

Courriel :  
[b.lemiere@brgm.fr](mailto:b.lemiere@brgm.fr)



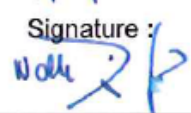
## GeDSeT Gestion Durable des Sédiments transfrontaliers

---



Rapport final  
années 2008-2013  
BRGM/RP-62739-FR

**Vérificateur :**  
Nom : JR Mossmann  
Date : 24/10/2013  
Signature: 

**Approbateur :**  
Nom : N. Dorfliger  
Date : 27/11/2013  
Signature: 

*Interreg efface les frontières  
Interreg doet grenzen vervagen*



Union européenne :  
Fonds Européen de  
Développement  
Régional



## SOMMAIRE

I.	INTRODUCTION.....	4
II.	ACTION 1 .....	5
II.1.	RESUME ET ETAT FINAL.....	5
II.2.	OBJECTIFS ET METHODOLOGIE .....	6
II.3.	ETAT DES LIEUX DE LA GESTION DES SEDIMENTS .....	6
II.3.A	Enjeux de la problématique sédiment .....	7
II.3.B	Gisement des sédiments, situation comparée en France et Belgique .....	7
II.4.	METHODES RETENUES POUR L'ELABORATION DE L'OUTIL D'AIDE A LA DECISION.....	9
II.5.	CONSTITUTION D'UNE BASE DE DONNEES POUR L'EVALUATION DES SCENARIOS POSSIBLES ET LA CONCEPTION DE L'OUTIL .....	9
II.6.	REALISATION DE L'OUTIL.....	10
II.7.	DEFINITION DES SCENARIOS POSSIBLES SUR LA BASE DES HYPOTHESES DE GESTION ET EVALUATION AVEC LES INDICATEURS.....	15
III.	ACTION 2 .....	19
III.1.	CARACTÉRISATION : ANALYSE SUR SITE DES MÉTAUX LOURDS (2.1) .....	19
III.2.	CARACTÉRISATION : ANALYSE SUR SITE DES POLLUANTS ORGANIQUES (2.1).....	21
III.3.	CARACTÉRISATION : MESURES GÉOPHYSIQUES (2.1) .....	22
III.4.	COMPORTEMENT DES SÉDIMENTS SOUS L'EAU (2.2).....	25
III.5.	COMPORTEMENT DES SÉDIMENTS EN DÉPÔT (2.3).....	29
III.6.	TECHNIQUES DE TRAITEMENT (2.4) .....	31
III.7.	PHYTOSTABILISATION (2.5) .....	35
IV.	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	36
V.	BIBLIOGRAPHIE .....	37

## LISTE DES FIGURES

Figure 1	: Actions et sous-actions du projet GEDSET. ....	4
Figure 2	: Indicateurs de durabilité retenus. ....	12
Figure 3	: Diagramme de présentation des indicateurs de durabilité. ....	12
Figure 4	: Outil GeDSeT : saisie des éléments d'un scénario. ....	13
Figure 5	: Outil GeDSeT : calcul et présentation des résultats (exemple fictif). ....	14
Figure 6	: Curage non sélectif et mise en dépôt, Canal de Lens, 2010.....	16
Figure 7	: Mesures sur site, dépôt et Canal de Lens, 2010.....	19
Figure 8	: Déshydratation sur site, Canal Charleroi Bruxelles, 2011.....	20
Figure 9	: Comparaison entre mesure de Zn et Pb sur site et hors site, Canal Charleroi Bruxelles, 2011. ....	21
Figure 10	: Mesures de résistivité et chargeabilité, Canal de Lens, 2010. ....	22
Figure 11	: Mesures de magnétisme, Canal de Lens, 2010.....	23

Figure 12 : Coupe de Résistivité électrique et de facteur métal (conductivité imaginaire) sur le tronçon de canal de Lens entre le pont de chemin de fer (point 0) et la jonction avec le canal de la Deûle .....	25
Figure 13 : Courbe de calibration pour deux capteurs passifs de masses différentes (cercles pleins 0,5g POM ; triangles vides 1g POM) représentant le coefficient de partage KPOM en fonction de l'hydrophobie des HAP Kow.....	27
Figure 14 : Remise en suspension des sédiments par le curage (gauche) et la navigation (droite).....	28
Figure 15 : Suivi de la turbidité par sonde multiparamétrique (gauche) et lors du prélèvement (droite).....	28
Figure 16 : Adsorption de HAP sur le capteur passif LDPE pour le sédiment de Lens.....	30
Figure 17 : Site de dépôt, relevé de fosse et suivi pXRF in situ.....	30
Figure 18 : Schéma de traitement de la fraction limoneuse.....	32
Figure 19 : Evolution de la teneur en Zn, Pb, Cu et Hg.....	33
Figure 20 : Diffractogrammes des ciments à base de sédiments.....	34

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Types de pollutions dans l'outil, en vue de l'aide à la décision.....	10
Tableau 2 : Scénarios existants et nouveaux pour lesquels les données de l'outil peuvent être utilisées.....	18
Tableau 3 : Les 14 échantillons prélevés pour les analyses géophysiques : position, type d'anomalie géophysique sur le terrain et mesures de susceptibilité.....	24
Tableau 4 : Récapitulatif des essais en cours de déploiement concernant les facteurs influençant la remise en solution de HAP.....	27
Tableau 5 : Echantillons choisis pour les essais de valorisation en voie cimentière.....	33
Tableau 6 : Caractéristiques du ciment visé.....	34

## I. INTRODUCTION

Le projet GeDSeT - Gestion Durable des Sédiments Transfrontaliers a été déposé dans le cadre du PROGRAMME TRANSFRONTALIER INTERREG IV "Coopération territoriale européenne" France - Wallonie.

Ce projet de 4 ans visait à :

- apporter des connaissances sur les critères à prendre en compte pour une gestion durable des sédiments de fond de cours d'eau,
- proposer une méthodologie d'aide à la décision applicable de façon transfrontalière qui prenne en compte ces critères,
- favoriser le développement pérenne et le transfert de connaissances et de compétences,
- inscrire les "bonnes pratiques" du management des sédiments dans une perspective durable de management des ressources en eau et de développement du transport régional par voie d'eau.

Les partenaires impliqués dans ce projet sont les suivants : ARMINES (Centre commun Armines – Ecole des Mines de Douai) opérateur chef de file du projet, l'ISSEP (Institut Scientifique de Service Public, organisme belge), le CTP (Centre technologique international de la Terre et de la Pierre, organisme belge), l'INERIS et le BRGM.

Le projet est organisé en actions et sous-actions, comme suit :

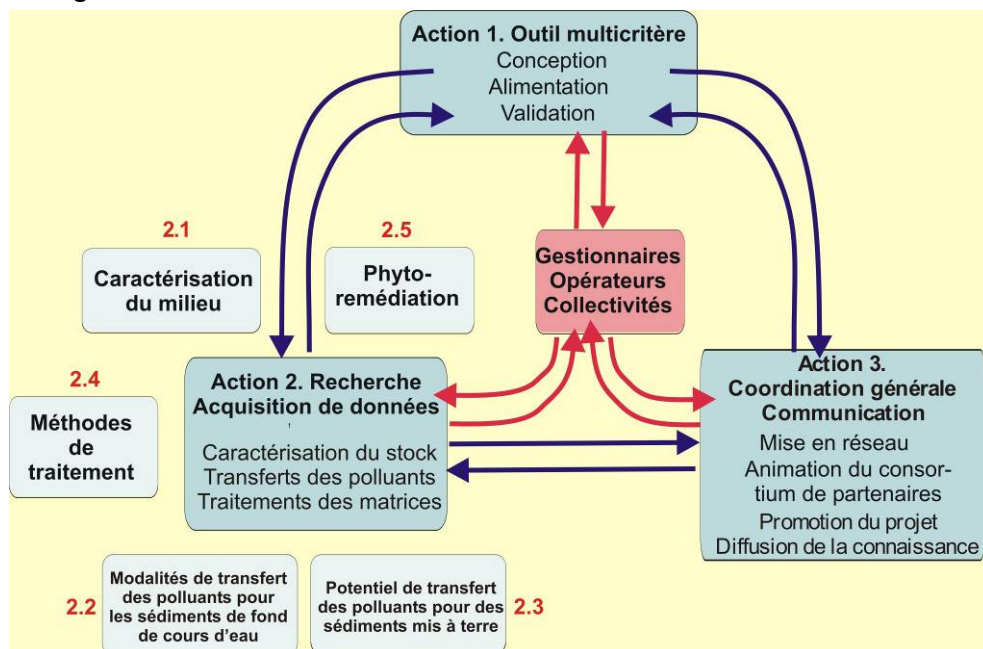


Figure 1 : Actions et sous-actions du projet GEDSET.

Le BRGM est plus particulièrement impliqué dans l'action 1 (constitution de l'outil) dont il a la responsabilité et contribue à l'action 2, notamment aux travers des sous actions de recherche 2.1 et 2.3.

**Le présent rapport fait une synthèse des travaux du BRGM dans le cadre du projet GEDSET.**

## II. ACTION 1

### II.1. RESUME ET ETAT FINAL

La phase d'acquisition des informations sur les modes de gestion wallons et français des sédiments de fond de cours d'eau, ainsi que l'étude bibliographique sur les modes de gestion des sédiments de curage, leur décontamination et leur pollution ont été poursuivis jusqu'au terme du projet afin d'assurer une mise à jour constante des informations. L'information est structurée sous forme de « base des données » regroupant des tables dédiées (État des Lieux, Situation avant dragage, Caractérisation, Dragage, Transport, Dépôt, Prétraitement, Traitement, Stockage, Valorisation). Ces tables ont été créées pour recenser les modes de gestion, les usages et les technologies existantes et éprouvées, leurs capacités de traitement et performances.

Les rencontres avec les différents acteurs et experts de la gestion des sédiments français et wallons ont permis d'une part, de collecter informations et données et, d'autre part, de préciser les scénarios pour la conception de l'outil, et les paramètres de l'analyse multicritères. Les critères retenus pour l'évaluation des scénarios de gestion de sédiments, les méthodes d'évaluation de ces critères et le mode de restitution des résultats de cette évaluation ont déjà reçu un retour positif et les principes retenus pour l'élaboration de l'outil ont été validés. En 2011, la conception de l'outil ayant été validée, la phase de développement de l'outil a donc été entreprise et une première version fonctionnelle de l'outil d'aide à la décision a été produite en fin d'année.

L'équipe projet a participé au colloque GB-SIM de Herstal, le 4/10/2011, lors duquel de nombreux échanges ont eu lieu avec les industriels pour affiner les scénarios notamment. Les tables de « bases de données » constituent, avec les scénarios mis au point, la base de l'outil d'aide à la décision. Un aller et retour constant entre les résultats des simulations et le contenu des bases a été effectué, afin de s'assurer de la pertinence des résultats. L'avancement des travaux de recherche (action 2) avec notamment les données recueillies autour du chantier de curage du canal de Lens (février-septembre 2011) a permis également d'alimenter les bases. Des présentations de l'outil ont été organisées début 2012 pour présenter l'outil au SPW et à VNF, et recueillir les observations. SPW et VNF ont émis des commentaires positifs sur le concept « what-if » de l'outil ainsi que sur l'intégration d'options très en avance sur la technologie disponible, les pratiques ou la réglementation afin notamment d'en favoriser l'évolution. Par ailleurs, les nombreuses remarques techniques sur le prototype ont contribué au développement d'une version plus aboutie de l'outil.

Cette version a été présentée lors du colloque final du projet, à Douai en mars 2013. Les remarques collectées lors de ce colloque et jusqu'à la fin du projet ont donné lieu à la réalisation d'une version finale. Elle figure en annexe du présent rapport. Elle est utilisable sur tout micro-ordinateur équipé de Microsoft Excel 2010 avec une configuration Windows française.

Cet outil est librement diffusable au sein de VNF et utilisable sous réserve qu'il y soit fait explicitement référence, comme tout produit de recherche scientifique financé par l'Europe. Les données propriétaires qu'il utilise ne sont pas accessibles ou disséminables dans la version finale. C'est le cas de certaines informations communiquées par VNF. Seuls les résultats de calculs exploitant anonymement ces données peuvent être extraits et utilisés.

La question du maintien à jour de l'outil GeDSeT a été maintes fois évoquée. En l'absence de financement au delà du 30/06/2013, le BRGM, tout comme les autres partenaires de GeDSeT, ne s'engage à aucune mise à jour, support utilisateur ou maintenance. Si de nouvelles ressources venaient à être disponibles pour cette mise à jour, notamment à travers

de nouveaux projets du GIS 3SP, VNF pourra accéder aux évolutions de l'outil dans le cadre des conventions à venir.

## **II.2. OBJECTIFS ET METHODOLOGIE**

Les objectifs et la méthodologie générale de l'action 1 ont été détaillés dans le rapport 2009. On en rappelle ci-dessous les principaux points. L'action 1 a pour objet la conception d'un outil d'aide à la décision pour la gestion des sédiments basé sur une analyse environnementale et socio-économique de scénarios. Cet outil prend en compte les impacts environnementaux, les impacts sociaux, et les impacts économiques, au travers de flux de recettes et de dépenses. Il ne préconisera pas une solution unique, mais plutôt aidera à évaluer les conséquences et impacts potentiels de toutes natures des différentes décisions techniques à comparer : outil de type « what if », *que se passe-t-il si je mets en œuvre cette solution ?*

La démarche d'élaboration de l'outil comprend :

- Etat des lieux de la gestion des sédiments (analyse des enjeux, identification des éléments clefs à considérer et des scénarios potentiels (flowchart).
- Etat de l'art sur les méthodes existantes d'outil d'aide à la décision (apports potentiels de ces méthodes, méthodologie d'évaluation des scénarios).
- Constitution d'une base de données (enjeux, technologies, impacts).
- Conception de l'outil. Ce dernier comprend le flowchart (représentation graphique des scénarios possibles), la liste d'indicateurs pour l'évaluation de ces scénarios, la base de données pour l'évaluation de ces indicateurs, et une interface informatique.

