

**Descriptif du projet de thèse :**  
**Quantification de la dynamique érosive et traçage de sources**  
**en territoire agricole**  
**(bassin versant de la Canche, Nord-Pas de Calais)**



Mines de Douai<sup>1</sup>  
Département Génie Civil & Environnemental  
764 Bd Lahure - CS 10838  
59508 Douai Cedex



Mines ParisTech<sup>2</sup>  
Centre de Géosciences  
35 rue St Honoré  
77305 Fontainebleau cedex

Nom du directeur de thèse HDR :

Nore Edine Abriak<sup>1</sup>

Nom, prénom et affiliation des co-encadrants :

Claire Alary<sup>1</sup>, Christine Franke<sup>2</sup>

Adresse courriel du contact scientifique :

[claire.alary@mines-douai.fr](mailto:claire.alary@mines-douai.fr)

(tél. 03 27 71 26 89)

### Contexte scientifique :

Selon les chiffres édités par le SOeS en 2013, l'érosion hydrique est estimée en moyenne à 1,5 t/ha/an en France et peut dépasser 10 t/ha/an dans certaines régions, notamment dans le Nord de la France, dans les zones de grandes cultures. Aujourd'hui, dans ces zones, l'extension des surfaces imperméables et l'évolution du parcellaire et des pratiques agricoles ont pour conséquence la perte du capital « sol » par ravinement, l'augmentation des risques d'inondations et de coulées de boues et la dégradation de la qualité des eaux des rivières. De 1985 à 2000, près de 46% des communes de la région Nord-Pas de Calais ont été touchées par les coulées boueuses, soit environ 6% des communes françaises concernées. Les réseaux des Voies Navigables en Nord-Pas de Calais sont également touchés par des problématiques d'envasement qui nuisent à la bonne navigabilité des cours d'eau et à la qualité des écosystèmes. Si une forte réflexion est faite en région sur la valorisation possible de ces matières, il reste important de pouvoir identifier les sources pour œuvrer à une réduction des masses de sédiments déposés. Cependant, la dynamique d'envasement d'un cours d'eau, la dégradation d'un bassin versant et l'altération de sa dynamique hydrique et de son fonctionnement écologique sont actuellement difficilement évaluables. De même, l'efficacité des dispositifs de lutte contre l'érosion mis en place dans un bassin, n'est pas quantifiable. Différentes méthodologies sont actuellement mise en œuvre par les scientifiques pour répondre à cette problématique.

La quantification des taux d'érosion peut se faire à travers l'acquisition de mesures *in situ* de turbidité ou charges en MES à l'exutoire du bassin versant. Ces résultats sont souvent associés à une approche par la modélisation des flux de particules. L'utilisation des isotopes radioactifs environnementaux (<sup>7</sup>Be, <sup>137</sup>Cs, <sup>210</sup>Pb...) pour quantifier l'érosion mais aussi évaluer les temps de transit des particules est également bien décrite dans la littérature (<sup>1</sup>Bonté et Mouchel, 2002 ; <sup>2</sup>Evrard et al., 2007 ; <sup>3</sup>Haddadchi et al., 2013 ; <sup>4</sup>Gourdin, 2014). L'utilisation des radiotraceurs environnementaux se montre également efficace pour la quantification des taux de sédimentation et de remise en suspension des sédiments dans les cours d'eau (<sup>5</sup>Zebracki, 2008). Le couplage des outils de suivi en continu et avec l'utilisation des marqueurs radioactifs pour la quantification du transfert particulaire apparaît donc comme une démarche intéressante et robuste.

