Projet SEDIMEL

Développement de diverses applications en technique routière à base de sédiments de dragage

Compilation des livrables

DATE : 15/03/2021

TABLE DES MATIERES

TABLE DES FIGURES **5**
TABLE DES TABLEAUX **8**
1. CONTEXTE DE REALISATION DU PROJET **10**
2. PRESENTATION DU PROJET **11**
3. PHASAGE DU PROJET **14**
4. PHASE 1 : CARACTERISATION DES SEDIMENTS **15**
4.1 Préparation des sédiments de la MEL 16
4.1.1 Prélèvement et Stockage des sédiments 16
4.1.2 Préparation des sédiments 16
4.2 Démarche de caractérisation des sédiments de la MEL 18
4.2.1 Caractérisation physique et géotechnique 19
4.2.2 Caractérisation minéralogique 31
4.2.3 Caractérisation environnementale 34
4.2.4 Conclusion de la partie identification et caractérisation des sédiments de la MEL 37
5. PHASE 2 : ETUDE DE FORMULATION **38**
5.1 Optimisation d'un prétraitement à la chaux des sédiments 39
5.2 Matériaux et formulation témoin de la grave routière traitée 40
5.2.1 3.1. Granulats 40
5.2.2 Liants hydrauliques 40
5.3 Optimisation du squelette granulaire d'une grave routière à base de sédiments MEL 41
5.4 Formulation et traitement des matériaux routiers à base de sédiments 42
5.5 Paramètres de compactage 44
5.5.1 Résultats des essais Proctor modifié et IPI 44
5.5.2 Mesure du gonflement linéaire des matériaux formulés 45
5.6 Suivi des performances mécaniques de la formulation FGT 5 46
5.6.1 Résistances à la compression simple des graves routières traitées 48
5.6.2 Résistance à la traction indirecte et module de rigidité 48
5.6.3 Classe mécanique de la grave traitée aux LHR, à base de sédiments 49
5.7 Conclusion 51
6. PHASE 3 : PILOTES EXPERIMENTAUX POUR L'APPLICATION « GRAVE TRAITEE » 52
6.1 Réalisation des pilotes expérimentaux (Neo-Eco) 52

6.1.1 Emplacement 52
6.1.2 Equipement / Dimensionnement 53
6.1.3 Modélisation 3D 55
6.1.4 Construction des pilotes experimentaux 56
Figure 30 : Photographies de la réalisation des pilotes expérimentaux à Houplines 57
6.2 Suivis des pilotes expérimentaux (Neo-Eco) 57
6.2.1 Protocole du suivi environnemental 57
6.2.2 Résultat du suivi environnemental 60
7. PHASE 4 : OUVRAGES EXPERIMENTAUX POUR LES APPLICATIONS COULIS ET HYDROCYL 63
7.1 Rédaction des cahiers des clauses techiques particulières spécifiques aux chantiers expérimentaux (Neo-Eco) 64
7.1.1 Chaussée reservoir 64
7.1.2 Coulis 64
7.2 Réalisation des 3 chantiers Expérimentaux (MEL) 65
7.3 Suivis de la réalisation des chantiers expérimentaux (Neo-Eco) 79
7.4 Suivis environnementaux et mécaniques des chantiers expérimentaux (Neo-Eco) 81
8. PHASE 5 : ETUDE DU POTENTIEL DE RECYCLABILITE DES PRODUITS 100
8.1 Plan d'action de recyclabilité 100
8.2 Mode opératoire 100
8.2.1 Protocole de prélèvement 100
8.2.2 Protocole de vieillissement 101
8.2.3 Echéances de prélèvement 102
8.2.4 Détermination du caractère inerte des matériaux en fin de vie 102
8.2.5 Detérmination du potentiel de recyclabilité des matériaux en fin de vie 106
8.3 Conclusion 109
9. PHASE 6 : ANALYSE DES CONDITIONS DE MISE SUR LE MARCHE 110
9.1 Sortie du statut de déchet 111
9.1.1 Sortie explicite du statut de déchet 111
9.1.2 Sortie implicite du statut de déchet 111
9.1.3 Règlements REACH et CLP 112
9.2 Application « hydrocyls » 113
9.2.1 Présentation de la filière 113
9.2.2 Cadres réglementaire et normatif 115

