33	0.23	0.35	0.56	0.56	0.33	0.46	0.30	0.47	0.61	0.47	0.36	0.46	0.30	0.11
Elongation	-0.22	-0.32	-0.19	-0.11	-0.11	-0.26	-0.08	-0.28	-0.06	0.21	-0.08	-1.00	-0.09	-0.14	-0.37
Aspectratio	0.36	0.44	0.33	0.22	0.22	0.38	0.22	0.40	0.19	-0.04	0.21	0.70	0.22	0.23	0.62
ETI.Elongation	-0.31	-0.40	-0.28	-0.20	-0.20	-0.34	-0.17	-0.36	-0.15	0.12	-0.17	-0.99	-0.18	-0.20	-0.44
ETI.Roundness	0.38	0.47	0.28	0.28	0.28	0.42	0.25	0.44	0.23	-0.02	0.15	0.97			

## ANNEXE 3 : PROTOCOLE D'UTILISATION DU MORPHOGRANULOMETRE

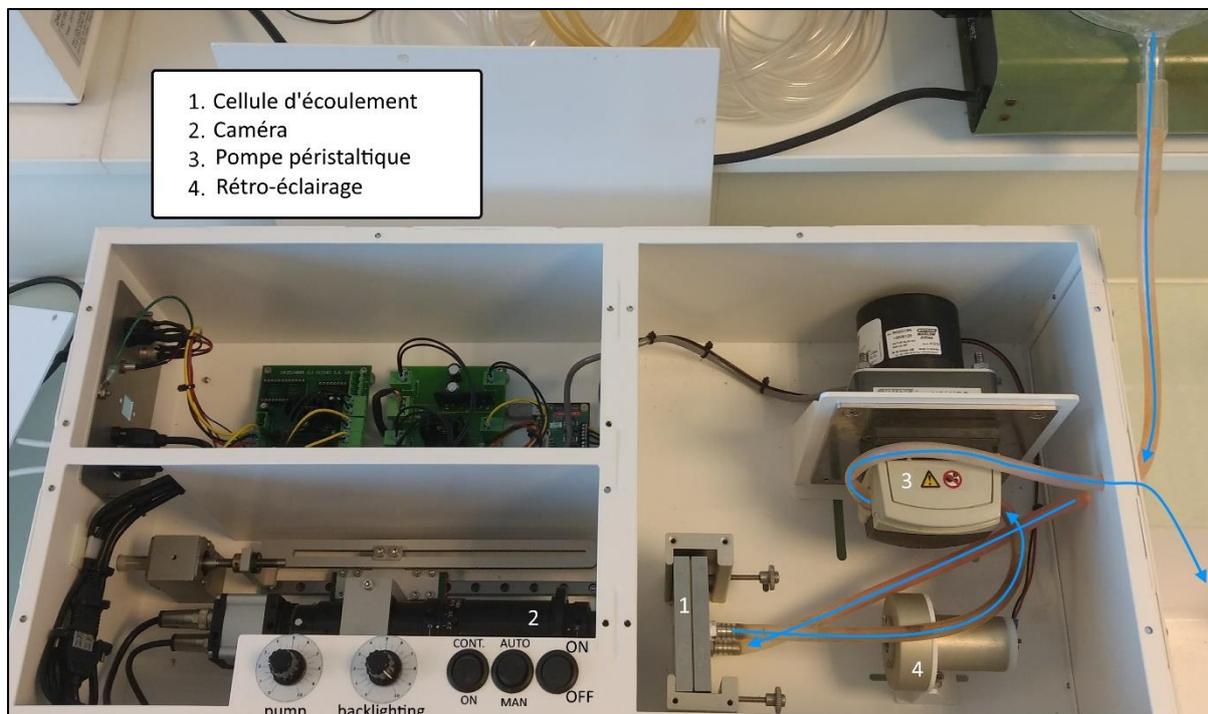


Figure 153 : photographie du morphogranulomètre

### F. DEMARRAGE

Allumer le boîtier d'alimentation puis le morphogranulomètre. Lancer l'ordinateur et le logiciel Callisto (l'appareil doit être déjà allumé pour que le logiciel le reconnaisse).

### G. UTILISATION DU MORPHOGRANULOMETRE

Chaque analyse du morphogranulomètre suit une POS (Procédure d'Opération Standard, « SOP » en anglais) qui correspond à la paramétrisation de l'appareil. L'utilisateur peut soit utiliser une POS préexistante (par défaut : calibration MF) ou créer une POS personnalisée.

#### 1) Déroulement d'une analyse

1. Rincer manuellement l'erlenmeyer relié à l'appareil.
2. Cliquer sur « calcul-> Réaliser une correction de fond->Exécuter » en faisant passer de l'eau du robinet avec la pompe en mode « MAN. » à la fin du rinçage pour corriger le fond.
3. Lorsque la correction de fond est terminée, remettre en mode « AUTO » et vider l'erlenmeyer.
4. Cliquer sur « calcul-> Exécuter le POS » ou sur le raccourci « lancer une analyse » dans la barre des tâches (Figure 154).
5. Choisir la POS (par défaut, choisir calibration MF), nommer l'analyse.
6. Injecter l'échantillon dans l'erlenmeyer, régler le potentiomètre de la pompe entre 5 et 10 (par défaut, 10, pour permettre les particules les plus massives d'être entraînées). **Les interrupteurs doivent être sur « ON », « AUTO » et « ON ».**

7. Cliquer sur « *Lancer la POS* ».
8. Surveiller l'analyse en mode image (Figure 154) et vérifier qu'aucune bulle n'est identifiée comme une particule.
9. Lorsque l'analyse est terminée, cliquer sur « *fichier->exporter fichier texte->ancien-> exporter la taille et la forme des particules* » dans un dossier au nom de l'utilisateur, localisé sur le bureau, pour extraire les données.
10. Si plusieurs analyses sur le même échantillon doivent être effectuées, réinjecter l'échantillon dans l'erenmeyer et répéter les action 4 à 9. Une fois toutes les analyses terminées, rincer.