## **II.3. ETAT DES LIEUX DE LA GESTION DES SEDIMENTS**

Les informations sur les modes de gestion wallons et français des sédiments de fond de cours d'eau ont été recueillies et une étude bibliographique sur les modes de gestion des sédiments de curage, leur décontamination et leur pollution a été réalisée.

Les rencontres avec les différents acteurs et experts de la gestion des sédiments français et wallons ont été organisées, aussi bien avec VNF qu'avec des représentants du laboratoire de recherches hydrauliques (SPW/DGO2) de la région wallonne, et avec les principaux acteurs industriels, collectivités et administrations concernés.

Une attention particulière a été portée sur les possibilités de traitement/valorisation des sédiments, en relation avec les contraintes réglementaires de plus marquées sur la gestion des sédiments (arrêté du 30 mai 2008, directive cadre européenne sur l'eau 2000/60) et les sites les accueillant (classement ICPE).

### **II.3.A Enjeux de la problématique sédiment**

Pour la définition des éléments clefs à considérer dans l'outil, nous nous sommes attachés à mieux définir le gisement de sédiments, et les différents paramètres susceptibles d'affecter les opérations de curage et la gestion ultérieure des sédiments (économiques, environnementaux, réglementaires, fonciers, sociaux, etc).

L'outil vise bien entendu à mettre en balance les impacts négatifs liés à la gestion de la voie d'eau et les impacts positifs résultant du passage possible du transport routier au transport fluvial. Il prend en compte également les impacts positifs, socio-économiques aussi bien qu'environnementaux, résultant de la valorisation des sédiments extraits, des moindres besoins en sites de dépôt, ou des espaces naturels créés.

### **II.3.B Gisement des sédiments, situation comparée en France et Belgique**

Les résultats présentés en mai 2010 ont fait l'objet d'une publication par la Société de l'Industrie Minérale (Alary et al., 2011). Ils ont alimenté la constitution de l'outil en 2011 à partir des résultats ci-dessous. On se reportera aux rapports 2010 et 2011 pour des informations plus détaillées.

#### **Texture des sédiments**

Une hypothèse fréquemment avancée est que les sédiments des canaux wallons sont plus fins que leurs homologues français. Plus généralement, on admet que la pollution se concentre dans les fractions les plus fines, encore que cette hypothèse soit surtout basée sur les pollutions par hydrocarbures.

En fait, les proportions de particules argileuses (< 2 µm) sont nettement plus faibles pour les sédiments wallons que pour les sédiments français, alors qu'il n'apparaît pas de différence significative pour les particules sableuses (> 50 µm). Cette différence ne s'explique pas par des raisons géologiques ou géomorphologiques, ni par des raisons anthropogéniques entre régions wallonne et française. Bien que théoriquement les méthodes utilisées doivent aboutir à des résultats comparables, on ne peut exclure la possibilité de différences systématiques entre coupures granulométriques de part et d'autre de la frontière, qui seraient passées inaperçues du fait de la gestion strictement nationale des sédiments.

#### **Répartition des polluants en fonction de la texture des sédiments**

Ne disposant pas ici de données sur la répartition des polluants dans chaque classe granulométrique (granulochimie), on s'est borné à comparer les teneurs en polluants avec le profil granulométrique des échantillons.

Dans les canaux wallons, les teneurs maximales en Pb, Zn, Cu, Cd, As, Co, Ni, Hg, décroissent des sédiments les plus fins vers les plus sableux. Cette tendance n'est pas observée pour les HAP ou les PCB.

Dans les canaux français, les teneurs maximales en Pb, Cd, Cr, décroissent des sédiments les plus fins vers les plus sableux. La tendance inverse est observée pour Cu, Ni et les HAP. Il n'y a pas de tendance nette pour Zn, As, Cr, Hg et les PCB.

Ces divergences peuvent être dues à des processus industriels locaux qui s'avéreraient surreprésentés dans les lots analytiques : par exemple, les sites métallurgiques du zinc ou du plomb situés sur le réseau français entraînent la présence de particules grossières riches en Zn, Cd ou Pb.

### **Répartition spatiale des teneurs en polluants**

On a tenté ici d'estimer la variabilité de la contamination des sédiments au long d'une voie d'eau. Rappelons que les données VNF sont des analyses effectuées sur des composites et que nous n'avons aucune information sur les prélèvements élémentaires.

Il semble que la majorité des pics de pollution soient d'échelle hectométrique (50 m à 1 km). Cette échelle correspond approximativement à celle du cadastre industriel historique, et aux points de rejets. Les polluants sont groupés selon des associations typiques des sites industriels historiques, en fonction du type d'activité.

Certaines anomalies (Cd, Cu, Pb, Zn) affectent des longueurs significatives de bief, et la pratique actuelle de curage global n'est pas affectée par ce diagnostic. Ce serait le cas des 10 km entre Noyelles Godault et Douai. Les autres anomalies semblent ponctuelles (amplitude de 300m à 1 km) et pourraient être traitées plus efficacement avec des curages sélectifs (curage environnemental préalable des zones les plus affectées, ou extraction sélective préalable des zones les moins affectées).

L'échelle des pics de pollution les plus marqués semble être hectométrique (50 m à 1 km), tandis que des pollutions de plus longue amplitude s'observent sur des biefs entiers.

Une cartographie plus précise des teneurs en As, Pb, Cu et Zn dans les sédiments, à une maille plus serrée (100 m) à l'aide de la FPXRF permettrait de mieux cerner les enjeux de ces curages sélectifs, en termes financiers, en valorisabilité des matériaux et en termes d'impact environnemental. Ce dernier point est particulièrement important dans l'hypothèse d'une mise en dépôt, selon la pratique actuelle de VNF.



## **II.4. METHODES RETENUES POUR L'ELABORATION DE L'OUTIL D'AIDE A LA DECISION**

Un état de l'art sur les différentes méthodes existantes d'élaboration d'outil d'aide à la décision ainsi que leur application à la problématique sédiments et aux problématiques connexes a été réalisé, et résumé dans le rapport 2009. On citera par exemple :

- l'évaluation des risques environnementaux,
- l'analyse de cycle de vie (ACV),
- l'analyse cout-bénéfice (ACB),
- l'analyse multicritères (AMC).

On se reportera à ce rapport pour plus de détails.

Pour VNF (VNF, 2008), les critères de choix de la filière pour les sédiments de dragage doivent être étudiés de manière intégrée en prenant en compte les éléments suivants :

- conformité réglementaire,
- meilleure pratique environnementale,
- meilleure technique disponible,
- coût économiquement acceptable,
- contraintes sociales.

Suite à cet état de l'art, il est proposé que l'élaboration de l'outil GeDSeT, basée sur une analyse multicritère, s'appuie également (si cela est possible) sur des données (et concepts) élaborées à partir des méthodes d'ACV et ACB (voir rapport 2010).

La méthodologie du projet a fait l'objet d'une communication au congrès WASCON à Göteborg, Suède, (Michel et al., 2012).

## **II.5. CONSTITUTION D'UNE BASE DE DONNEES POUR L'EVALUATION DES SCENARIOS POSSIBLES ET LA CONCEPTION DE L'OUTIL**

Les bases de données définies et réalisées en 2009-2010 ont été finalisées en 2011 en vue de leur utilisation par l'outil. Elles ont continué à être alimentées jusqu'en 2013 lorsque de nouvelles données étaient disponibles. Ceci est notamment le cas lors des rencontres avec les industriels et professionnels du secteur, notamment à l'occasion du salon ENVIRONORD, et des colloques de projet à Douai en juin 2011 et mars 2013, qui ont réuni de nombreux participants et auxquels VNF a participé.

L'équipe projet a également participé au colloque GB-SIM de Herstal, le 4/10/2011, lors duquel de nombreux échanges ont eu lieu avec les industriels.

L'avancement des travaux de recherche (action 2) a permis également d'alimenter les bases, ainsi que les données recueillies autour du chantier de curage du canal de Lens (février-septembre 2011).

Lors de la dernière année, il est apparu comme particulièrement critique pour l'outil de développer certains aspects de la banque de données, et collecter des informations là où les données étaient peu disponibles ou encore insuffisantes, notamment sur les coûts et les rendements de dépollution.

Les discussions sur les types de pollution (nombre de niveaux à intégrer dans l'outil) ont montré l'intérêt d'affiner les niveaux existants, mais l'impossibilité d'en tenir compte de manière opérationnelle dans l'état actuel des techniques de caractérisation (tableau 1).

Types de pollution dans l'outil actuel	Types de pollutions à distinguer	Utilité et limitations
Ni organique ni métaux	Classement inerte	Facilite le réemploi libre (plates-formes multimodales)
	Classement non dangereux (faible pollution)	Nécessite un réemploi finalisé compatible (ex : clauses SETRA en technique routière)
Organique seulement	Hydrocarbures pétroliers ou HAP sans POPs ou dangereux	Traitements bio ou landfarming possibles
	Présence de POPs ou de substances particulièrement dangereuses	Difficulté d'obtenir un diagnostic assez fiable par les outils rapides – classement dangereux éventuel
Métaux seulement	Métaux lessivables	Contraintes sur le réemploi ou la mise en dépôt
	Métaux peu mobiles uniquement	Mesures pXRF possibles
Organique et métaux	Classement en déchet dangereux	Réduction du volume classé dangereux par traitements minéralurgiques
	Classement ni dangereux ni inerte	Difficulté d'obtenir un diagnostic assez fiable par les outils rapides

**Tableau 1 : Types de pollutions dans l'outil, en vue de l'aide à la décision.**

Un deuxième niveau de détail, au sein de l'outil, consiste à distinguer entre contamination légère et contamination forte, pour chacun des deux types de contamination. Ce niveau n'est pas précisé par des références à des teneurs, afin de permettre l'application de l'outil tant en Belgique qu'en France, ainsi que pour permettre l'adaptation à différents arrêtés ou évolutions de la réglementation.

La notion de "contamination forte" peut être associée aux seuils réglementaires du type déchet dangereux, nécessitant la mise en décharge du sédiment ou son traitement préalable à toute réutilisation. La notion de "contamination légère" peut être associée à la limite entre déchets inertes et déchets non dangereux. En l'absence de cadre réglementaire approprié, elle peut fixer une limite entre sédiments directement valorisables, et sédiments pouvant être valorisés dans un cadre contrôlé – ou après traitement "léger". Elle peut également donner lieu à appréciation à travers une analyse de risque.

Il revient donc à l'utilisateur d'apprécier le niveau de contamination du sédiment à gérer en fonction du cadre réglementaire qui lui est applicable, et des voies de gestion (réemploi, stockage) envisagées.

## **II.6. REALISATION DE L'OUTIL**

Le développement de l'outil proprement dit, initialement prévu sur une plateforme de logiciel de simulation industrielle, s'est finalement effectué sur la base des fonctions avancées du tableur Microsoft Excel. Ce choix permet une dissémination plus aisée de l'outil. Compte tenu de la diversité logicielle chez les partenaires et utilisateurs du projet, il a été décidé de figer le développement avec la version 2010 d'Excel. L'outil n'est donc pas compatible avec les versions antérieures (97, 2000, 2003) ou postérieures (2013). Il a été envisagé un moment de réaliser une version Open Source de l'outil (Open Office, Libre Office) mais une réécriture complète, hors des moyens du projet, aurait été nécessaire. L'absence de standardisation des tableurs Open Source rendait en outre encore plus délicate la stabilisation d'une version.

La phase finale de développement de l'outil a consisté en la consolidation des bases de données, en le développement d'interfaces exploitant les scénarios identifiés (voir § II.7) et la

réalisation d'infobulles (aides contextuelles) documentant ces interfaces et le contenu de l'outil. Ces infobulles et l'onglet informatif initial constituent la documentation de l'outil, aucun autre document n'étant produit par ailleurs. Le développement final s'est fortement appuyé sur les échanges avec toutes les parties prenantes de la gestion des sédiments, lors de visites, rencontres bilatérales ou colloques. Nous souhaitons remercier ici tous les acteurs pour leur contribution aux scénarios innovants développés par le projet.

Au sein de l'outil, les différents indicateurs présentés dans la Figure 2 sont utilisés pour comparer les effets directs et indirects des principaux choix pouvant s'offrir aux décideurs (opérateurs, industriels, collectivités et administrations). Ces choix sont formalisés au sein de scénarios. Les nœuds de décision constituent les nœuds d'une arborescence logique sur laquelle est basé l'organigramme de l'outil. Le développement de l'outil s'effectue donc en décrivant logiquement les scénarios discutés avec les différents intervenants, et en y rattachant les données présentes dans les bases de données. Cette démarche restera applicable après le terme du projet, puisqu'il sera toujours possible d'enrichir l'outil avec de nouveaux scénarios. Ceci nécessite seulement de compléter et mettre à jour les bases de données, et d'établir les liens fonctionnels correspondants.

A chaque étape de la création de scénario, l'outil propose par défaut les valeurs présentes dans les bases de données. Elles apparaissent en éléments pré-remplis dans les écrans de dialogue (Figure 4). Ceci permet à l'utilisateur de les remplacer par ses propres données lorsqu'elles sont plus précises ou plus pertinentes, et de faire fonctionner l'outil avec des données générales là où il ne dispose pas d'informations.

L'évaluation de la valeur de chaque indicateur de durabilité (environnementale et socio-économique) est effectuée à partir des données calculées à chaque étape, et consolidée en fin de scénario en fonction des choix et du devenir des sédiments. Elle se fait par comparaison avec un scénario de référence, qui par défaut est « on ne fait rien ».

La quantification des effets sur l'environnement suit trois phases, dont la mise en œuvre est détaillée dans l'article publié par Michel et al. (2011). La méthode suivie pour l'évaluation qualitative des impacts sur le cadre de vie et l'acceptabilité sociale est décrite dans ce même article.

Au niveau actuel de développement de l'outil, il n'est pas envisageable de quantifier ou monétariser les impacts sur le développement économique régional. Ces impacts sont évalués par jugement d'expert, et les paramètres pris en compte peuvent être ajustés par un utilisateur expérimenté.