Si certains outils géochimiques sont bien présents dans la littérature pour le traçage de sources (<sup>6</sup>Tessier, 2003 ; <sup>7</sup>Collins et Walling, 2002 ; <sup>8</sup>Duck et al., 2001), les outils magnétiques sont des voies innovantes encore peu utilisées. Le magnétisme environnemental constitue un outil complémentaire et performant aux méthodes « traditionnelles ». En effet, la haute sensibilité des techniques magnétiques et leur utilisation « simple » et non-destructive offrent la possibilité de tracer des processus sédimentaires spatio-temporels

directement sur le terrain et à partir d'un grand nombre d'échantillons bruts (non-traités) analysés en laboratoire, quelque soit leur origine (sols, poussières, MES, boues/sédiments du fond, etc.). Les informations récoltées sont multiples et variées, en relation avec la nature, la concentration et la taille des particules magnétiques (<sup>9</sup>Franke et al. 2009).

Ces techniques constituent donc un potentiel intéressant pour la mise au point d'indicateur ou de descripteur de l'état du milieu. A notre connaissance, l'utilisation de ce type de données pour le développement d'indicateurs n'a pas encore été réalisée ailleurs.

## Sujet de recherche :

Il est proposé, dans le cadre de cette thèse, d'élaborer un descripteur qualitatif et quantitatif du fonctionnement des mécanismes d'érosion dans un bassin versant. L'objectif de ce travail est donc de développer une méthodologie pour qualifier et quantifier les problématiques érosives dans un bassin versant.

Ce travail se fera sur le bassin versant de la Canche (Région Nord-Pas de Calais, 1 284 km<sup>2</sup>, 320 km de long) très largement occupé par l'activité agricole (80% du territoire) et caractérisé par une problématique érosive lourde. Pour se faire, les processus d'érosion et de transfert des particules depuis les zones sources jusqu'à l'estuaire seront abordés à deux échelles d'observation.

On propose de travailler dans un premier temps à l'échelle du parcellaire agricole, zone sources de matières, où se situe la problématique érosive.

Dans un petit bassin versant élémentaire (dizaine d'hectares), qu'il conviendra d'instrumenter (suivi en continu du débit et de la turbidité), les flux de matière à l'exutoire seront quantifiés. L'analyse des résultats se fera en prenant en compte la géomorphologie des parcelles, les propriétés du sol drainé, les pratiques agricoles, la pluviométrie (quantité d'eau, récurrence des événements, etc.).

La dynamique érosive sur le parcellaire agricole de ce petit bassin versant sera également évaluée à partir d'une méthodologie issue de la géochimie qui s'appuie sur la mesure des radionucléides (<sup>137</sup>Cs, <sup>7</sup>Be, <sup>210</sup>Pb) sur les échantillons de sols superficiels en place, de sols érodés, et de matières en suspension.

Dans un deuxième temps, on propose l'élaboration d'un modèle du transport actuel de matières dans l'ensemble du bassin versant de la Canche. Les modalités du transfert solide se fera au travers une double approche :

- Reconstituer l'histoire des matières solides par la quantification de la dynamique sédimentaire au cours du temps. Celle-ci peut être approchée à partir de la mesure des radionucléides tel que le <sup>210</sup>Pb sur des colonnes sédimentaires prélevées dans les zones de dépôt du fleuve ;

- Mettre en œuvre un indicateur qui permette l'élaboration d'un modèle du transport actuel en apportant des réponses en termes de sources d'apport et de mode de transit. Un indicateur doit être alimenté par une typologie de données ou un éventail de données fiables et représentatives du problème à évaluer en intégrant au mieux sa complexité (hétérogénéité des milieux, spatialisation, temporalité des événements). Pour obtenir cette palette de données, un éventail d'analyses géochimiques et physico-chimiques seront menées sur les matières en suspension collectées dans le bassin versant en intégrant ses dimensions spatio-temporelles. Les techniques magnétiques sur le terrain et en laboratoire seront plus particulièrement investiguées. Elles comprennent la cartographie de susceptibilité magnétique sur le terrain, ainsi que les mesures d'hystéresis magnétique des MES et les analyses de « First Order Reversal Curves » (FORC) et la déconvolution des « endmembers » (e.g. Kissel et al. 2014).