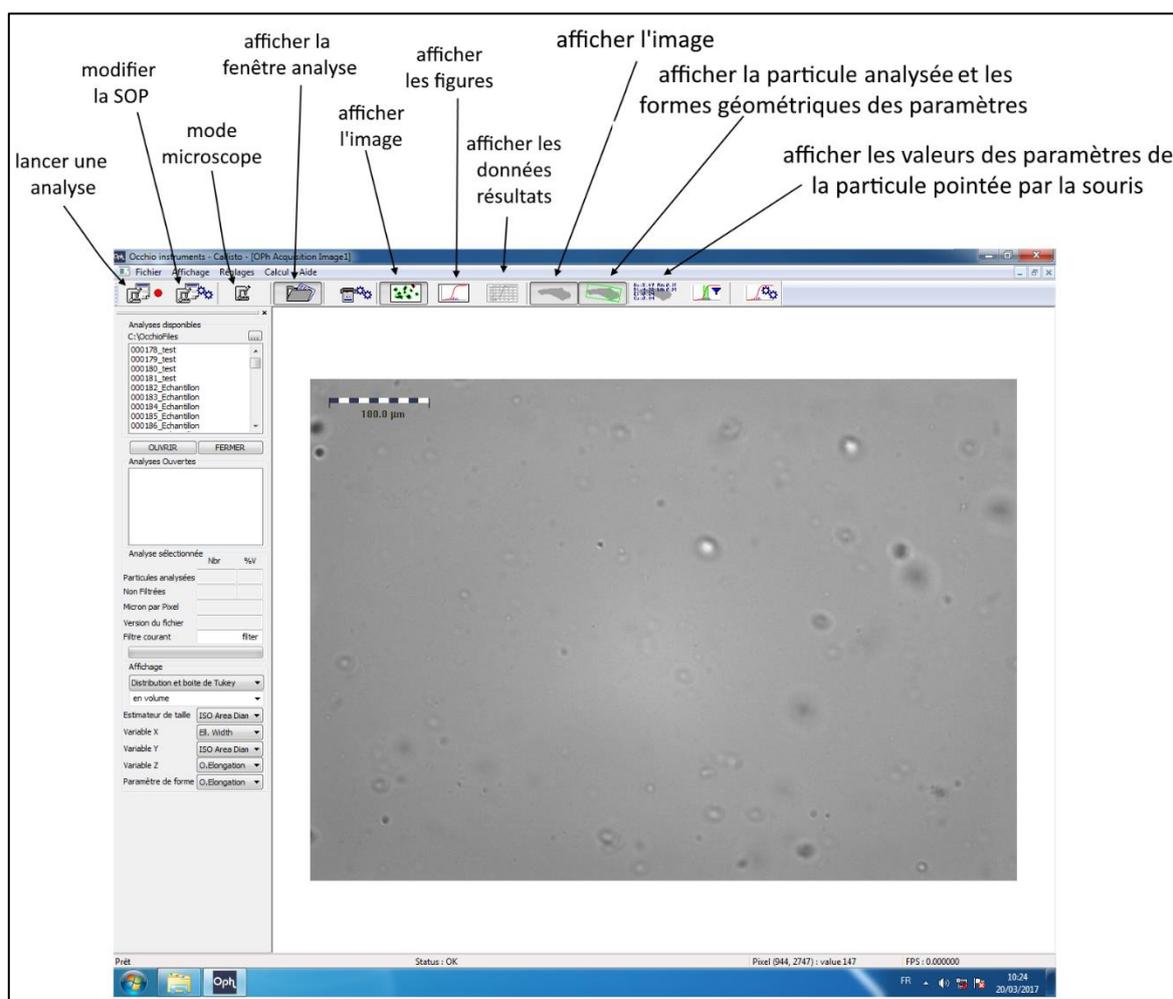


Figure 154 : interface du logiciel Callisto (mode image)

## 2) Rinçage

Remplir l'erenmeyer et démarrer l'appareil (bouton ON, potentiomètre pompe >5) pour rincer. Il est possible de se mettre en mode microscope lors du rinçage afin de vérifier si la cellule est bien propre.