L'évaluation économique des options retenues s'effectue à partir des données industrielles figurant dans la base de données, qui représentent des valeurs usuelles communiquées par les industriels. Ces données doivent donc toujours être ajustées par l'utilisateur pour chaque cas d'étude, afin que l'évaluation soit significative ; en l'absence de données localement applicables, les données générales de la base permettent une première approximation. Certaines données confidentielles nous ont été communiquées par des industriels : elles n'apparaissent pas en clair dans l'outil, mais ont servi à caler les valeurs minimales, maximales ou moyennes accessibles à l'utilisateur.

Un indicateur évaluant la « prise de risque » associée à chaque choix a été établi en combinant des indices de maturité des techniques (basés sur des travaux du CTP), de pérennité des solutions et de responsabilité juridique à long terme<sup>1</sup>. La combinaison des prises

---

1 Cette notion est similaire à celle s'appliquant en gestion de déchets.

de risque associées à chaque choix ou étape représente la « fiabilité » du mode de gestion étudié.

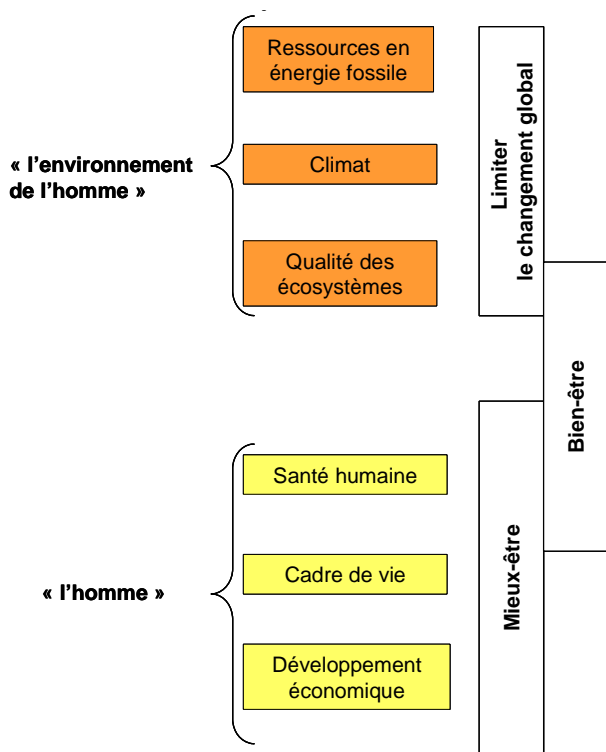


Figure 2 : Indicateurs de durabilité retenus.

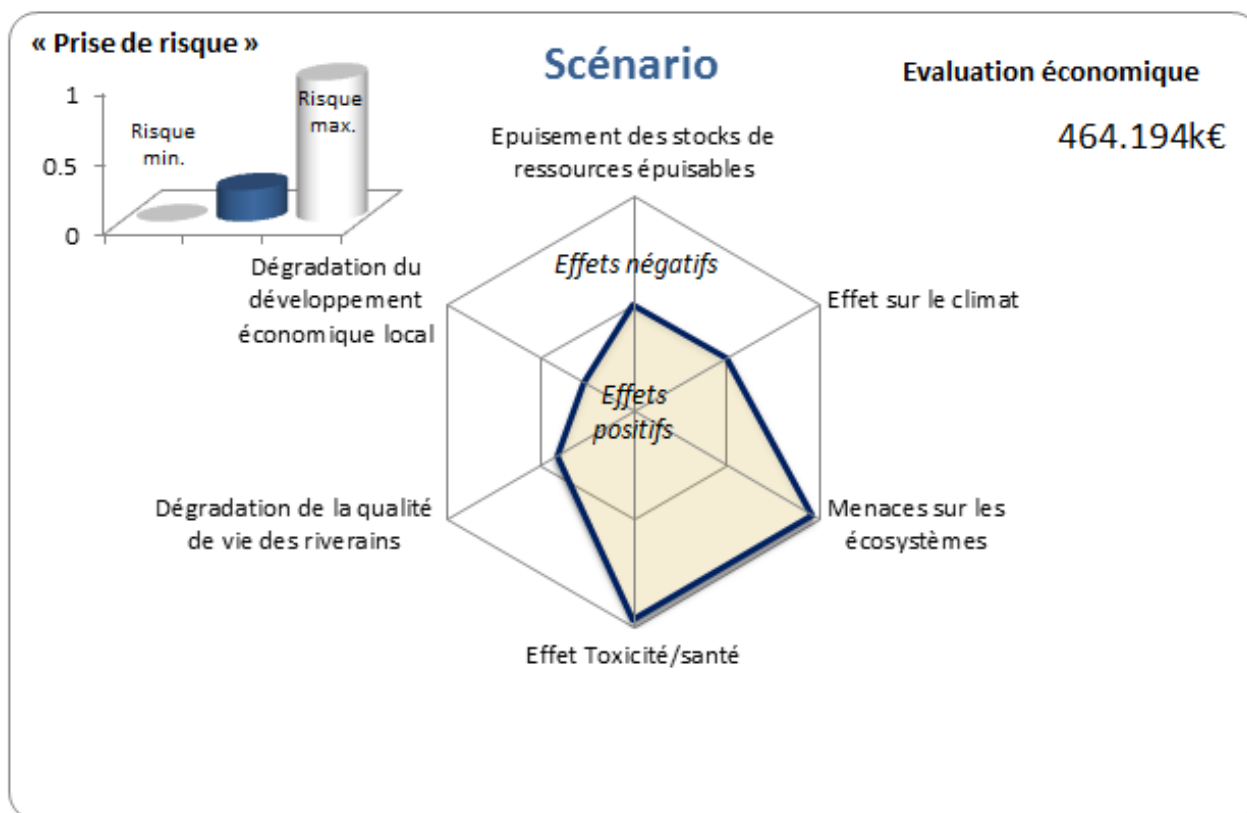


Figure 3 : Diagramme de présentation des indicateurs de durabilité.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Situation initiale								
2	Volume de sédiment total en m <sup>3</sup>	10	Volumés de sédiments traité par le dragage 1 en millier de m3		10	Volumés de sédiments traité par le dragage 2 en millier de m <sup>3</sup>		0	
3			entrée			Sortie			
4	Etape	Nom de la technique	Origine	Contamination	kt sèche	Contamination	kt sèche	Destination	kt humide
5									
6	Dragage 1		situation initiale	métallique légère	7				
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									
30									
31									
32									
33									
34									
35									
36									
37									
38									
39									
40									
41									
42									
43									
44									
45									
46									
47									
48									
49									
50									
51									
52									
53									
54									

**Ajouter une étape**

Etape à déterminer :

Installation possible :

- 
- dragues suceuses porteuse
- Aquamog
- Swan 21
- Dragage mécanique à benne preneuse
- Dragage mécanique à godet
- Dragage mécanique pelleuse
- Dragage mécanique niveleuse**
- Ter
- Dragage mécanique à cuiller
- Dragage pneumatique
- Dragage pneumatique Oozer
- Dragage environ. vis d'archimède ou vis sans fil
- Dragage environ. à cylindre rotatif Boskalis
- Dragage environ. Balayeuse
- Dragage environ. Racleuse
- Dragage environ. Eco-dragage
- Dragage environ. Iris système
- Dragage environ. IHC
- Dragage environ. Nettoyeur
- Dragage environ. Nettoyeur de talus
- Dragage environ. amphibie

Cout (€/m3) :

Fermer    Ajouter    Feedback

Voir dragues suceuses. Les dragues suceuses porteuses peuvent transporter une charge de sédiments à bord, travailler à l'avancement, transporter les matériaux qu'elles ont extraits et ainsi les rejeter ailleurs.

Figure 4 : Outil GeDSeT : saisie des éléments d'un scénario.

Critères de décision	Scénario	Option "On ne fait rien"	Effets cumulés liés à la gestion des sédiments du dragage jusqu'à destination finale	
Prise de risque » des gestionnaires/décideurs »	22%	0%	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Effets positifs - La création/maintien d'un (nouvel) usage loisir des voies d'eau (plaisance...) grâce au dragage</li> <li>2. Effets négatifs - Les nuisances générées potentiellement par les installations dédiées à la gestion des sédiments</li> <li>3. Effets négatifs - Les problèmes d'acceptabilité sociale des installations liés à la perception du risque associé</li> <li>4. Effets négatifs - La dépréciation potentielle de la valeur des maisons des riverains des installations dédiées à la gestion des sédiments</li> <li>5. Effet bénéfique - L'effet préventif de lutte contre les inondations associé au dragage des voies d'eau</li> </ol>	
« Evaluation économique » en k€	464	0		
Effets sur les enjeux du Développement Durable				
Epuisement des stocks de ressources épuisables	50%	50%		Impacts environnementaux
Effet sur le climat	50%	50%		Impacts environnementaux
Menaces sur les écosystèmes	96%	65%	Impacts environnementaux	
Effet Toxicité/santé	96%	65%	Impacts environnementaux	
Dégradation de la qualité de vie des riverains	41%	50%		
Dégradation du développement économique local	27%	50%		

1. La création/maintien d'un (nouvel) usage économique des voies d'eau (transport de marchandise...)
2. Effets positifs - Emplois (pour toutes les étapes de la gestion des sédiments)
3. Effets positifs - Production de matériau répondant à un besoin local (si valorisation)
4. Effets négatifs - Perte de terrain pour le développement économique local (occupation d'espace)
5. Effet positif - L'effet préventif de lutte contre les inondations associé au curage des voies d'eau

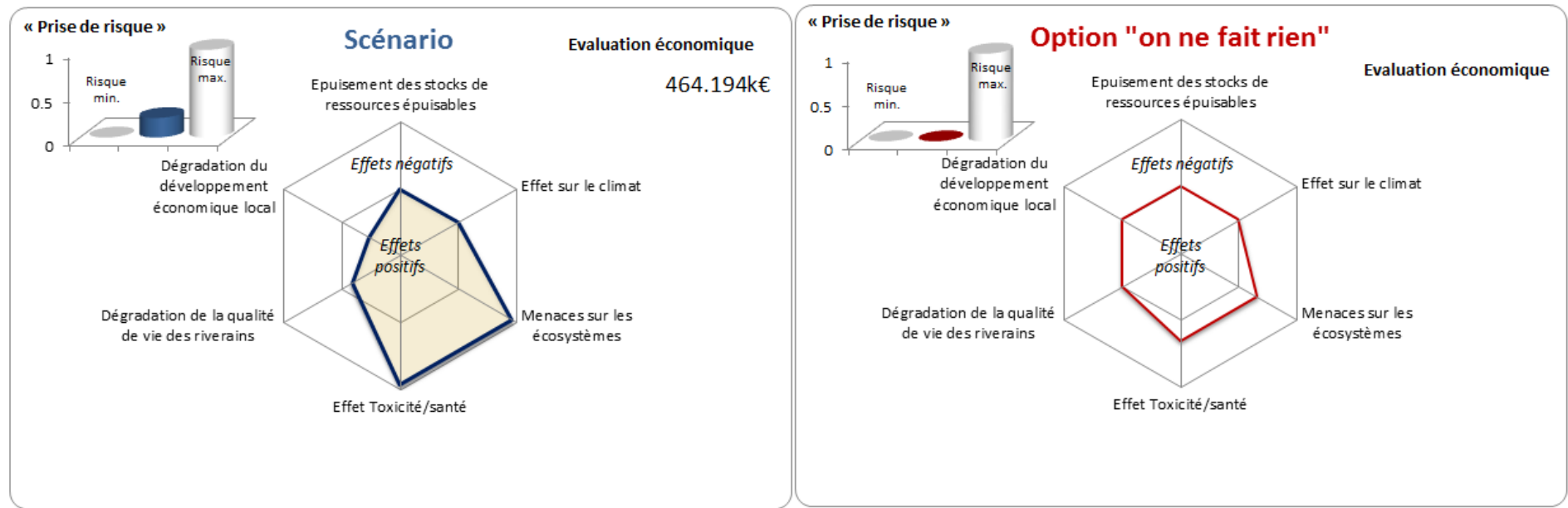


Figure 5 : Outil GeDSeT : calcul et présentation des résultats (exemple fictif).

## **II.7. DEFINITION DES SCENARIOS POSSIBLES SUR LA BASE DES HYPOTHESES DE GESTION ET EVALUATION AVEC LES INDICATEURS**

Le présent paragraphe reprend les éléments présentés à la Société de l'Industrie Minérale en octobre 2011, et publié dans Recyclage et Valorisation (Lemière et al., 2012). Ce texte ne peut être reproduit à l'extérieur de VNF sans l'autorisation de la Société de l'Industrie Minérale. Il peut être librement cité sous forme de référence à cette revue.

### **Scénarios de gestion développés à partir d'enquêtes de terrain**

Lors du développement de l'outil, les scénarios destinés à évaluer des hypothèses génératrices d'activité économique tout en répondant aux critères du développement durable ont été étudiés attentivement : curage sélectif, traitement des sédiments pour valorisation, emploi des sites de dépôt pour cultures énergétiques...

Ainsi, lors de la collecte des informations, certaines options ont paru particulièrement intéressantes,

- soit qu'elles offraient une alternative plus durable à la solution habituellement mise en œuvre,
- soit qu'elles correspondaient à l'émergence de nouvelles technologies et permettaient ainsi le développement d'un nouveau secteur industriel,
- soit qu'elles permettaient de mieux résoudre les questions d'occupation des sols, ou de transport des matériaux dragués.

Ces options ont constitué la base de scénarios développés au sein même de l'outil, et dont la mise au point implique souvent de préciser et compléter les bases de données thématiques.

### **Limites du système étudié, entre la section de voie d'eau à curer et le territoire**

La notion de limites considérée ici a un sens systémique : il s'agit du périmètre, spatial et socio-économique, dans lequel sont évalués les impacts positifs comme négatifs (system boundaries).