*In fine* un modèle « érosion » à l'échelle du bassin versant devrait pouvoir être proposé.

1. Bonté P et Mouchel JM, 2002. Flux et temps de séjour des particules dans le bassin de la Seine. Programme PIREN-Seine 1998-2001, rapport de synthèse 2002.

2. Evrard O, Bièdiers CL, Vandaele K, Van Wesemael B. 2007. Spatial and temporal variation of muddy floods in central Belgium, off-site impacts and potential control measures. *Catena* 70 (3), 443-454

3. Haddadchi A, Ryder DS, Evrard O, Olley J, 2013. Sediment fingerprinting in fluvial systems: review of tracers, sediment sources and mixing models. *International Journal of Sediment Research*, 2013

4. Gourdin, E. 2014. Traçage des sources et quantification de la dynamique des sédiments en crue : application au bassin tropical montagneux de la Houay Xon au Laos. Thèse de Doctorat, Paris 11.

5. Zbracki, M., 2008. Devenir des polluants métalliques associés aux sédiments contaminés: impact des phénomènes de dépôt et de remobilisation sur le transfert des métaux dans la colonne d'eau. Thèse de Doctorat, Université de Paris XII.

6. Tessier, L. 2003. Transport et caractérisation des matières en suspension dans le bassin versant de la Seine : identification de signatures naturelles et anthropiques. Thèse de Doctorat, Ecole des Ponts ParisTech, 320p.

7. Collins, A.L. et Walling, D.E., 2002. Selecting finger printing properties for discriminating potential suspended sediment sources in river basins. *Journal of Hydrology*, 261: 218-244.

8. Duck, R.W., Rowan, J.S., Jenkins, P.A., and Youngs, I., 2001. A Multi Method Study of Bed load Provenance and Transport Pathways in an Estuarine Channel. *Physical Chemistry and Earth*, 26(9): 747-752

9. Franke, C., Kissel, C., Robin, E., Bonté, P., and Lagroix, F., 2009. Magnetic particle characterization in the Seine river system: Implications for the determination of natural versus anthropogenic input. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q08Z05, doi:10.1029/2009GC002544.

10. Kissel, C., Franke, C., Cojan, I., Kayvantash, D., Isambert, A., Carrillo, N., Martineau, N., Wandres, C., 2014. Dynamique spatio-temporelle des

## Collaborations :

Le travail de thèse bénéficiera d'un co-encadrement entre le Département Génie Civil et Environnemental des Mines de Douai (Nore Edine Abriak, Claire Alary) et le laboratoire de Géosciences de Mines Paris-Tech (Christine Franke).

## Collaborations :

Le travail de thèse bénéficiera d'un co-encadrement entre le Département Génie Civil et Environnemental des Mines de Douai (Nore Edine Abriak, Claire Alary) et le laboratoire de Géosciences de Mines Paris-Tech (Christine Franke).

Il se déroule dans le cadre du projet Quasper : Quantification, Analyse et Suivi des Processus Erosifs : bassin versant de la Canche qui est soutenu financièrement par l'Agence de l'Eau Artois-Picardie. Cette dernière, dans le cadre son 10<sup>ème</sup> programme cadre (2013-18) a comme objectif de « retrouver des milieux naturels aquatiques de bonne qualité » à travers leur restauration et la limitation des entrants particuliers favorisant la turbidité et l'eutrophisation des milieux.

Dans ce projet, les collaborations sont déjà bien identifiées et mises en place. En particulier, pour mené à bien ce travail, il ait apparu indispensable de travailler en partenariat avec le Symcées : Syndicat Mixte pour le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux de la Canche qui travaille depuis de nombreuses années sur les problématiques érosives dans le bassin de la Canche Ce bassin versant fait déjà l'objet d'initiatives fortes de leur part quand à la réduction des flux de matières (mises en place de fascines, bandes enherbées). Le bilan « érosion », objet de la thèse correspond à une première étape d'un projet de lutte anti-érosion porté par le Symcées. A l'issu des 3 ans de thèse, des systèmes anti-érosion type fascines pourraient être mis en place sur le bassin versant du Pommeroy. La comparaison des résultats issus des deux périodes permettra de poser un diagnostic sur l'efficacité des ouvrages anti-érosion posés.