### 3)Changer la résolution

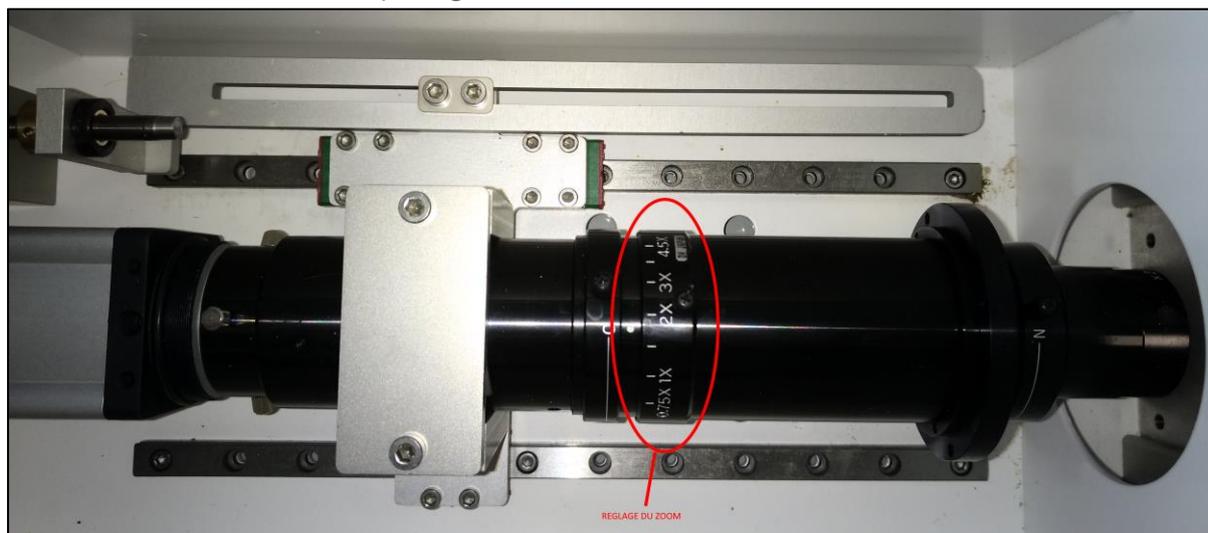


Figure 155 : photographie de la camera

Lens magnification	Front lens expander	Global magnification	Instrument resolution	Switch position	Potentiometer value
x0.75	x2	x1.5	1.113 $\mu\text{m}/\text{pixel}$	0	6.5
x1	x2	x2	0.835 $\mu\text{m}/\text{pixel}$	0	7
x2	x2	x4	0.417 $\mu\text{m}/\text{pixel}$	0	9
x3	x2	x6	0.287 $\mu\text{m}/\text{pixel}$	0	9.5
x4.5	x2	x9	0.185 $\mu\text{m}/\text{pixel}$	1 or 0	10

The HR camera has a pixel size of 1.67 $\mu\text{m}$

Figure 156 : tableau reliant la valeur de grossissement (« magnification ») et la résolution de l'image

11. régler l'objectif (Figure 155) sur le zoom correspondant à la résolution choisie (Figure 156).
12. Rentrer la valeur de résolution dans « réglages->général » dans le champ « calibration ».
13. Régler le potentiomètre du rétroéclairage (Figure 153) sur la valeur correspondante à la résolution choisie (Figure 156).
14. Faire circuler de l'eau dans le circuit. Cliquer sur « calcul->calibrer l'éclairage-> Exécuter » pour calibrer l'éclairage. Vérifier avec le mode image que la luminosité est correct.
15. Réaliser une correction de fond.
16. Faire passer une eau chargée en particules dans le circuit et vérifier avec le mode microscope que le focus est bon (ajuster avec la manette de réglage située sur le côté de l'appareil à côté de l'interrupteur de démarrage) et que l'échelle correspond bien à la résolution choisie.

Attention, la manette du focus est très peu sensible et il est tentant de la tourner par excès et perdre la position de référence du focus. La position sur la Figure 155 correspond à la position de référence de Mars 2017 à Décembre 2019.

## H. MODIFIER LA POS

Aller dans « *calcul*>*configurer le POS* » ou sur le raccourci de la barre des tâches.

- Onglet instrument :
  - Le **débit de la pompe** correspond au débit estimé du pompage, il est donc lié à l'intensité du pompage. En pratique, cette valeur va correspondre au temps de pompage entre chaque photo. Si l'on modifie la valeur de résolution dans « *réglage*>*général* » lors d'un changement de zoom, le temps de pompage va changer. Il est donc nécessaire de modifier le champs « débit de la pompe » pour avoir toujours le même temps de pompage quel que soit le zoom. Par défaut, utiliser ces valeurs :
    - 3000 mL/min pour une résolution de 1.113  $\mu\text{m}/\text{px}$ .
    - 300 mL/min pour une résolution de 0.417  $\mu\text{m}/\text{px}$ .
    - 100 mL/min pour une résolution de 0.185  $\mu\text{m}/\text{px}$ .
  - **L'épaisseur de la cellule** correspond à l'espace d'écoulement où circulent les particules à l'intérieur de la cellule. Cette valeur est définie par le « spacer » placé entre les parois de la cellule. Par défaut : 2000  $\mu\text{m}$ .
  - Le **volume initial** correspond à la quantité d'eau pompée avant le démarrage de la mesure. Sa valeur dépend de la valeur choisie en débit de la pompe.
  - Le **volume analysé** correspond au volume maximal d'échantillon à passer. Si le nombre maximum de particule n'est pas atteint avant, l'analyse va s'arrêter lorsque ce volume est passé.
  - Le **Nombre maximum de particules** : l'analyse s'arrête lorsque le nombre de particules mesurées atteint cette valeur. Au-delà de 600 000, le logiciel plante fréquemment.
- Onglet Caméra, 3 choix :
  - **Pas de calibration** : les corrections de fond et d'éclairage devront être faites manuellement (il est donc possible de programmer une correction de fond systématique avant chaque analyse).
  - **Calibration de fond ou d'éclairage** : la calibration de la luminosité se fera automatiquement avant chaque analyse. Voir notice pour la paramétrisation, par défaut : gain = 0, exposition = 1, min = 0, max = 5, blanc = 160.
- Onglet analyse :
  - **Opaque** (par défaut), **seuillage personnalisé** par défaut à 169, correspond au niveau de gris à partir duquel on considère qu'un pixel appartient à une particule plutôt qu'au fond.
  - **Tendances** : permet d'activer la prise d'analyses successives. **Nbr** correspond au nombre d'analyses à réaliser à la suite, **intervalles** correspond au temps entre chaque analyse.
- Advance panel : voir notice page 45, il est recommandé de laisser ces paramètres par défaut.

## I. AFFICHAGES DES FORMES ANALYSEES

Il est possible de voir la différence entre la photographie et les pixels des particules reconnues par le seuil de niveau de gris (« gray level threshold » dans la littérature). Cela permet d'ajuster la valeur de seuil avec précision.