Les scénarios de gestion des sédiments sont habituellement évalués à l'intérieur du périmètre de chaque opération de curage, avec leur coût financier comme critère prédominant. Les outils d'aide à la décision existants visent souvent à optimiser ces choix par une comparaison des techniques et des impacts directs.

Nous avons choisi délibérément d'élargir les limites du système étudié afin de trouver hors du périmètre initial les bénéfices permettant d'équilibrer les coûts des options les plus durables. Cette approche est classique dans la gestion des déchets urbains.

Ainsi, on prend en compte les effets bénéfiques du curage sur la voie d'eau (navigabilité, cadre de vie, qualité de l'eau, réduction potentielle du transport routier,...), mais aussi sur l'utilisation des sols (réduction ou meilleure utilisation des surfaces dévolues aux dépôts, réduction des extractions de matériaux), sur les énergies fossiles et le climat (réduction du transport routier, création de biomasse énergétique), sur l'emploi ainsi que d'autres bénéfices indirects.

La quantification de ces effets est effectuée à l'aide des bases de données utilisées en ACV (analyse de cycle de vie).

### **Scénarios pour l'étape de curage**

Le curage d'une section de voie d'eau s'effectue actuellement selon deux modèles :

- curage global, par différents moyens mécaniques dont le plus courant est une pelle sur barge, jusqu'à rétablissement d'un gabarit donné, sans séparation des sédiments collectés (Figure 6). Ce modèle ne nécessite aucun géoréférencement, et le niveau de pollution des sédiments est estimé à partir d'analyses statistiquement représentatives, en vue de prévoir leur gestion ;
- curage ponctuel, par définition de volumes précis à extraire. Ce modèle, actuellement en vigueur en région wallonne, permet de réduire les volumes à gérer, et donc les budgets nécessaires. Il nécessite un repérage géographique précis (GPS) lors de l'échantillonnage et des travaux.



**Figure 6 : Curage non sélectif et mise en dépôt, Canal de Lens, 2010.**

Le développement d'équipements de curage de haute précision permet d'envisager une phase de curage sélectif des volumes les plus contaminés, si le niveau de pollution du canal a été cartographié avec précision, avant d'extraire ensuite en bloc le plus gros des sédiments, selon les techniques habituelles. En effet, il a été démontré (Alary et al., 2011) que le plus souvent, la pollution se présente sous forme de « points chauds » localisés, d'échelle hectométrique, le reste de la section de voie d'eau subissant une pollution diffuse de niveau très inférieur.

L'intérêt du curage sélectif est de réduire significativement le niveau moyen de pollution de la plus grosse part des sédiments à gérer, en extrayant un petit volume de sédiments très pollués à éliminer. Dans les cas favorables, cela permet de rendre valorisables les sédiments extraits lors de la deuxième phase de curage, ou de rendre leur traitement plus efficace.

Ce modèle de curage en deux phases est nécessairement plus coûteux qu'un curage en une seule phase : il ne peut donc pas être retenu si le périmètre de décision se limite au seul marché de travaux. Par contre, la prise en compte d'une gestion plus économique (moindre volume, moindre surface de dépôt) et plus durable (moindres émissions, davantage d'activité économique, etc.) des sédiments extraits peut inverser la décision, si l'ensemble des impacts est quantifié sur un périmètre régional.

Ce scénario comparatif est développé dans l'outil GeDSeT (Figure 5).



### **Scénarios liés au mode de traitement**

Le traitement des sédiments afin de réduire leur niveau de pollution a fait l'objet de nombreux travaux, à l'instar de la dépollution des sols excavés. Des installations industrielles, en général accessibles par voie d'eau, ont été créées ou sont en cours de développement. Plus récemment, des installations mobiles de traitement, sur embarcation, ont été développées.

On aboutit ainsi à des scénarios modulaires :

- procède-t-on à une déshydratation des sédiments curés sur barge, afin de minimiser les volumes à gérer, et permettre un éventuel réemploi sans rupture de charge si un usage est possible le long de la même voie d'eau ou à proximité ?
- peut-on orienter sélectivement des lots de sédiment vers une filière de traitement optimisée si l'on dispose de données de caractérisation suffisantes ?
- peut-on acheminer des sédiments très pollués par voie d'eau au plus près d'un centre d'enfouissement ?

Les effets de ces différentes options ne sont pas négligeables, tant au plan économique qu'en impact environnemental, emploi de combustibles fossiles et émissions.

### **Scénarios liés aux voies de valorisation**

Dans l'état actuel des réglementations wallonne et française, la valorisation des sédiments se heurte à des barrières réglementaires difficilement surmontables. Il faut espérer que l'évolution de ces réglementations se fera dans un sens plus favorable au développement durable (réemploi) et pas seulement de protection des milieux.

La principale voie de valorisation des sédiments peu pollués est, et devrait rester longtemps, celle de matériaux banalisables sans valeur ajoutée (recouvrement, remblai, seuls ou en mélange avec des matériaux de déconstruction, etc.). La valorisation de sédiments en matière première pour des produits évolués (briques, ciments) est bien entendu possible mais ne concerne à ce jour que des volumes réduits.

La prise en compte du lieu de mise à disposition des sédiments, de leur transport par voie d'eau, et l'élimination d'opérations de chargement/déchargement<sup>2</sup> peut améliorer la faisabilité économique d'un réemploi.

L'identification précoce d'utilisateurs potentiels de sédiments (grands travaux, couvertures de décharges, réhabilitation de sites, buttes paysagères) à proximité d'un chantier de curage peut permettre de réduire les besoins en sites de dépôt (coût, emprise foncière, acceptabilité). Ce type de scénario serait à développer dans les évolutions futures de l'outil GeDSeT.

### **Scénarios liés à l'utilisation des sites de dépôt**

Les sites de dépôt, qu'ils soient temporaires (Belgique) ou permanents (France), présentent, outre les inconvénients déjà mentionnés (coût, emprise foncière, acceptabilité), le problème de leur protection et de leurs utilisations possibles.

A l'heure actuelle, les usages connus impliquent d'en restreindre l'accès au public. La facilité de végétalisation les désigne alors comme espaces verts paysagers non accessibles.

Une alternative, identifiée lors des échanges avec les parties prenantes, est de les utiliser pour des cultures énergétiques industrielles, comme par exemple des saules à rotation rapide.

---

<sup>2</sup> Par exemple, le modèle wallon des centres de regroupement prévoit une déshydratation en andains et une maturation des sédiments peu pollués, en vue de permettre leur réemploi ultérieur. Ceci a toutefois l'inconvénient de nécessiter deux opérations de chargement/déchargement, d'un coût non négligeable.

Les enjeux de ces stratégies d'utilisation ont été dans l'outil GeDSeT en 2012, sur la base des données disponibles, et pourront être affinés au-delà dans le cadre de futurs projets.

### **Les scénarios dans l'outil GeDSeT, et les scénarios nouveaux**

L'outil permet de construire des scénarios de gestions des sédiments depuis le dragage jusqu'au stockage définitif (ou valorisation le cas échéant) en passant par les différentes étapes de traitement. Pour chaque étape du scénario (dragage, transport, traitement, stockage définitif, etc.) différentes options techniques sont disponibles chacune ayant différents effets (positif ou négatif) sur les indicateurs de durabilité.

Le développement de l'outil a donc été effectué en décrivant logiquement les différentes options techniques possibles (options discutées avec les acteurs et experts de la gestion des sédiments) et en y rattachant les données présentes dans les bases de données. Cette démarche restera applicable après le terme du projet, puisqu'il sera toujours possible d'enrichir l'outil avec de nouvelles options techniques. Ceci nécessitera seulement de compléter et mettre à jour les bases de données et d'établir les liens fonctionnels correspondants.

D'autres scénarios, issus des discussions avec les opérateurs et les industriels, font appel à des données autres que celles prévues dans l'outil. Celui-ci fournit néanmoins des informations importantes pour l'évaluation de ces scénarios, de leur pertinence, leur faisabilité et leurs bénéfices (tableau 2).

Ceci met en avant le caractère dynamique de l'outil, de l'analyse qui le sous-tend, et des données qu'il contient. Lors du semestre, des contacts ont été établis avec différents partenaires en vue de préparer de nouveaux projets au sein desquels l'outil pourrait être maintenu, développé ou diversifié.

Scénarios développés	Mise en œuvre	Techniques requises	Inconvénients	Avantages
Cartographie fine de la pollution	aisée pour métaux, à développer pour les organiques	caractérisation sur site (XRF, IR ou autre)	Surcoût de mesure	Permettre le dragage sélectif ET le dragage "pilote par l'aval"
Dragage sélectif (hotspots puis en bloc)	possible	caractérisation sur site, SIG	Surcoût au dragage	Moindre coût de gestion
Dragage "pilote par l'aval" (si un débouché possible est identifié)	possible, souhaité par VNF	caractérisation sur site, SIG dynamique	Statut réglementaire du sédiment à préciser	Economies de gestion, davantage de dragages
Prétraitement "sur l'eau" (filtre presse, hydrocyclone)	déjà essayé (Envisan, autres ?)	Traitement sur barge	Surcoût au dragage	Moindre coût de gestion, réemploi sans déchargement intermédiaire
Sélection des filières de traitement à l'entrée en usine	possible	caractérisation sur site	Surcoût de mesure	meilleure efficacité du traitement, moindre coût de traitement
Valorisation de sédiment brut en gros volume (butte paysagère, mur anti-bruit, couverture de décharge)	déjà essayée (Baudalet, autres ?)	caractérisation sur site, si transfert direct sans dépôt		débouché important
Valorisation de dérivés de sédiment en gros volume (composite avec granulats de béton de démolition,...)	à tester sur pilote	caractérisation sur site, si transfert direct sans dépôt	contamination, flou réglementaire	débouché potentiellement important en réhabilitation
Valorisation de dérivés de sédiment en gros volume en matière (cru de ciment,...)	essais pilotes en cours (EMD)	caractérisation en continu	contamination, flou réglementaire	débouché potentiellement important
Utilisation des sites de dépôt pour cultures énergétiques	à tester sur pilote	suivi des transferts de polluants, traitement des fumées	contamination, flou réglementaire	pas de compétition avec les sols pour culture alimentaire

**Tableau 2 : Scénarios existants et nouveaux pour lesquels les données de l'outil peuvent être utilisées.**

### III. ACTION 2

Cette action regroupe les différentes recherches destinées à compléter, là où c'était nécessaire, les connaissances sur la problématique des sédiments et à alimenter en données non disponibles autrement la base de données de l'outil.

#### III.1. CARACTÉRISATION : ANALYSE SUR SITE DES MÉTAUX LOURDS (2.1)

La technique utilisée est la fluorescence X portable (pXRF). La tâche menée en 2009 et 2010 a été l'adaptation de la méthodologie pour sols aux sédiments gorgés d'eau. Les appareils sont un Niton XLt 999 et un Niton XL3t, tous deux acquis grâce au projet.

##### Méthode sur site

Les essais réalisés sur échantillons humides en 2010 ont montré l'intérêt d'une déshydratation rapide pour obtenir des mesures semi quantitatives.



Figure 7 : Mesures sur site, dépôt et Canal de Lens, 2010.

En octobre 2011, nous avons testé un prototype de presse réalisé par le constructeur (Niton) lors d'une campagne SPW sur les canaux wallons. La grande majorité des passes de carottage a pu être analysée directement sur le bateau, ce qui confirme le caractère opérationnel de la méthode. Ces passes ayant été utilisées pour constituer des échantillons composites, il a donc été possible de mesurer l'hétérogénéité chimique de ces échantillons.



Figure 8 : Déshydratation sur site, Canal Charleroi Bruxelles, 2011.

### **Validation**

Les résultats confirment et améliorent la hiérarchisation des échantillons, déjà obtenue en 2009 et en 2010. Les mesures sur brut et sur échantillons à différents degrés de séchage montrent que si les premières sont semi-quantitatives, la hiérarchie entre échantillons plus ou moins pollués est respectée, ainsi que les ratios entre métaux. La méthode est déjà validée pour des utilisations en screening, et les analyses en cours permettront de déterminer les limites de l'interprétation des teneurs mesurées.

La validité des mesures obtenues pour un diagnostic immédiat quant à la contamination métallique des sédiments (notamment Pb, Zn, Cu, Cr, Ni, et aussi As) a fait l'objet d'une étude approfondie (Lemière et al., 2013).

Il en résulte que les mesures obtenues immédiatement sur site par pXRF après déshydratation partielle de l'échantillon (25 à 40% d'eau) sont corrélables aux teneurs réelles avec une fiabilité suffisante pour une prise de décision, dès lors que le résultat ne se situe pas dans les +/- 20% autour du seuil que l'on s'est fixé.

### **Application**

Les utilisations envisageables sont les suivantes :

- pendant les campagnes de caractérisation :
  - o mesures détaillées sur chaque prélèvement constitutif des échantillons,
  - o mesures à maille plus serrée que les échantillons,
- et lors des travaux :
  - o mesures sur la barge, en échantillonnant directement dans le godet de la pelle ou en sortie de pompe,
  - o mesure sur la berge à partir d'échantillons de boues fournis par le personnel de curage
- et dans tous ces cas : analyses le lendemain sur matériel séché et homogénéisé.

Le suivi de la campagne de curage du canal de Lens n'a permis que partiellement d'atteindre les objectifs fixés en 2009 :

- la disponibilité simultanée des personnels des différents partenaires a posé problème par rapport au calendrier des travaux, et le chantier s'est achevé avant la dernière campagne de mesures,

- la technique de dragage suivie par l'opérateur ne permettait pas un suivi précis de la localisation des échantillons,
- par rapport à cette observation, il a été retenu de suivre une campagne d'échantillonnage plutôt qu'un chantier de curage, pour mettre en place une grille de mesures exploitables par géostatistique,
- le chantier suivant était prévu dans une zone potentiellement moins polluée, et subséquemment moins propice à des mesures contrastées.