Nous proposons également une collaboration scientifique avec le LSCE (Dr Olivier Evrard, Gif sur Yvette). Ce laboratoire a été identifié pour sa grande compétence dans la mesure de traceurs radioactifs qui permettent la quantification des taux d'érosion et des taux de sédimentation.

## Etat du sujet dans le laboratoire et l'équipe d'accueil / synergie entre équipes

L'Ecole des Mines de Douai travaille depuis de nombreuses années sur la problématique des sédiments en mettant en place une dynamique de recherche pluridisciplinaire. C'est sur cette thématique que s'appuie la chaire industrielle Ecosed (Economie Circulaire des Sédiments), dans laquelle est intégré le sujet de thèse. Une premier axe de recherche concerne la valorisation des sédiments. Cet axe implique en particulier des questionnements sur les outils de caractérisation qui peuvent être déployés pour caractériser précisément ces matrices ; de ce fait le laboratoire est bien doté en appareil de mesures physiques (granulométrie laser, Porosimètre mercure, etc.) et chimiques (Chromatographie ionique, ICP-AES, ATG, GC-MS) adaptés à l'objet d'étude.

Un autre axe de développement concerne l'étude des processus de dépôt et de transfert des sédiments dans les cours d'eau, en particulier des sédiments contaminés. Cette problématique scientifique a démarré dans le cadre de la thèse de Mathilde Zebracki (2008). Dans cette thèse co-encadré avec le LSCE (Gif sur Yvette), les traceurs radioactifs ont été utilisés pour quantifier les processus sédimentaires dans les voies navigables du Nord-Pas de Calais. La thématique de recherche a perduré avec la thèse d'Erwan Simon (2008) qui a porté sur les problématiques de relargage des contaminants organiques lors de la remobilisation des sédiments, puis les post-doctorats de Marius Duncianu (2012) et Angel Belles (2013-2014).

Le Centre des Géosciences de Mines ParisTech situé à Fontainebleau est constitué de 6 équipes de recherche (Géologie/Sédimentologie, Géostatistique, Géophysique, Hydrogéologie (SHR), Géochimie (HR) et Géomécanique). Christine Franke est chargée de recherche et fait partie de l'équipe de Géologie/Sédimentologie. Les thématiques principales de l'équipe sont focalisées sur les géo-systèmes continentaux :

- Apport de l'hydrologie à la paléo-hydrologie dans la caractérisation des paramètres géométriques des systèmes méandriformes fossiles ;

- Intégration des outils d'analyse et de prédiction des dépôts fluviatiles dans les logiciels de modélisation (FLUMY) ;
- Interactions eustatisme/climat/dynamique fluviale au Quaternaire, compréhension des mécanismes d'incision et caractérisation des hétérogénéités des nappes alluviales ;
- Développement de méthodes analytiques sur les modes de transport particulaire avec un intérêt particulier sur les pollutions métalliques en domaine continental.

Avec pour objectif de créer/renforcer les collaborations entre Mines Douai et Mines Paris, différentes synergies et complémentarités ont été identifiées entre les deux partenaires. En particulier il s'agira de combiner le savoir faire et les compétences sur la géochimie des sédiments et les matières en suspension développés à Mines Douai aux travers des projets MeSDeRIC et GEDSeT (Alary *et al.* 2010, 2011 ; Simon, 2012 ; Zebracki, 2008) et les travaux de Christine Franke à Mines Paris effectués sur le magnétisme environnemental dans le cadre du programme PIREN Seine (Franke *et al.* 2009, 2011, 2013 ; Kissel *et al.* 2014).