Pour cela, aller dans « *paramètres->affichage* » et décocher toutes les cases sauf « *longueur de parcours* ». Ensuite, en alternant entre les raccourcis « *afficher l'image* » et « *afficher la particule analysée* » (Figure 154), on peut voir les différences entre la forme réelle sur la photographie et la forme des pixels analysées.

## J. REFAIRE L'ANALYSE SUR UNE IMAGE PROVENANT D'UNE ANALYSE PRECEDENTE

Toutes les analyses sont sauvegardées dans « *C:/occhiofiles/* » au format « *.oph* ». Les photographies se situent au même endroit, à l'intérieur d'un dossier au nom de l'analyse. En ouvrant le fichier « *.oph* » d'une analyse, on obtient les résultats de l'analyse (les valeurs des paramètres morphogranulométriques). Si l'on veut observer la forme des particules analysées, il faut retrouver l'image dans le dossier correspondant et l'ouvrir avec le logiciel en faisant « *fichier->Ouvrir une image* » puis en cliquant sur « *calcul-> analyser une image courante* ». L'analyse d'image sera alors effectuée sur la photographie ouverte, et permettra de mettre en relation les valeurs des paramètres morphogranulométriques avec la forme des images.

Lorsque le disque dur est plein. Les fichiers et dossiers de « *C:/occhiofiles* » sont transférés sur « *X:\Recherche\M2C\MorphoGranulometre* ».

## ANNEXE 4 : SYNTHÈSE DÉTAILLÉE

---

### MÉTHODOLOGIE

Les travaux réalisés ont permis de définir un protocole méthodologique de mesure de la taille et la forme avec le morphogranulomètre à flux dynamique en vecteur liquide.

Dans un premier temps, une calibration de la mesure de la taille a été réalisée en comparant l'appareil avec un granulomètre laser. Ce dernier est fréquemment utilisé dans la littérature et constitue une des références dans la mesure des tailles de particules sédimentaires. Les résultats indiquent une bonne précision de l'appareil suivant les différents grossissements possibles avec le morphogranulomètre. Les grossissements permettent différentes fourchettes de mesure de 5 à 100  $\mu\text{m}$  pour le plus fort et de 40 à 800  $\mu\text{m}$  pour le plus faible zoom. Ce dernier est donc sélectionné car il permet de mesurer le plus gros intervalle de tailles avec précision.

Dans un second temps, plusieurs tests ont été réalisés pour évaluer l'effet de différentes préparations en laboratoire sur les sédiments cohésifs. Sur le test des effets du séchage et du broyage sur la taille d'échantillons de sols, on observe une légère augmentation de la taille lors du séchage provoqué par une agglomération des particules. Ensuite le broyage réduit et homogénéise la taille des sédiments séchés. Sur la forme, les échantillons séchés présentent des valeurs de forme plus élevées, et donc une forme plus irrégulière (plus éloignée d'un cercle au contour lisse), liée à l'agrégation. Selon la nature de l'échantillon, cette irrégularité peut rester identique au séchage une fois broyé (c'est le cas pour les limons et colluvions), mais certains échantillons comme l'argile à silex et le sol crayeux retrouvent des valeurs de paramètres de forme proches de celles de l'échantillon brut. L'effet du broyage dépend donc du matériau utilisé mais de manière générale, il faut considérer que cette préparation altère la forme comme la taille.

Pour tester l'effet des ultrasons sur la taille et la forme des échantillons argileux, un échantillon de kaolinite broyée a été soumis à différentes durées d'ultrasons puis mesuré. Sur la taille on observe la disparition quasi-totale d'agrégats de type macroflocs (50 à 200  $\mu\text{m}$ ) des échantillons ayant subi plus de 5 minutes d'ultrasons. Seul les microflocs (0.4 à 50  $\mu\text{m}$ ) subsistent. Quant à la forme, on observe une augmentation de l'émoussé des particules des échantillons ayant subi des ultrasons durant 5 et 10 minutes, leur contour devient donc plus lisse.

L'effet de la centrifugation sur des matières en suspension a également été testé. Tout comme le séchage, la centrifugation augmente la taille des particules du sédiment testé. Pour la forme, les particules sont plus allongées après la centrifugation, probablement due à la contrainte rotative de la méthode.

Ces tests montrent que les différentes préparations altèrent la taille et la forme, tout comme les processus naturels (tels que la mise en suspension, le transport, le dépôt, etc) peuvent les modifier. Les échantillons préparés correspondent à une distribution de taille et de forme fixe liée à leur nature et la préparation subie.

Ces échantillons restent pertinents pour définir la capacité du morphogranulomètre à discriminer des échantillons de nature et préparations contrastées. Des échantillons de nature minérale (sables siliceux, argiles broyées avec ultrasons), de matière organique broyées (charbon, herbe carbonisée, etc) et biologiques (diatomée et pollens) sont mesurés et analysés. Une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) permet de discriminer les échantillons selon 5 groupes : (1) matière organique,

(2) sable, (3) argile et pollen avec plusieurs ballonnets, (4) pollen avec un seul ballonnet et (5) diatomée.

Avec une Analyse en Composante Principale (ACP) afin de réduire l'information et la synthétiser, il est possible d'identifier quels paramètres permettent la discrimination des différents groupes. L'analyse montre que ces groupes varient selon trois dimensions (90% de la variation totale) : L'axe 1 est principalement corrélé avec les paramètres de taille (diamètre du cercle d'air équivalente, diamètre du cercle inscrit, longueurs de Feret, etc) et permet de discriminer les sables (plus grossier) des argiles (plus petite taille). Les autres groupes se situent entre ces deux extrêmes. L'axe 2 est principalement lié aux paramètres de forme décrivant le contour des particules (émoussé, dureté, solidité, linéarité, etc) et permet de distinguer les diatomées (*Pinnularia Neomajor*) avec leur forme rectangulaire aux angles marqués, des quatre autres groupes aux particules plus arrondies. Parmi les autres groupes, les argiles sont relativement plus irrégulières tandis que les sables et pollens sont les plus émoussés. L'axe 3 montre de forte corrélation avec les paramètres de forme décrivant l'élongation, le ratio largeur/longueur (élongation, ratio de Feret, ratio d'aspect, etc). A nouveau, le sable, plutôt circulaire, s'oppose aux diatomées, plutôt rectangulaires.