Le suivi de la campagne de caractérisation SPW, sur le canal Charleroi-Bruxelles, avait pour objectif de pallier à ces difficultés, en vue de réaliser une étude géostatistique de la variabilité des sédiments. L'objectif n'a pas pu être atteint, malgré la qualité des mesures pXRF, car le plan de prélèvement SPW était trop irrégulier par rapport à cet objectif (voir action 1, Scénarios pour l'étape de curage). Par contre, ce suivi a permis de démontrer :

- la faisabilité des mesures pXRF en temps réel, à bord de l'embarcation, avec déshydratation partielle de l'échantillon, sur chaque carotte prélevée, avec une équipe de 2 opérateurs,
- la représentativité des mesures obtenues (Figure 9),
- l'existence d'hétérogénéités de contamination au sein d'un lot d'échantillons traditionnellement analysés sous forme d'un seul composite (voir Action 1, scénario de dragage sélectif).

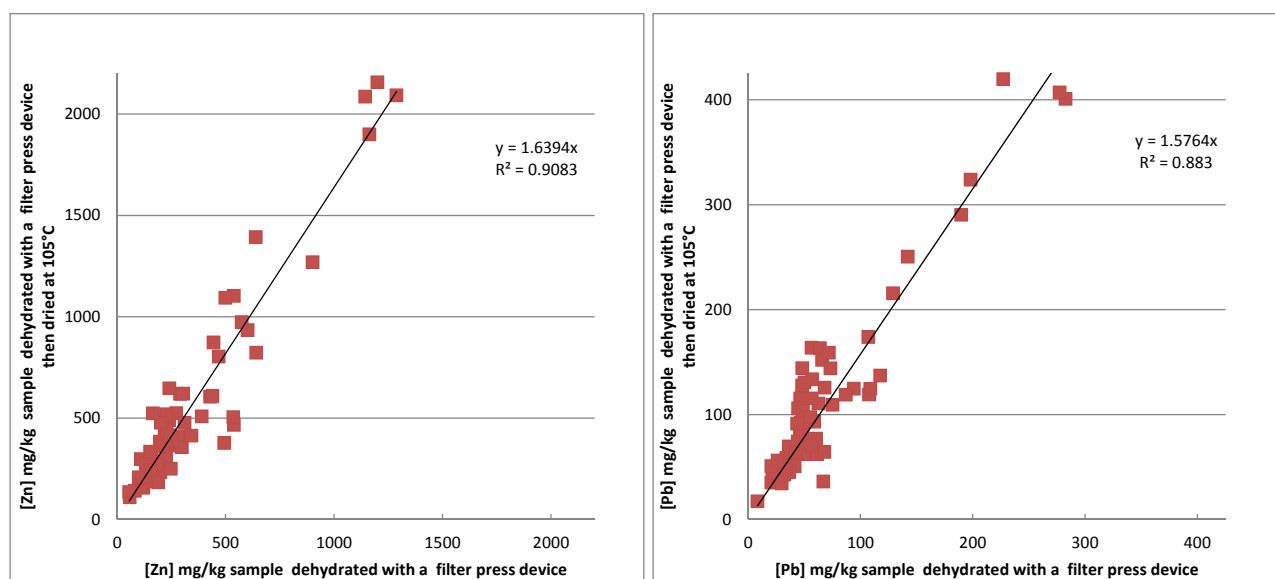


Figure 9 : Comparaison entre mesure de Zn et Pb sur site et hors site, Canal Charleroi Bruxelles, 2011.

### III.2. CARACTÉRISATION : ANALYSE SUR SITE DES POLLUANTS ORGANIQUES (2.1)

Une revue bibliographique effectuée par l'ISSeP a permis de faire le point sur l'applicabilité et les limitations des techniques existantes: il n'existe aucune technique aussi opérationnelle que la pXRF pour les métaux. Cette revue a permis d'identifier plusieurs technologies prometteuses (FTIR, micro Raman) ayant fait l'objet de récents développements par les constructeurs. On envisage de tester ces technologies dans les projets en cours d'élaboration, qui prendront la suite de GeDSeT.



### III.3. CARACTÉRISATION : MESURES GÉOPHYSIQUES (2.1)

Les techniques géophysiques sont des mesures sur site, sur sédiments encore en place, qui n'ont pas pour objectif la mesure directe des polluants, mais plutôt l'identification d'hétérogénéités et la caractérisation topologique des sédiments. Il est attendu d'elles une représentation spatiale plus fine des volumes contaminés et/ou la détection de pollutions non apparentes.

Les techniques mises en œuvre sur le canal de Lens sont des mesures de susceptibilité magnétique et résistivité électrique. Les mesures effectuées sur site lors d'une campagne en 2010 ont permis une reconnaissance du gisement de sédiments avant curage.

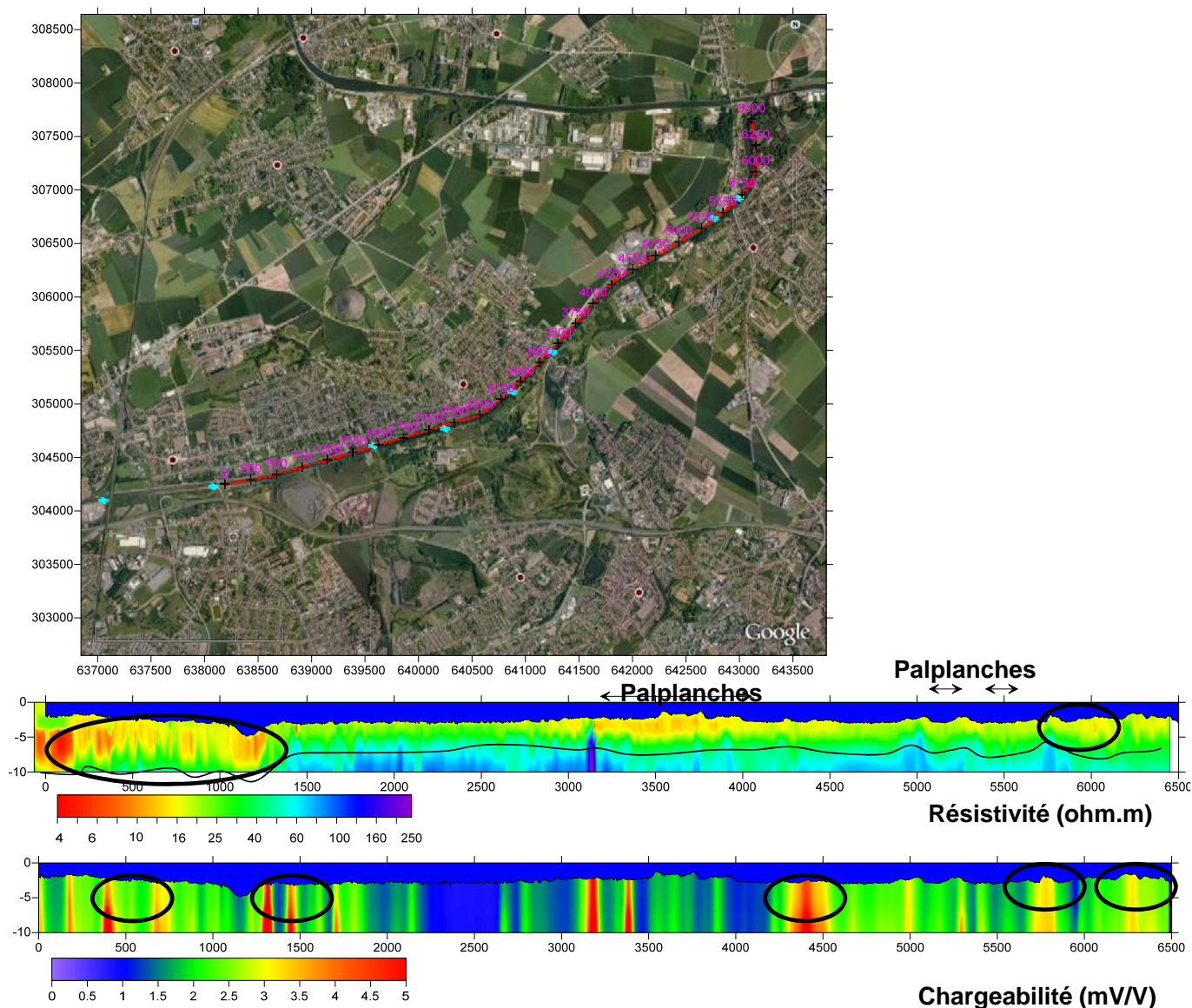


Figure 10 : Mesures de résistivité et chargeabilité, Canal de Lens, 2010.

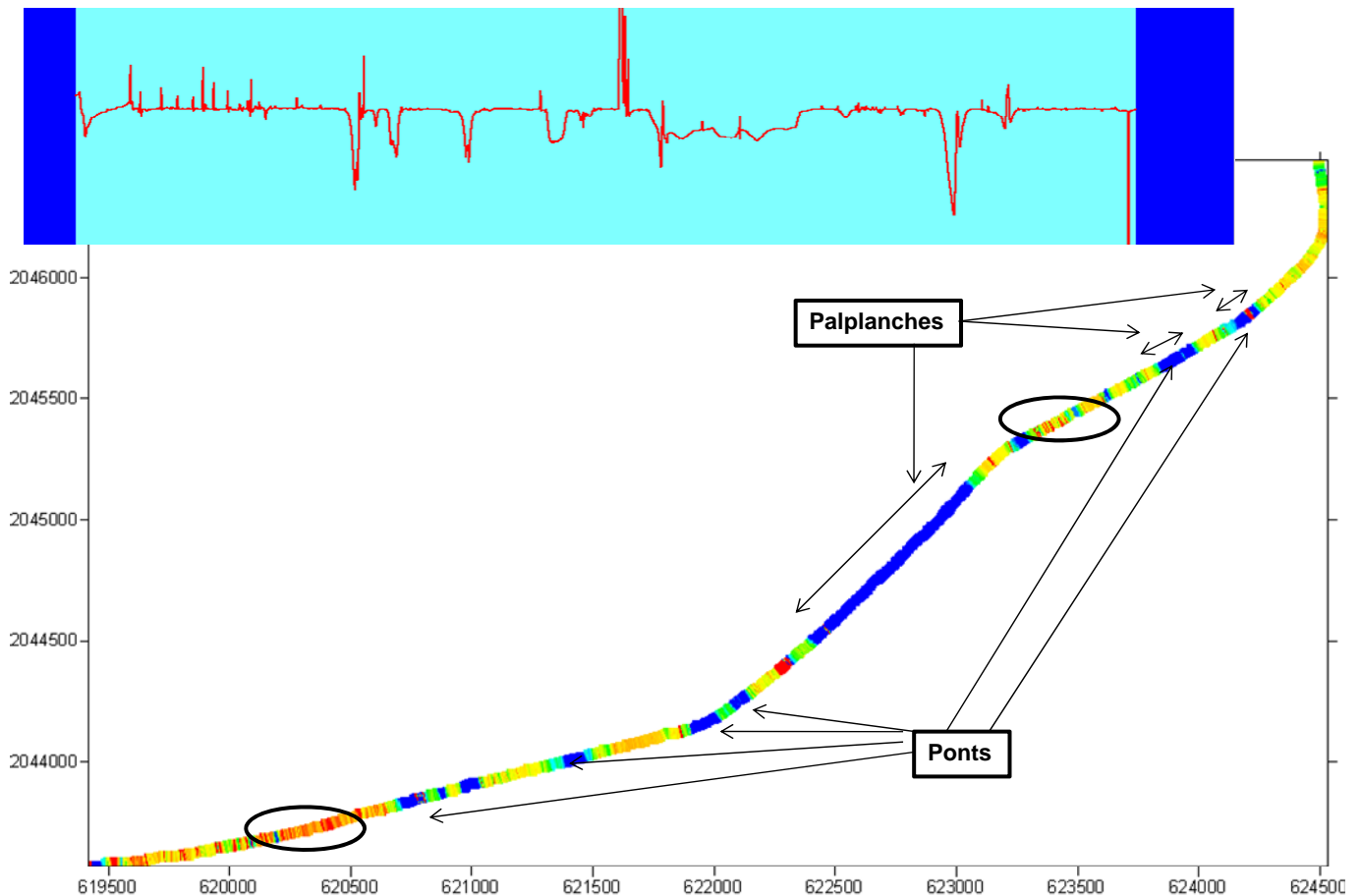


Figure 11 : Mesures de magnétisme, Canal de Lens, 2010.

Les premiers résultats de ces mesures sont prometteurs (Figure 10, Figure 11) mais sont perturbés par les éléments anthropiques, notamment les palplanches métalliques bordant le canal.

Ces mesures ont été complétées par des mesures de susceptibilité magnétique et résistivité électrique en laboratoire sur les échantillons collectés, afin de voir si ces mesures pouvaient être corrélées à des mesures pXRF de concentrations en métaux.

Une deuxième campagne de géophysique électrique sur le canal de Lens a été réalisée en septembre 2012, afin de quantifier l'impact du curage du canal de Lens en 2010 sur les mesures de résistivité électrique. Il s'agissait notamment de vérifier si les sédiments pollués (d'après les études géophysiques de 2009 et 2010) ont bien été extraits dans le canal.

### **Mesures sur échantillons**

Les mesures en laboratoire concernaient les 14 échantillons représentant un échantillonnage relativement représentatif des différentes signatures géophysiques rencontrées sur le canal : conducteur, chargeable (effet de polarisation provoquée) et magnétique (Tableau 4). Ces échantillons ont été prélevés en 2010 avant le curage du canal de Lens. Ils ont été extraits à l'aide d'un seau attachés au bout d'une perche et mis dans des tubes PVC de 50 cm de longueur et 12 cm de diamètre. Malheureusement, les échantillons prélevés étaient beaucoup trop liquides et aucune comparaison n'a pu être possible. Les volumes de solide étant trop faibles, seules des mesures de susceptibilité ont été réalisées (5 par échantillons), permettant de se faire une idée de la répétabilité de la mesure.