## Retombées scientifiques

L'objectif de ce projet est de mettre en place un nouvel indicateur qui permette l'évaluation de la dynamique érosive d'un bassin versant à partir de données issues de la géochimie.

On propose de s'appuyer en particulier sur les techniques de traçage magnétique. Ces dernières, basées sur la présence d'une fraction métallique naturelle (ou anthropique) dans les matières en question (sol/boues/matières en suspension (MES)) sont des outils particulièrement puissants et adaptés à la problématique érosive. Elles permettent non seulement de discriminer les sources de matières provenant de différents substrats géologiques mais aussi de distinguer les matières récentes issues du sol, des sédiments de fond de cours d'eau remobilisés. Dans l'étude des bassins versants, les outils magnétiques sont des voies innovantes encore peu utilisées.

## Retombées socioéconomiques :

Dans les milieux fragilisés, la dynamique érosive impacte tout le territoire par la dégradation de la qualité des eaux, la perte en sol fertile et la fragilisation du tissu socio-économique par les inondations et les coulées de boues. Ainsi dans le bassin versant de la Canche, proposé comme site modèle dans ce projet, ~500 t/jour de matières en suspension sont apportés dans la baie. L'indicateur devrait permettre d'élaborer un modèle « érosion » à l'échelle du bassin versant et d'évaluer *in fine* l'efficacité des dispositifs de lutte contre l'érosion mis en place dans les bassins.

## Bibliographie :

- ALARY, C., Demougeot- Renard, H., 2010. Factorial kriging analysis as a tool for explaining the complex spatial distribution of metals in sediments. *Environmental Science & Technology*, Vol 44, N°2, pp 593-599.
- ALARY, C., Lemièrre, B., Haouche, L., 2011. Granulométrie et contamination comparées des sédiments des voies navigables en Wallonie et Nord de la France, enjeux pour la valorisation. *Mines & Carrières*, Vol HS, N°181, pp 25-32.
- FRANKE, C., Kissel, C., Robin, E., Bonté, P., and Lacroix, F., 2009. Magnetic particle characterization in the Seine river system: Implications for the determination of natural versus anthropogenic input. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q08Z05, doi:10.1029/2009GC002544.
- FRANKE, C., Baati, S., Evrard O., Kissel, C., Audiguier, M., Ayrault, S., Bonté, P., 2011. Variabilité saisonnière de la fraction magnétique (métallique) des matières en suspension dans le bassin versant de la Seine, programme PIREN-Seine, rapport annuel 2010.
- FRANKE, C., Kissel, C., Konecny, L., Cojan, I. 2013. Caractérisation des dynamiques des cycles oxydo-réducteurs du fer en Seine par le développement des traceurs physico-chimiques. programme PIREN-Seine, rapport annuel 2012.

- KAYVANTASH, D., 2013. Caractérisation magnétique et microscopique des (nano)particules métalliques dans la Seine. Rapport de Stage Master 2, IPGP et Centre de Géoscience/Ecole des Mines de Paris, France.
- KISSEL, C. Franke, C., Cojan, I., Kayvantash, D., Isambert, A., Carrillo, N., Martineau, N., Wandres, C., 2014. Dynamique spatio-temporelle des phases ferrugineuses dans la matière en suspension en Seine. programme PIREN-Seine, rapport annuel 2013.
- SIMON, E. 2012. Impact de la contamination en HAP de sédiments de fond de cours d'eau sur la qualité de la colonne d'eau. Thèse de Doctorat, USTL (Lille 1).
- ZEBRACKI, M., 2008. Devenir des polluants métalliques associés aux sédiments contaminés: impact des phénomènes de dépôt et de remobilisation sur le transfert des métaux dans la colonne d'eau. Thèse de Doctorat, Université de Paris XII.
- ZEBRACKI, M., Bonté, P., Alary, C., 2007. Beryllium-7 as a tracer for short-term sediment dynamics in the Scarpe River, France. 10th International Symposium on River Sedimentation, RUSSIE.