Cette identification des différents groupes confirme la capacité de la morphogranulométrie à discriminer des groupes non séparables par la seule information de la taille. Elle s'effectue majoritairement selon 3 dimensions regroupant les 36 paramètres de taille et de forme mesurés par l'appareil. Des corrélations fortes entre paramètres sont confirmées par un test de colinéarité. Réduire le jeu de paramètres vers un nombre plus faible semble pertinent. 12 paramètres clefs ont été sélectionnés : 4 paramètres de tailles, 5 paramètres de forme globale et 3 paramètres de contour.

Pour une représentation graphique simplifié, 3 paramètres parmi les douze sélectionnés permettent d'observer graphiquement la discrimination des groupes identifiés par la classification. Dans un diagramme en trois dimensions avec en X le diamètre du cercle d'air équivalente (Area Diameter) ; en Y la linéarité (Straightness) et en Z l'émoussé (Bluntness), la Figure 157 illustre la capacité du morphogranulomètre à discriminer les échantillons selon leur nature et leur préparation.

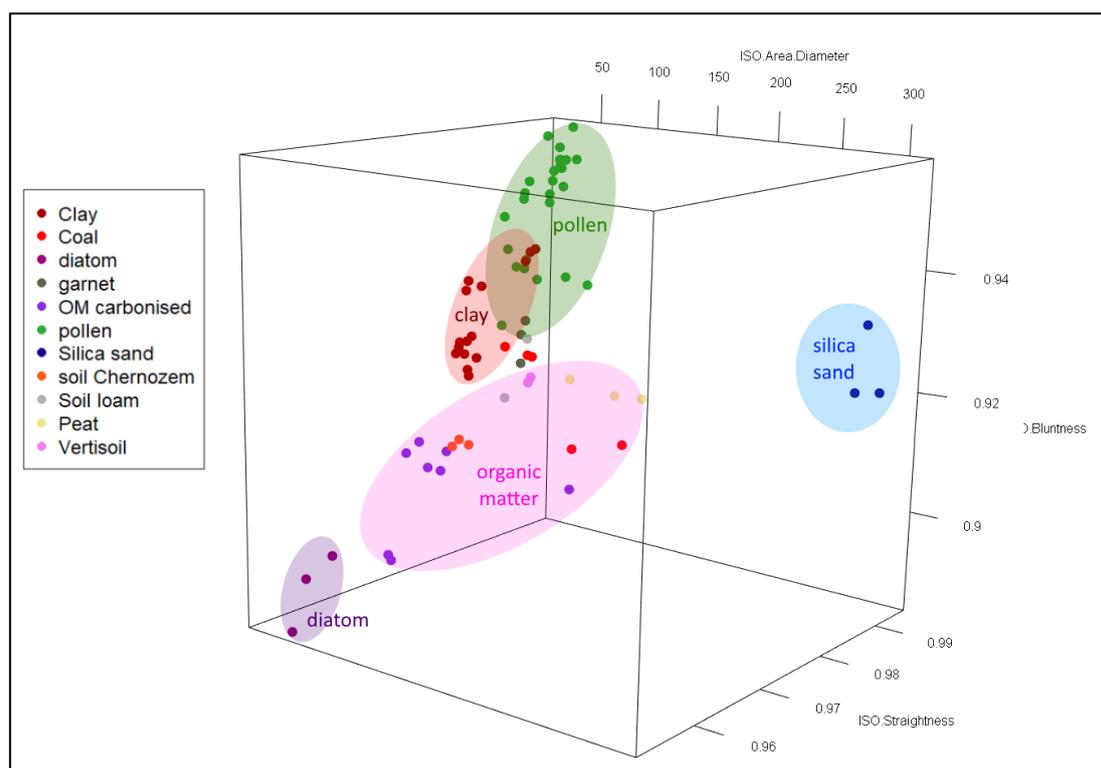


Figure 157 : Diagramme 3D des échantillons de nature et préparation unique

Toutefois, un échantillon de sédiment naturel n'est pas toujours de nature et processus (transport, dépôts, resuspension, etc) unique. C'est pourquoi, pour tester la capacité du morphogranulomètre à identifier les différentes sources sédimentaires au sein d'un mélange, le sable et l'argile utilisés précédemment ont été mélangés suivant différentes proportions dans l'objectif de retrouver ces proportions avec les mesures morphogranulométriques.

Grace à une Analyse Factorielle Discriminante (AFD), un modèle linéaire sur les 12 paramètres sélectionnés a été effectué à partir des données de sable et argile « purs ». En identifiant une appartenance pour chaque particule mesurée au sein du mélange, une proportion de grains de sable et d'argile a été calculé pour chaque mélange et comparée à la proportion réelle. Les résultats semblent s'aligner avec relativement peu d'erreur. Mais lorsque les échantillons de matière organique sont ajoutés en troisième pôle du mélange, la prédiction du modèle diffère drastiquement de la réalité. Le problème de ce dernier pôle provient peut-être de sa grande hétérogénéité entre les différents types de matière organique (géologique, biologique, pédologique, etc).