Numéro anomalie	Anomalie	X Lambert I	Y Lambert I	Point métrique / pont de chemin de fer	Moyenne Susceptibilité	Ecart type Susceptibilité
G1	Magnétisme - résistivité - chargeabilité	638346	1304296	1225	6.80E-07	3.42E-07
G2	Magnétisme - résistivité - chargeabilité	638550	1304318	1430	2.42E-06	2.28E-07
G3	Magnétisme - résistivité - chargeabilité	638842	1304389	1750	1.54E-06	4.04E-07
G4	fosse	639320	1304525	2225		
G5	Absence	640100	1304758	3050	1.06E-06	4.04E-07
G6	Absence	640576	1304898	3550	5.00E-07	2.83E-07
G7	Magnétisme	640737	1305001	3750	1.25E-07	5.00E-08
G8	Absence	641300	1305565	4550	3.33E-07	1.53E-07
G9	Absence	641696	1306010	5150	1.10E-06	7.71E-07
G10	Magnétisme Chargeabilité	641935	1306211	5450	8.20E-07	2.39E-07
G11	Absence	642488	1306546	6150	1.28E-06	2.95E-07
G12	Magnétisme - résistivité - chargeabilité	643062	1306997	6850	3.42E-06	4.44E-07
G13	Electrique	643151	1307168	7050	2.25E-07	1.26E-07
G14	Magnétisme Chargeabilité	643151	1307425	7300	6.00E-07	3.74E-07

**Tableau 3 : Les 14 échantillons prélevés pour les analyses géophysiques : position, type d'anomalie géophysique sur le terrain et mesures de susceptibilité.**

### **Campagne de géophysique 2012**

Une dernière campagne de résistivité électrique et polarisation provoquée (PP) a été réalisée par le BRGM, les 19 et 20 septembre 2012 sur le canal de Lens entre le pont de chemin de fer et le canal de la Deûle.

Suite aux premières opérations de 2009 et 2010, il a été choisi de réaliser les mesures avec 13 électrodes flottantes, avec un espacement entre électrodes de 1.5 m. La PP a été mesurée avec une période de 1s. Les mesures de résistivité et PP ont été géoréférencées par GPS et la bathymétrie a été mesurée au droit du bateau. La vitesse d'avancement du bateau et la cadence de mesures ont permis d'obtenir un échantillonnage tous les 2 à 3 m.

Ce dispositif permet d'atteindre une profondeur d'investigation de 6 m. Il est exactement le même que celui choisi pour le levé de 2010. Les mesures de 2012 sont comparables à celles de 2010.

Les mesures de résistivité et de PP ont été inversées avec le logiciel Res2DInv, en prenant la résistivité de l'eau de canal à 9 ohm.m (soit une conductivité de 1100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Le paramètre « facteur métal » *FM* a été calculé car il représente la conductivité imaginaire du milieu (Viezolli et Cull, 2005) :

Dans les sédiments de canal, cette conductivité imaginaire, est caractéristique de la quantité de métaux disséminés, et des polarisations de surface liées à une activité de biodégradation.

La Figure 10 montre également en comparaison les résultats de la campagne de mars 2010 réalisée avant le curage du canal. On peut observer le volume de sédiments prélevés. La profondeur du canal a été abaissée à 3 m environ en aval du pont de Loison sous Lens et à 2.5 m en moyenne entre le pont de chemin de fer (point 0) et le pont de Loison sous Lens. Sur cette dernière portion qui était considérée comme la plus contaminée du canal, les sédiments les plus conducteurs en mars 2010 ont été en partie extraits. De même, les sédiments de fortes valeurs de facteur métal entre le Point Métrique (PM) 1200 et 2000 ont été extraits pour la

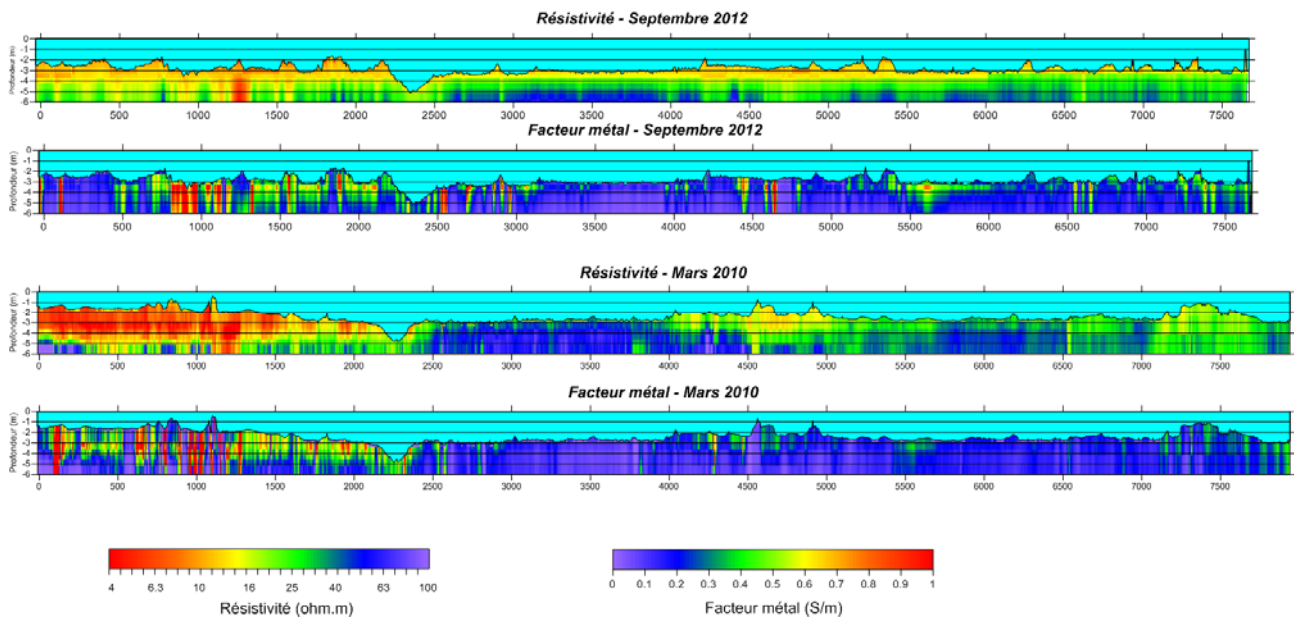


plupart. Néanmoins, il subsiste des sédiments chargeables (facteur métal élevé) et conducteurs (donc probablement pollués) entre les PM 880 et 1200.

Dans la partie aval du canal considérée comme moins polluée (en aval du PM 2000), certains secteurs présentent une faible résistivité et une chargeabilité anormale : entre les PM 4400 et 4700 et entre les PM 5400 et 6000

La bathymétrie révèle des anomalies de profondeur pouvant être liées à des dépôts postérieurs au curage du canal : entre les PM 1800 et 2000 ; entre les PM 2100 et 2200 et entre les PM 5200 et 5400.

Les outils géophysiques (résistivité et polarisation provoquée) et bathymétriques peuvent être utilisés à des fins de diagnostic de canal pour segmenter le canal en portion de caractéristiques géophysiques identiques, mais également en contrôle a posteriori d'un curage de canal.



**Figure 12 : Coupe de Résistivité électrique et de facteur métal (conductivité imaginaire) sur le tronçon de canal de Lens entre le pont de chemin de fer (point 0) et la jonction avec le canal de la Deûle**

### **III.4. COMPORTEMENT DES SÉDIMENTS SOUS L'EAU (2.2)**

La sous-action 2-2 : Modalités de transfert des contaminants associés aux sédiments de fond de cours d'eau est coordonnée par les Mines de Douai, avec la participation du BRGM.

L'impact des sédiments présents sous la colonne d'eau a été étudié à deux niveaux :

- impact des sédiments contaminés sur la qualité de l'eau, en l'absence de travaux,
- impact des sédiments remobilisés sur la qualité de l'eau, pendant un curage.

L'action a bénéficié du travail de thèse de doctorat d'Erwan Simon et de nombreux échanges entre le doctorant et ses encadrants de l'école des mines de Douai et de l'ISSeP. Le travail a été présenté devant un jury de thèse le 17/12/2012. Ce travail constitue la 3<sup>e</sup> thèse de doctorat soutenue dans le cadre du projet.

L'originalité du travail entrepris consiste en la mise en œuvre de capteurs passifs pour étudier le comportement de certains contaminants peu polaires comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans les voies d'eau.

Ce dispositif a permis d'évaluer les conséquences sur la mobilité des HAP de trois actions possibles pour un gestionnaire de cours d'eau face à un lit sédimentaire contaminé : l'absence d'action, l'ouverture du canal à la navigation et son curage.

Des profils de concentration en HAP libres dans la colonne sédimentaire et la colonne d'eau ont ainsi été obtenus en plusieurs points du cours d'eau, dont l'un exposé à la navigation. Un suivi dans le temps a été effectué, avant, pendant et après curage du cours d'eau. L'étude de l'impact de l'âge de la matrice sédimentaire et de l'activité microbiologique sur le transfert de HAP vers la colonne d'eau est effectuée à travers une remise en suspension en conditions contrôlées.

On constate alors que sur un tronçon homogène de colonne sédimentaire, la sorption des HAP augmente avec l'âge de la matrice. Cependant, dans le cas d'une discontinuité dans la structure de la matrice, des variations significatives de concentrations en HAP libres peuvent survenir dans l'eau interstitielle, et une diffusion des HAP libres se met alors en place. Cette diffusion des HAP est plus sensible encore à l'interface eau-sédiment, où on observe un transfert des HAP vers la colonne d'eau. La navigation diminue la couche limite de diffusion et renforce donc ces transferts vers la phase aqueuse.

Le curage du lit sédimentaire quant à lui entraîne un relargage massif de HAP libres dans la colonne d'eau. Ces HAP sont refixés par le matériel en suspension, mais cette fixation est précaire, les HAP pouvant être à nouveau libérés par la biodégradation du matériel en suspension assurant leur transport.

Dans la continuité des travaux entrepris lors de la thèse de doctorat d'Erwan Simon, une nouvelle étude sur l'utilisation de capteurs passifs dans l'évaluation des teneurs en HAP dissous dans l'eau interstitielle des sédiments a démarré en mai 2012 (collaboration EMD/ISSeP). Il s'agit, par une approche plus « mécanistique », d'améliorer la compréhension du comportement de composés organiques hydrophobes dans les sédiments de voies d'eau et d'affiner l'évaluation du potentiel de remobilisation de ces polluants au sein d'un système eau-sédiment. Pour mener à bien cette étude, un travail de post-doctorat a démarré en mai 2012.

Une première étape du travail a consisté à calibrer des capteurs passifs (polyoxyméthylène POM). Une validation par comparaison avec la littérature a été réalisée. Le facteur de calibration reliant le coefficient de partage relatif au capteur passif ( $K_{POM}$ ) au caractère hydrophobe des HAP (via le coefficient de partage octanol/eau ( $K_{ow}$ )) est transcrit selon l'équation suivante :

$$\text{Log } K_{POM} = -1,15 + 0,96 \times \text{Log } K_{ow}$$

Avec :  $K_{POM}$  - coefficient de partage du HAP entre le capteur passif et la phase aqueuse

$K_{ow}$  - coefficient de partage du HAP entre une phase organique, l'octanol et l'eau

Cette relation est illustrée par la Figure 13, par laquelle on observe une bonne linéarité des résultats ( $R = 0,93$ ) obtenus sur une large gamme des valeurs du coefficient de partage octanol-eau.

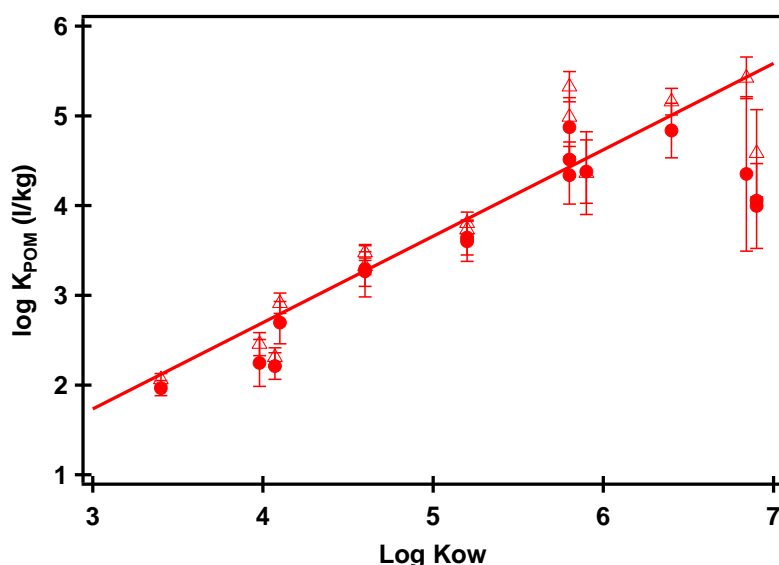


Figure 13 : Courbe de calibration pour deux capteurs passifs de masses différentes (cercles pleins 0,5g POM ; triangles vides 1g POM) représentant le coefficient de partage K<sub>POM</sub> en fonction de l'hydrophobie des HAP Kow.

Il s'agit ensuite d'étudier l'influence de certaines caractéristiques des sédiments, susceptibles d'influencer le transfert de HAP vers la phase aqueuse. Parmi ces paramètres : la matière organique dans ces composantes expansée (plutôt inerte) et condensée (noir de carbone) ; la porosité, la microflore.

Des tests de remise en solution de HAP ont donc démarré au laboratoire. L'étude de la cinétique de relargage de HAP a été étudiée en fonction des différents facteurs d'influence à tester (Tableau 4).

L'influence de l'épaisseur du POM (76 et 500 µm) a également été examinée.

Porosité (mm)	Epaisseur POM (µm)	Triplicata	Charbon actif (% massique)	Acide humique (% massique)	Biocide
0 - 0,63	500	X	-	-	Absent
		-	-	-	Présent
0,63 - 1	500	X	-	-	Absent
		-	-	-	Présent
1 - 2	500	X	-	-	Absent
		-	-	-	Présent
	X	0,01; 0,1; 1	-	Absent	
	X	-	0,01; 0,1; 1	Absent	
	76	X	-	-	Absent
		X	1	-	Absent
2 - 2,5	500	X	-	-	Absent
		-	-	-	Présent

Tableau 4 : Récapitulatif des essais en cours de déploiement concernant les facteurs influençant la remise en solution de HAP.

Concernant le suivi d'une opération de curage, des campagnes de terrain ont été réalisées à l'occasion du curage du canal de Lens. Des prélèvements d'eau et de sédiments ont été effectués aux différents points de suivi du canal (4 points pour l'eau et 3 points pour les sédiments). Les échantillons prélevés ont été analysés pour déterminer leurs caractéristiques physico chimiques et écotoxiques.

Pour le suivi dynamique des travaux, des sondes multiparamétriques ont été employées, et ont permis de mettre en évidence l'ampleur mais la relative brièveté des perturbations (Figure 15). La mise en évidence du passage des bateaux implique de prendre en compte ce phénomène, en plus des émissions statiques, sur toute voie d'eau naviguée.



Figure 14 : Remise en suspension des sédiments par le curage (gauche) et la navigation (droite).

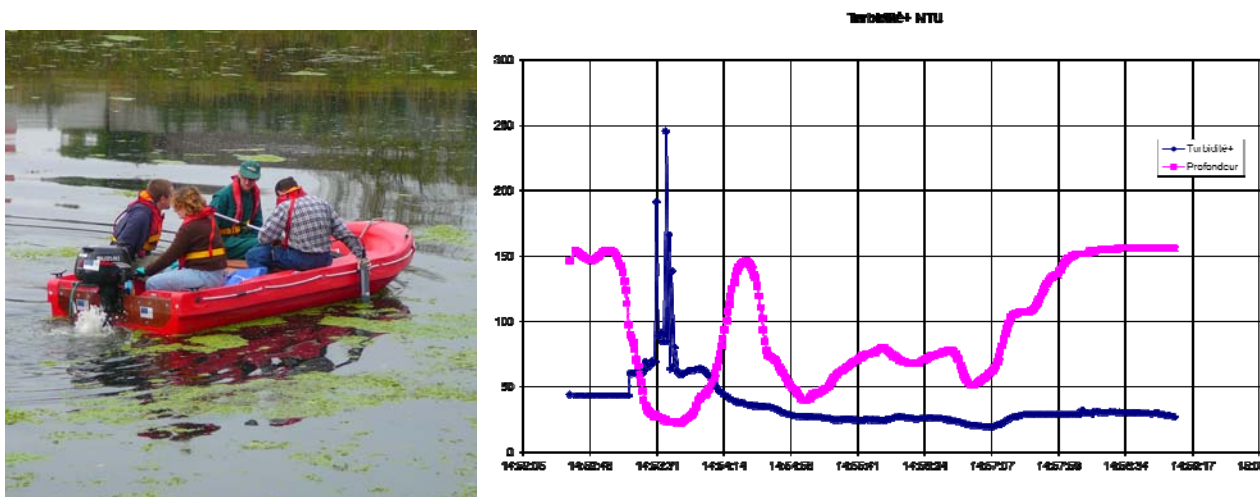


Figure 15 : Suivi de la turbidité par sonde multiparamétrique (gauche) et lors du prélèvement (droite).

Les fortes turbidités mesurées impliquent, pour le suivi de la qualité des eaux, de quantifier aussi bien les polluants particuliers que dissous.

### **III.5. COMPORTEMENT DES SÉDIMENTS EN DÉPÔT (2.3)**

La sous-action 2-3 : Caractérisation du potentiel de transfert de polluants de sédiments mis à terre est coordonnée par le BRGM, avec la participation des Mines de Douai et de l'INERIS.

Deux types de pollutions sont suivis dans le cadre du projet : une pollution métallique par le BRGM et l'EMD et une pollution organique par l'INERIS.

Pour rappel, dans le cas d'une pollution métallique, plusieurs campagnes de terrain saisonnières ont permis le prélèvement de nombreux échantillons de sédiments d'âges différents. Chacun de ces échantillons a subi différents traitements chimiques pour approcher la spéciation des métaux.

Comme mentionné dans les rapports précédents, ces mesures ont pour objectif de discuter l'hypothèse d'une possible alternance de la spéciation des éléments traces minéraux particulièrement mobiles comme Zn et Cd en fonction des conditions de température et de teneurs en eau des horizons de surface des sites de dépôt. Cette alternance pourrait empêcher la stabilisation progressive de ces éléments sous des formes insolubles. L'originalité de ce travail est d'apprécier les conséquences de ces variations sur le terrain et non plus en conditions contrôlées de laboratoire. L'analyse des données disponibles tend à confirmer que les métaux comme le Cd sont plus facilement extraits par des réactifs chimiques sur des échantillons prélevés en hiver que sur des échantillons prélevés en été. Toutefois, de fortes dispersions des valeurs mesurées sont rencontrées ce qui ne permet pas de conclure avec certitude concernant la validité de ce phénomène, et a nécessité des analyses supplémentaires pour augmenter le jeu de données et procéder à une analyse statistique.

Le cas d'une contamination organique a été abordé par l'INERIS dans la thèse de Benoit Charrasse "Comportement à long terme, caractérisation opérationnelle et évaluation environnementale des contaminants organiques des sédiments de dragage".

Lors du second semestre 2012, les travaux ont porté sur le sédiment du canal de Lens, dit mûré. Ce sédiment a été maintenu à la capacité au champ pendant une année, à l'abri de la lumière et à température constante ( $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ ). Par la suite, des essais de percolation ont été menés afin de comparer l'émission des contaminants (HAP, PCB et HCT) entre le sédiment frais (dragué) et le sédiment mûré.

Par ailleurs, les concentrations en contaminants organiques dans l'eau en équilibre avec le sédiment ont été mesurées par capteurs passifs en LDPE (Low-density polyethylene).

La Figure 16 montre l'adsorption de différents HAP du canal de Lens au cours du temps dans le capteur en LDPE.



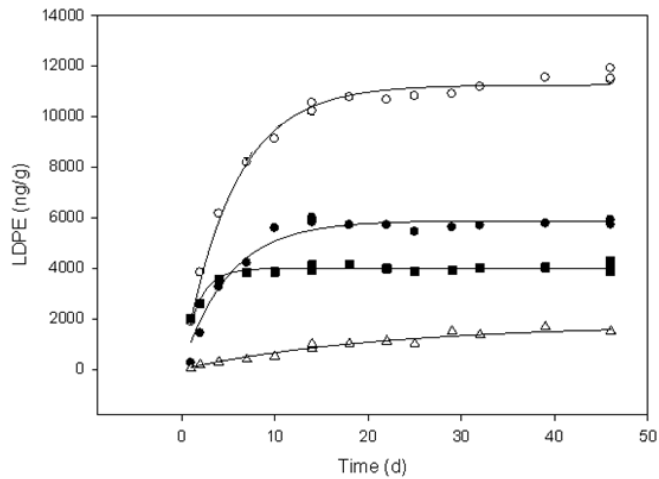


Figure 16 : Adsorption de HAP sur le capteur passif LDPE pour le sédiment de Lens.



Figure 17 : Site de dépôt, relevé de fosse et suivi pXRF in situ.

Les niveaux de concentration des HAP dissous dans l'eau interstitielle varient de 0,146 ng/L (nanogramme par litre) pour le benzo [a] pyrène à 313 ng/L pour le pyrène. Les niveaux de concentration de PCB dissous étaient plus faibles, allant de 0,002 ng/L à 7,76 ng/L, respectivement pour les PCB 174 et PCB 52. Ces résultats ont permis le calcul de coefficients de partage eau interstitielle/sédiment dits  $K_d$  (via un coefficient de partage eau interstitielle/membrane du capteur). La mesure de teneurs très faibles (inaccessibles aux méthodes conventionnelles pour ces contaminants hydrophobes) dans les eaux et la mesure des coefficients de partage eau/sédiment  $K_d$  permet l'étude fine et le calcul de l'émission de contaminants organiques au cours du stockage à terre.

Afin de proposer de nouveaux outils pour la gestion des sédiments contaminés en composés organiques hydrophobes, le sédiment de Lens a en outre été mis en contact avec différents géosorbants afin d'estimer par une méthode chimique simple les fractions de contaminants labiles et récalcitrantes. Selon la littérature, la fraction biodégradable ou biodisponible est ainsi approchée d'une façon beaucoup plus simple que de longs essais de laboratoire (qui atteignent 18 mois dans notre cas).

Une communication orale a été présentée au congrès Battelle « Remediation of contaminated Sediments », début février 2013 aux USA. Un poster a été également présenté au séminaire "Réseau Matière Organique" (ResMO) en France fin janvier.

### **III.6. TECHNIQUES DE TRAITEMENT (2.4)**

La sous-action 2-4 : Mise en œuvre et évaluation de technologies de traitement applicables aux sédiments contaminés de voies d'eau est coordonnée par le CTP, avec la participation du BRGM. Deux ingénieurs BRGM EPI ont suivi le développement et la mise au point du mini-pilote CTP de traitement (100 kg/h) flexible dans sa conception pour s'adapter aussi bien aux boues wallonnes (faible proportion sableuse, granulométrie relativement resserrée) qu'aux boues françaises (présupposées plus sableuses car plus proches des zones portuaires). Il y est ainsi notamment incorporé des opérations d'attrition et de traitement par spirales pour enlever les « contaminations » organiques des sables ou encore des opérations de classifications par classificateur à vis qui ne se justifient a priori pas pour les boues wallonnes mais qui prennent en revanche tout leur sens pour les boues françaises originaires du Nord-Pas de Calais. Des essais préliminaires de tamisage et d'hydrocyclonage ont, par ailleurs, été menés sur des sédiments wallons dans une optique d'optimisation des paramètres opérationnels propres à chacun des sédiments étudiés.

En fin de chaîne de traitement, la fraction fine des sédiments a été également triée au moyen d'un séparateur gravimétrique centrifuge. Tous les essais de traitement ont été finalisés en décembre 2011, et complétés par les analyses des produits sortants et les bilans matières.

En parallèle à ces essais, le choix des sédiments pour l'étude a été arrêté : deux sédiments frais (canal de Lens versant français, canal de Nimy Blaton versant wallon) ainsi qu'un sédiment ancien (boue d'Obourg issue d'un CRT versant wallon).

Les ingénieurs BRGM ont participé à l'expertise/recensement de technologies émergentes (non encore industrialisées comme Novosol, Biogenesis, ...) ou extrapolables au traitement de sédiments contaminés de voies d'eau.

#### **Traitement minéralurgique**

Ce travail est réalisé plus particulièrement par le CTP. Le second semestre 2012 a été consacré à la poursuite des essais de traitement sur le sédiment français prélevé lors du curage du canal de Lens et plus particulièrement de sa fraction limoneuse (<63 - >15µm).

Cette étude s'est focalisée sur les espèces inorganiques ciblées par le décret sol (réglementation Wallonne) et fait suite aux essais de flottation menés au cours du semestre précédent, qui avaient alors mis en évidence que l'utilisation combinée de sulfonate et succinamate comme réactifs de flottation était la plus efficace pour traiter ce type de boue de dragage. Néanmoins, ce protocole ne permettait pas de passer en deçà des valeurs imposées par les législations wallonne et française (seuil S1 de GEODE utilisé comme référence) pour le Cr, Cu, Pb et Zn et des tests complémentaires avaient été envisagés.

L'objectif des essais menés au cours de ce semestre a donc été d'améliorer la dépollution de cette boue par l'amélioration de la coupure granulométrique de la fraction limoneuse (+63 - 15  $\mu\text{m}$ ) avant de la traiter par flottation.

Pour cela, un traitement par attrition (nettoyage de la surface des grains par phénomène de frottement) et/ou hydrocyclonage (assurant une coupure granulométrique à 15 $\mu\text{m}$ ) ont été mis en œuvre sur la fraction (+63 -15  $\mu\text{m}$ ) suivant les protocoles décrits à la figure 18 et caractérisés par les fractions suivantes :

- A : fraction limoneuse initiale issue du traitement pilote effectué au CTP et matière traitée lors de ces essais ;
- B : rejet issu de la flottation de la fraction A ;
- C : pulpe obtenue après attrition de la fraction A ;
- D : pulpe (sous-verse) obtenue après hydrocyclonage de la fraction A ;
- E : sous-verse de l'hydrocyclone, après attrition préalable de la fraction A ;
- F : rejet issu de la flottation de la sous-verse de l'hydrocyclone, après attrition préalable de la fraction A.

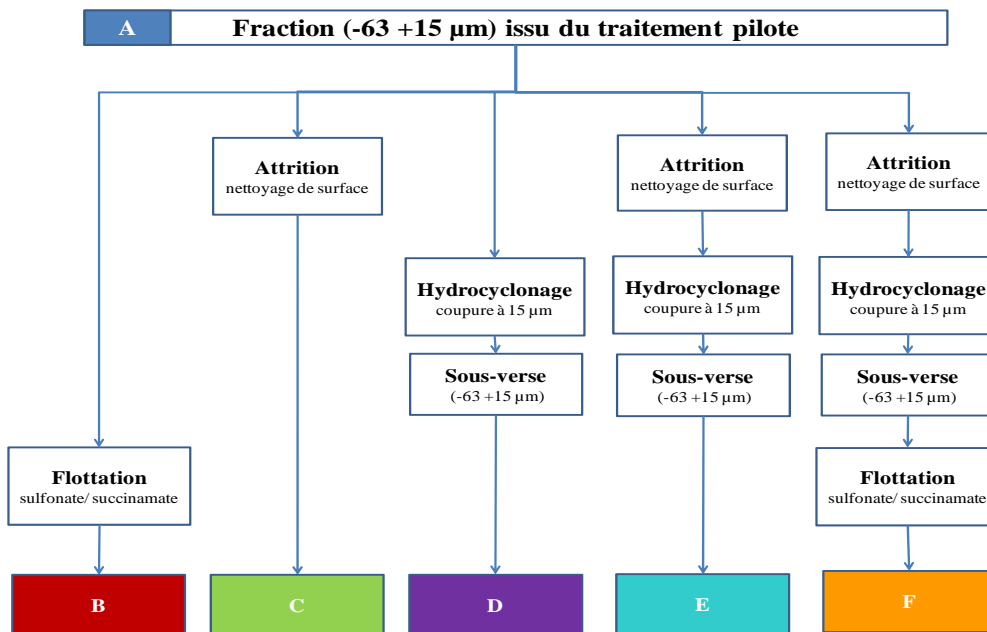


Figure 18 : Schéma de traitement de la fraction limoneuse.