A la suite de ce chapitre, un protocole méthodologique a pu être exprimé :

- L'utilisation du zoom le plus faible (1,113  $\mu\text{m}/\text{px}$ ) est optimal pour des sédiments hétérogènes car il permet de mesurer une plus grande fourchette de taille.
- Il est préférable, si possible, de ne pas préparer le sédiment car toute préparation testée altère la taille et/ou la forme des particules.
- Afin de réduire les biais liés à la caractérisation du contour de la particule pour les grains présentant moins de 10 pixels de surface (Pirard et al., 2005), les particules inférieures à 20  $\mu\text{m}$  seront retirés du jeu de donnée.
- Comme les distributions des paramètres de forme sont non-paramétriques et ne suivent pas une loi normale, l'indice statistique de paramètre centrale à privilégier est la médiane (et non la moyenne) (Saporta, 2011).

Le traitement des résultats sera fait d'abord avec une exploration des variations des sources sédimentaires par ACP, puis une AFD sur les axes de l'ACP confirmera les groupements identifiés. Cette AFD constituera un modèle linéaire permettant de prédire la contribution des sources dans les matières en suspension retrouvées à l'aval et constituées d'un mélange de ces sources.

## ANALYSE SPATIALE APPLIQUEE SUR LE BASSIN VERSANT MINIER DE THIO

Le protocole défini précédemment a été appliqué à plusieurs cas pratiques. Le premier cas est celui du fleuve Thio, en Nouvelle Calédonie. Son bassin versant est caractérisé par une géologie polarisée entre des roches sédimentaires et métamorphiques. Les roches métamorphiques ont subi une altération tropicale latéritique constituant des gisements de nickel. La partie métamorphique du bassin versant est donc caractérisée par une activité minière actuelle et passée, tandis que les roches sédimentaires ne sont pas affectées. Des tempêtes tropicales régulières sont à l'origine du déplacement d'une grande partie de la masse de sédiments érodés dans les deux parties du bassin versant (minier et non minier). Les échantillons de sédiments ont été prélevés tout au long du fleuve Thio et de ses affluents sur des laisses de crue déposés lors de ces tempêtes tropicales.

En observant la distribution de taille des particules, on constate des hétérogénéités entre les proportions de fines et de particules grossières. Toutefois, les différences observées ne semblent pas être clairement liées aux différences de géologie, d'activité minière ou de localisation amont/aval entre les échantillons. Ces variations pourraient donc simplement être le fait de variations hydrodynamiques locales. La taille ne permettrait pas de réaliser un traçage des différentes sources sédimentaires.

Par contre, l'utilisation de la morphométrie pour la discrimination des échantillons liés aux différentes sources potentielles. Une ACP a été réalisée sur les paramètres mesurés par le morphogranulomètre en étudiant les différents forçages possibles (géologique, activité minière, amont/aval, etc). Les résultats pointent vers une combinaison de l'activité minière, de la géologie et de la position amont/aval. Les échantillons des affluents sont donc regroupés en quatre groupes sources : (1) l'affluent Fanama, (2) un groupe amont avec de l'activité minière, (3) un groupe aval avec de l'activité minière, et (4) un dernier groupe regroupant les affluents de la rive gauche du fleuve Thio. Les échantillons du fleuve Thio, se retrouvent au milieu de ces différentes sources et semblent bien constituer un mélange de ces 4 sources.

L'AFD sur les échantillons sources produit un modèle performant avec ces quatre groupes et confirme donc la pertinence de ce classement. Les prédictions sur les échantillons du fleuve Thio montrent des augmentations de proportions pour les groupes (1), (2), et (4) lors de la confluence des affluents avec le fleuve. Les signatures de ces groupes semblent donc bien se retrouver au sein des mélanges. La proportion de particules attribuées au groupe (3) par le modèle est la plus élevée et reste relativement constante de l'amont à l'aval. Ce signal semble donc correspondre à la majorité des particules charriées par le fleuve et est peut-être associée à d'autres sources (certains affluents n'ont pas été prélevés suite à des contraintes de terrain difficile).

## ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE APPLIQUEE SUR LE BASSIN KARSTIQUE DE NORVILLE

Le système karstique de Norville est composé d'un ruisseau, le Bébec, se perdant totalement dans une perte. L'intégralité de l'eau introduite dans cette perte est transférée par des conduits karstiques à travers la craie à silex jusqu'à l'exutoire de cet aquifère, situé à 2 kilomètres, 100 mètres de dénivelé plus bas en pied de falaise au bord de la Seine, à la source du ruisseau du Hannetot. Ce dernier rejoint la Seine 200 mètres plus loin.

A la source du Hannetôt, lors de fortes crues, des pics de turbidité très importants sont observés régulièrement. Cet hydrosystème présente donc un transfert sédimentaire important lié à l'érosion du bassin versant du Bébec s'infiltrant dans l'aquifère par sa perte.

Afin de faire l'inventaire des différentes sources sédimentaires, 15 échantillons ont été prélevés à partir de la carte de la géologie et des formations supérieures du bassin versant. L'ACP sur les valeurs de taille et de forme mesurées au morphogranulomètre montre que toutes les formations identifiées se discriminent les unes des autres. Un modèle avec une AFD est donc réalisé et montre peu de recombinaison. Ce modèle va donc pouvoir être utilisé pour prédire les contributions de ces sources dans les matières en suspension retrouvées à la perte du Bébec et à la source du Hannetot.