Les résultats obtenus mettent en évidence que ces pré-traitements de la matière permettent de diminuer sensiblement les teneurs en métaux lourds et notamment celles en Zn, Pb, Cu et Hg (Figure 19).

La combinaison attrition/hydrocyclonage/flottation semble particulièrement efficace. Il est ainsi possible de diminuer respectivement la teneur en Hg, Cu, Zn et Pb présents dans la fraction limoneuse d'un facteur 7, 4 et 3. Bien que les teneurs en métaux lourds encore présents dans la fraction limoneuse soient fortement réduites, elles restent encore pour la plupart légèrement supérieures aux seuils imposés par les législations wallonne et française. Toutefois, l'amélioration de la coupure granulométrique semble être, au vu de ces résultats, l'élément clé pour une dépollution efficace de la matière. L'effet de l'attrition est, quant à lui, plus limité.



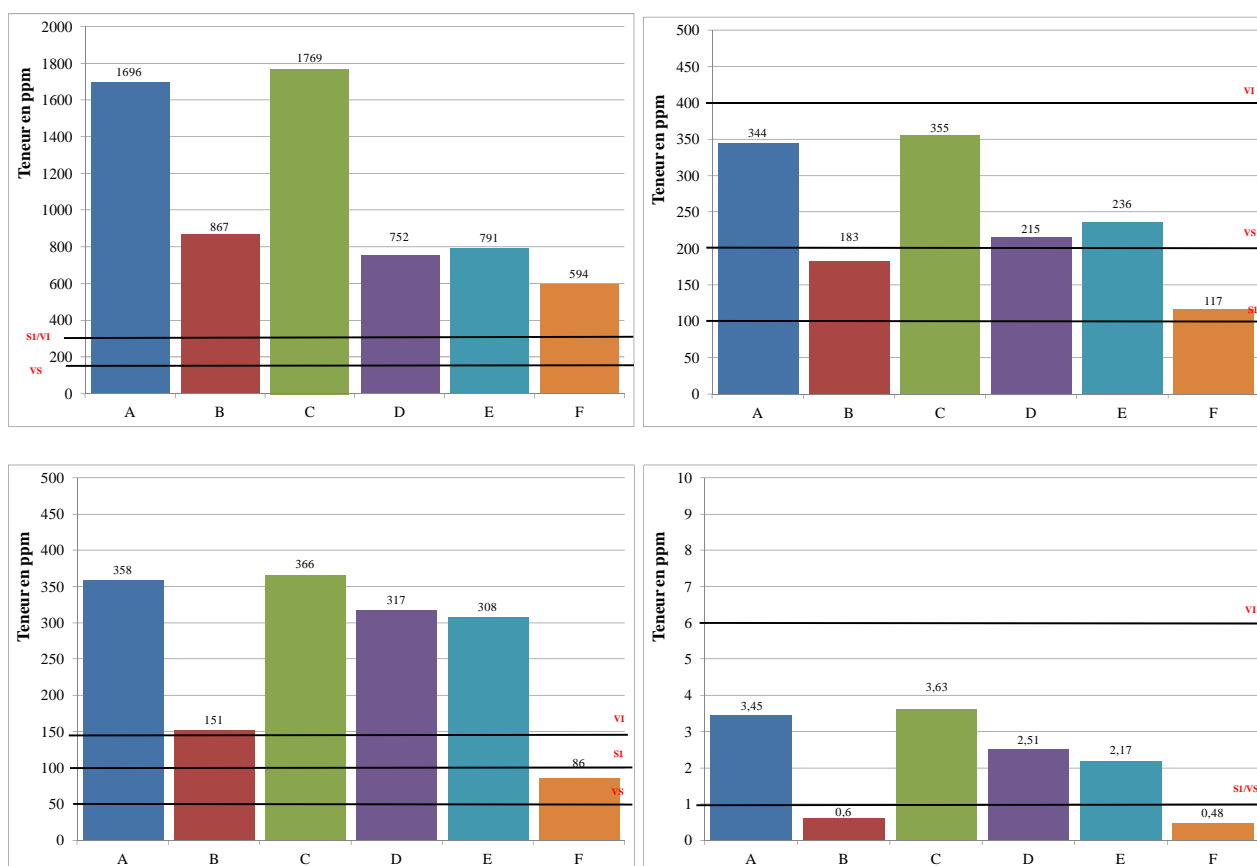


Figure 19 : Effet des traitements sur les teneurs en Zn, Pb, Cu et Hg.

### Valorisation en cimenterie

Concernant l'aspect valorisation des sédiments dans la réalisation d'un ciment, l'EMD et le CTP ont rédigé une feuille de route et fixé les conditions des essais. Le choix des échantillons pour les essais (Tableau 5) et le type de ciment à obtenir (Tableau 6) ont été arrêtés en fonction de ces critères.

Liste des échantillons	Origine de la boue	Descriptif
<b>M868/6OF</b>	Wallonne	Fraction (-15 µm) floculée
<b>M2834/6OF</b>	Wallonne	Fraction (-15 µm) floculée
<b>M3214/6OF</b>	Wallonne	Fraction (-15 µm) floculée
<b>M3356/6OF</b>	Française	Fraction (-15 µm) floculée
<b>M3214 brut reconstitué</b>	Wallonne	Mélange fraction (-63 +15 µm) et fraction (-15 µm)
<b>M3356 brut reconstitué</b>	Française	Mélange fraction (-63 +15 µm) et fraction (-15 µm)

Tableau 5 : Echantillons choisis pour les essais de valorisation en voie cimentière.

Paramètres	Descriptif
Nature du ciment	Ciment Portland de type CEM I
Résistances mécaniques à la compression (MPa)	42,5 ou 52,5
Teneur en phases majoritaires	~20 % de C2S ~60% C3S

Tableau 6 : Caractéristiques du ciment visé.

La fabrication de ciment en utilisant les sédiments en tant que matières premières secondaires a été réalisée à l'EMD. A la suite de la caractérisation des 6 sédiments en vue d'une valorisation dans le cru de ciment, des formulations ont été réalisées. Au-delà des essais de formulation, divers paramètres de cuisson ont été étudiés, tels que la décarbonatation des sédiments ou la durée de la clinkérisation. Les résultats montrent que le pourcentage de substitution des matières premières nobles par les sédiments peut atteindre 50%.

Les ciments synthétisés ont été caractérisés par diffraction des rayons X et fluorescence X. Leurs réactivités respectives ont été évaluées par calorimétrie isotherme. La figure 6, est un diffractogramme, résultat du passage des échantillons au diffractomètre à RX. Ce diffractogramme montre que les deux ciments ont une composition comparable à celle d'un ciment Portland. Les quatre phases majeures sont bien identifiées. L'absence de la chaux montre que la synthèse du ciment a été complète.

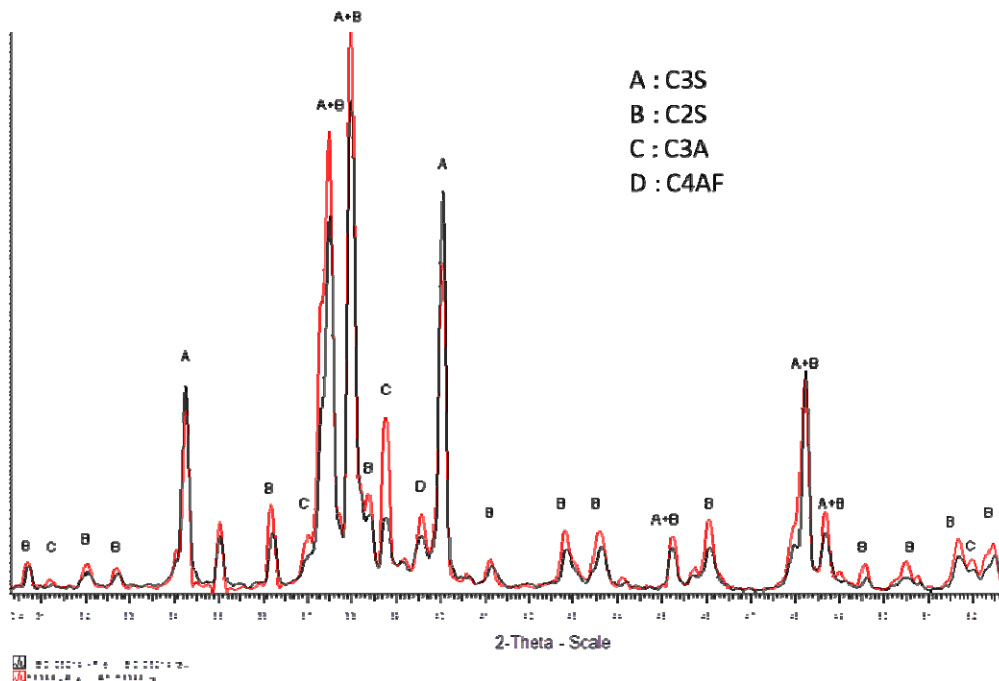


Figure 20 : Diffractogrammes des ciments à base de sédiments.

Les essais au laboratoire effectués à l'EMD, pour optimiser le procédé se poursuivront à l'échelle pilote au CTP. A cet effet, un four d'une capacité de 1 à 5 kg de matière par heure sera employé. L'équipement actuellement disponible au CTP ne permet pas d'atteindre des températures suffisantes (max 1200°C) pour assurer la clinkérisation (1500-1550°C), c'est pourquoi nous utiliserons un autre four, en cours d'acquisition sur un autre projet, et qui aura les caractéristiques techniques appropriées.

### **III.7. PHYTOSTABILISATION (2.5)**

La sous-action 2-5 : Pérennité du traitement de phytostabilisation sur sédiments contaminés par les métaux, est menée par l'INERIS avec la participation des Mines de Douai, sans participation du BRGM.

## IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les travaux restant à mener dans le cadre de l'action 1 sont les suivants, et seront proposés pour les projets futurs :

- maintien à jour de la base de données de l'outil,
- établissement, sur la base d'un SIG, d'un inventaire des chantiers potentiellement utilisateurs de sédiments valorisés,
- prise en compte des chantiers présents et futurs, afin de pouvoir évaluer dans l'outil différents scénarios de gestion, classiques et innovants,
- exploitation de ces besoins futurs et de ces scénarios pour une gestion prévisionnelle des voies d'eau à curer.

Les travaux restant à mener dans le cadre de l'action 2 sont les suivants :

- validation de la technique pXRF avec les résultats d'analyse en laboratoire, pour le suivi de la variabilité cartographique, et de son aptitude à guider un curage sélectif, en vue de favoriser la valorisation des sédiments ou d'optimiser leur mise en dépôt,
- réaliser un inventaire de la réponse des sédiments face aux techniques d'analyse sur site des composés organiques, et, si la détection des polluants est effective, évaluer son aptitude à les quantifier sur une matrice donnée,
- évaluation de l'intérêt des mesures géophysiques sur les sédiments en cours de curage lors des travaux, et mise au point de leurs paramètres,
- suivi du développement et de la mise au point du mini-pilote CTP de traitement,
- suivi ou participation aux essais sur sédiments français et wallons,
- poursuite de l'expertise/recensement de technologies émergentes ou extrapolables au traitement de sédiments contaminés de voies d'eau, et alimentation de l'outil.

## V. BIBLIOGRAPHIE

Alary, C., Lemièrre, B., Haouche-Belkessam, L. (2011) - Granulométrie et contamination comparées des sédiments des voies navigables en Wallonie et nord de la France, enjeux pour la valorisation. *Mines et Carrières*, 181, p. 25-33.

Laboudigue, A., Michel, P., Alary, C., Haouche, L., Lemièrre, B., Pereira, F., Hazebrouck, B., Hennebert, P., & Lucion, C. (2011) - The GeDSeT Project (Gestion Durable des Sédiments Transfrontaliers - Sustainable Management of Trans-boundary Sediments) Focus on Wallonia and the North of France. 7th international SedNet event, 6-9 April 2011, Venice, Italy [www.sednet.org](http://www.sednet.org)

Lemièrre, B., Michel, P., Jacob, J., Haouche, L., Laboudigue, A., 2012. L'outil d'aide à la décision GeDSeT. *Recyclage et Valorisation (Société de l'Industrie Minérale, Paris)* 36, 52-58.

Lemièrre, B., Laperche, V., Haouche, L., & Auger, P. (2013) - Portable XRF and wet materials: application to dredged contaminated sediments from waterways. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, sous presse.

Michel P., Wavrer P, Lemièrre B. (2011) - L'outil d'aide à la décision GeDSeT : Comment estimer les bénéfices globaux d'une meilleure gestion ? *Mines et Carrières*, hors série Sédiments pollués, 181, 11-15.

Michel, P., Lemièrre, B., Jacob, J., Haouche, L., Alary, C., Laboudigue, A., Brequel, H., & Hazebrouck, B., 2012b. The GeDSeT project: constitution of a decision support tool (DST) for the management and material recovery of waterways sediments in Belgium and Northern France. WASCON, Göteborg, 30 May–1 June 2012.

[www.swedgeo.se/wascon2012](http://www.swedgeo.se/wascon2012)

Viezzoli A. and J. Cull, 2005, Electrical methods for detection and discrimination of saline groundwater in clay-rich sediments in northern Victoria *Exploration Geophysics*, 36, 294-300.