Des prélèvements d'eau ont été réalisés chaque mois durant 3 ans à la perte du Bébec et à la source du Hannetot pour observer les matières en suspension au morphogranulomètre :

- A la perte du Bébec, on découvre une signature relativement constante à l'exception des crues automnales et estivales, qui se caractérisent par la présence de particules à la forme plus irrégulières. En utilisant le modèle sur les sources sédimentaires défini précédemment, les résultats indiquent que les crues sont associées aux colluvions et sols crayeux, liés à l'érosion provoquée par celles-ci. A contrario, le reste des échantillons se rapproche de la vase du Bébec, qui indique que la matière en suspension est principalement constituée de particules en resuspension provenant de l'amont du cours d'eau.
- A la source du Hannetot, les crues sont beaucoup moins marquées qu'à la perte et les restitutions sont pratiquement constantes en absence de forçage météorologique ; probablement du fait d'un effet tampon et intégrateur du karst. On retrouve toutefois, grâce au modèle sur les sources sédimentaires, une crue estivale qui se détache des autres échantillons avec une signature proche de l'argile à silex (produit d'altération de la craie à silex, la roche dans laquelle se situe le karst). Les autres échantillons ont une signature proche de la vase prélevée dans le Hannetot et dans le Bébec.

Pour revenir un peu plus dans l'historique des transferts sédimentaires, une carotte a été prélevée dans les dépôts du bassin se trouvant à la source du Hannetot en 2017. Ces dépôts ayant été curés en 2013, la carotte de 34 cm correspond à quatre ans de dépôts. Des analyses avec de la granulométrie laser et la morphogranulométrie ont été effectuées. Les résultats des deux analyses tendent vers les mêmes conclusions : le signal est relativement constant tout au long de la carotte mis à part deux niveaux où on observe deux pics francs à environ 6 et 27 cm. Ces deux niveaux montrent des distributions de tailles multimodales (le reste de la carotte est unimodale) et des formes irrégulières et plus allongées. En appliquant le modèle de mélange on observe une augmentation du nombre de particules associées à la craie altérée et une diminution pour la vase du Bébec pour ces deux niveaux. Il est possible de relier ces observations à la crue estivale observée sur les échantillons mensuels, qui présentait également une plus grande quantité de craie altérée par rapport à la vase du Bébec et du Hannetot. Ces deux niveaux correspondraient donc à deux crues.

Pour étudier ces crues plus en détail, une crue a été simulée en octobre 2018 en injectant 20m<sup>3</sup> d'eau dans la perte du Bébec avec un traceur artificiel, la fluorescéine, tout en observant la réaction à la source du Hannetot. La réaction hydrodynamique à la source se décompose en plusieurs phases : (1) une forte augmentation de la pression 14h plus tard accompagnée d'un faible pic de turbidité liés à l'arrivée de l'onde causée par l'injection soudaine ; (2) 19h après l'injection, la retombée de la pression s'accompagne de la première détection de la fluorescéine, la concentration de cette dernière va augmenter jusqu'à atteindre (3) un pic puis redescendre jusqu'à (4) disparaître quasi entièrement deux jours après l'injection.

Puisque l'eau a été injectée directement à la perte, quasiment aucune érosion ne s'est réalisée en surface. Un léger signal de crue est tout de même observé avec une augmentation très légère de la turbidité lors des phases (1) et (2). Les distributions de taille des particules lors de ces augmentations montrent une plus grande asymétrie négative. Leur forme est plus irrégulière et ils sont de nouveau associés à la craie altérée, comme pour la crue estivale des échantillons mensuels et les niveaux de crue de la carotte. Cette craie altérée provient donc soit de l'érosion du karst ou de la resuspension des sédiments à l'intérieur du karst, puisque l'eau a directement été injectée dans le réseau karstique via la perte.

Pour comparer ces observations à une crue réelle, une crue hivernale a été suivie en mars 2019. Cette crue a été suffisante pour faire déborder la doline et provoquer des augmentations de turbidité très importantes (plus de 400 NTU à la perte du Bébec et plus de 250 NTU à la source, dix fois plus que lors de la crue simulée).

- A la perte, les distributions de taille montrent une asymétrie très négative lors du pic de turbidité. La forme des particules varie très fortement et ponctuellement lors de la montée de la crue, présentant des particules beaucoup plus irrégulières, associées au limons, colluvions et silts (au détriment de la proportion de la vase du Bébec). Les observations au Microscope Electronique à Balayage (MEB) confirment ces prédictions avec beaucoup plus de particules pédologiques observées pendant la montée. C'est donc clairement l'érosion du bassin versant qui se déroule au début de la crue qui est observée ici.
- A la source du Hannetot, la taille médiane (D50) augmente lors de la montée, du pic et de la récession. La forme des matières en suspension varie beaucoup moins qu'à la perte et les variations principales observées lors de la crue correspondent à une augmentation de l'élongation des particules, également lors de la montée, du pic et de la récession. Ces particules plus allongées sont associées à de plus grandes proportions en limon, craie altérée et craie pure (au détriment de la proportion en vase du Bébec). Au MEB, la crue est caractérisée par une dominante minérale avec des particules d'origine pédologique lors de la montée. Cette dominante minérale est donc liée à l'association de matériel intra-karstique aux particules pédologiques provenant de la perte. Ces dernières sont fortement filtrées dans le système souterrain car seules des quantités beaucoup plus faibles sont observées à la source.

La Perte du Bébec et la source du Hannetot montrent donc des transferts relativement identiques durant les étiages mais la perte du Bébec subit des arrivées de particules très irrégulières durant les crues, en particulier les crues estivales et automnales, qui présentent des signatures des sols crayeux et des colluvions limoneuses, avec moins de vase du Bébec. Ces particules proviennent de l'érosion, plus marquée lors des crues, en particulier lors de l'été et du début de l'automne, lorsque les sols sont secs. La crue hivernale suivie en mars 2019 montre également une augmentation similaire des contributions de colluvions et de sols crayeux durant la montée de la crue.

À la source, les prélèvements de sédiments en suspension montrent des signatures de crue qui se détachent également de l'étiage, mais qui sont beaucoup moins marquées qu'à la perte. Cette signature correspond à une augmentation de l'élongation mais pas des autres paramètres de forme et de taille (contrairement à la perte qui présente une augmentation sur tous les paramètres lors des crues estivales et automnales). Le modèle attribue ce signal à celui des limons, colluvions et de la craie altérée. La différence par rapport à la perte vient probablement du fait qu'une partie des particules érodées ait été filtrée à l'entrée du système karstique ou sédimentée à l'intérieur. D'autre part, se sont ajoutés au mélange des sédiments de la craie encaissante, qui s'est également érodée lors du passage de l'eau en souterrain. La carotte sédimentaire prélevée à la source va également dans ce sens, on y identifie 2 niveaux de crue probable montrant des élongations plus importantes, indiquant la présence de particules plus allongées, attribuées à la craie altérée et aux limons par le modèle.

La morphogranulométrie a donc permis d'identifier les sources sédimentaires et de calculer leur contribution à l'entrée et la sortie d'un karst. Différents forçages ont été mis en évidence : météorologique et saisonnier sur les deux sites (perte et source). En combinaison avec d'autres analyses, la morphogranulométrie a également permis de confirmer les sources sédimentaires des niveaux de la carotte sédimentaire identifiés comme niveau de crue par d'autres méthodes. En associant la morphogranulométrie avec de la microscopie à balayage (MEB) sur une crue, il a été possible d'identifier des phénomènes de resuspension et d'identifier la nature de ces particules et de quantifier leurs proportions.

#### ANALYSE DES ORIGINES SEDIMENTAIRES DE LA TURBIDITE DANS UN FORAGE D'ALIMENTATION EN EAU POTABLE (AEP)

Cette dernière partie utilise l'analyse morphogranulométrique pour répondre à un problème impactant directement la société afin de tester l'opérationnalité de la méthodologie à la vulnérabilité du karst à l'introduction des MES de surface. En effet, la ville de Gisors s'alimente en eau potable dans un forage captant des eaux de l'aquifère karstique de la craie Campanienne. A la suite de fortes précipitations sur une longue durée, plusieurs pics de turbidité ont été observés depuis 2016.

Afin d'identifier l'origine de la turbidité, la ville a mandaté Suez Consulting qui a identifié un temps de transfert d'environ 2h entre les précipitations et l'arrivée turbide. Ils ont également réalisé un inventaire des marqueurs d'engouffrement karstiques et un traçage artificiel sur les points d'infiltrations les plus évidents. Ce traçage n'a pas permis d'observer de connexion entre les points d'injections et le forage AEP.

Pour compléter ces analyses, nous avons réalisé une étude des sédiments en combinant des observations au granulomètre laser, au Microscope Electronique à Balayage (MEB) et au morphogranulomètre. Trois échantillons sont étudiés pour analyser la crue du 22 janvier 2018. Un échantillon lors du pic de turbidité, de la décrue, et de l'étiage.

La granulométrie a permis d'observer que sur tous les échantillons, on retrouve des particules avec des tailles autour de 80  $\mu\text{m}$ . Par contre, une très grande quantité de particules fines (de 1 à 20  $\mu\text{m}$ ) sont présentes uniquement pendant le pic de crue.

Au MEB on constate des différences sur la quantité de particules qui est beaucoup plus importante lors de la crue. On observe également la présence de diatomées, marqueur des eaux de surface,

dans l'échantillon de crue. On retrouve dans cet échantillon une quantité très grande de particules très fines tapissant le fond du filtre alors que l'étiage et la décrue en sont beaucoup moins chargés.

Pour l'analyse morphogranulométrique, des échantillons de sources sédimentaires potentielles ont été prélevés. Les différentes sources potentielles restantes après le traçage de SUEZ Consulting sont : la Lévrière et l'Epte, les deux cours d'eau adjacent au forage ; ainsi que 2 mares. Les sédiments en suspension et les dépôts de vase ont donc été prélevés à ces sources. Des dépôts limoneux du plateau sur lequel se situe les mares ont aussi été échantillonnés.

Le modèle de prédiction des sources indique la présence probable de connexions entre le forage et l'Epte, le canal de la Lévrière et les mares, en étiage comme en crue. Il montre la présence des mêmes sources qu'en étiage, mais également l'apparition de nouvelles sources sédimentaires : les limons du plateau et les sédiments de l'Epte et du canal de la Lévrière. Lors de la crue, l'apparition de diatomée confirme cette connexion avec des eaux de surface. Ces sédiments seraient remis en suspension par un écoulement plus tumultueux du fait des fortes précipitations.

La plupart des particules responsables de la turbidité dans l'échantillon de crue sont très fines (70% sont inférieures à 20  $\mu\text{m}$ ) et n'ont pu être mesurées au morphogranulomètre. Elles ne sont donc pas prises en compte dans le modèle. Le modèle renseigne uniquement sur les variations dans les 30% de particules observables.

Les limites restent donc cette fourchette de mesure du morphogranulomètre, ne permettant pas de mesurer une grande part des particules de la crue mais aussi le manque d'exhaustivité dans l'échantillonnage des sources. La craie du Campanien (constituant l'encaissant du réseau karstique) ainsi que les alluvions de la Lévrière (en bordure desquelles se trouve le forage) sont deux sources potentielles qui permettraient de compléter ce manque.

Pour résoudre ces verrous, il serait possible de réaliser une nouvelle campagne d'échantillonnage de sources sédimentaires, mais également de suivre un nouveau pic de turbidité pour mesurer les prélèvements avec le zoom le plus puissant (0.185  $\mu\text{m}/\text{px}$ ) qui permet de mesurer des particules de plus petites taille (chapitre II.D). Afin de confirmer les conclusions sur la taille et la forme, l'utilisation d'autres méthodes de traçages serait également pertinente (traçage géochimique et isotopique des sédiments, de l'eau, traçage artificiel).