9.2.3 Conditions de sortie du statut de déchet 116
9.3 Application « coulis autocompactant » 116
9.3.1 Présentation de la filière 116
9.3.2 Cadres réglementaire et normatif 119
9.3.3 Conditions de sortie du statut de déchet 121
9.4 Application « graves traitées » 121
9.4.1 Présentation de la filière 121
9.4.2 Cadre réglementaire 122
9.4.3 Conditions de sortie du statut de déchet 123
10. PHASE 7 : COMMUNICATION 124
11. COMITE DE PILOTAGE 145
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 146
ANNEXES 147

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Etat initial des sédiments 16
Figure 2 : Protocole de préparation 16
Figure 3 : Emplacement des fractions préparées 17
Figure 4 : Etat des sédiments (0 - 20 mm) après préparation 17
Figure 5 : Distribution granulométrique des sédiments de la MEL 22
Figure 6 : Schéma montrant les limites d'Atterberg. 22
Figure 7 : Méthode des cylindres pour la détermination de la limité de plasticité 23
Figure 8 : Résultats de la mesure des limites d'Atterberg (W_l) des sédiments bruts de la MEL 24
Figure 9 : Essai au bleu de méthylène - Vue du papier filtre et des tâches auréolées 25
Figure 10 : Influence des matières organiques sur les caractéristiques de compactage (Hussein, 1998) 27
Figure 11 : Résultats de l'essai Proctor réalisé sur les sédiments de la MEL Bruts 28
Figure 12 : Résultats de la mesure de l'IPI sur les sédiments bruts de la MEL 28
Figure 13 : Classification des sédiments de la MEL selon le GTR (1992) 30
Figure 14 : Analyse DRX des sédiments bruts de la MEL 32
Figure 15 : Préparation des sédiments pour l'essai de points de fixation de la chaux 39
Figure 16 : Résultats de l'essai de point de fixation de la chaux réalisé sur les sédiments MEL 40
Figure 17 : Courbe granulométrique de la grave routière - fuseau optimal de Talbot-Fuller-Thomson 42
Figure 18 : Essais de compactage et de l'IPI sur la grave routière à base de sédiments 44
Figure 19 : Courbe Proctor de la formulation FGT5 45
Figure 20 : Courbe de mesure de l'indice Portant Immédiat IPI de la formulation FGT5 45
Figure 21 : Essais de mesure du gonflement linéaire des différentes formulations 46
Figure 22 : Essais de traction indirecte et de compression simple des graves routières traités 47
Figure 23 : Résultats des mesures de la résistance à la compression 48
Figure 24 : Classe mécanique de la grave routière à base de sédiments de la MEL 50
Figure 25 : Localisation des pilotes expérimentaux "graves traitées" à Houplines 53
Figure 26 : Structure d'une voirie 54
Figure 27 : Dimensions de la structure des pilotes expérimentaux - application "graves traitées" 55
Figure 28 : Application "graves traitées" - Plan des pilotes expérimentaux (du dessus) 55
Figure 29 : Application "graves traitées" - Plan des pilotes expérimentaux (coupe) 56
Figure 30 : Photographies de la réalisation des pilotes expérimentaux à Houplines 57
Figure 31 : Photographie du prélèvement sur le site de Houplines 60
Figure 32 : Evolution de la teneur en COT (mg/l) pour les pilotes témoin et expérimental à Houplines 61
Figure 33 : Evolution de la teneur en DBO (mg/l) pour les pilotes témoin et expérimental à Houplines 62

Figure 34 : Fabrication des hydrocyls 67
Figure 35 : Principe de l'essai 68
Figure 36 : Application d'une charge représentative d'une roue de poids lourd 68
Figure 37 : Plan du chantier d'aménagement du centre de la ville de Leers 70
Figure 38 : Plan du chantier d'aménagement de la ville de Tourcoing 70
Figure 39 : Modélisation 3D des chantiers test 72
Figure 40 : Modélisation 3D du profil de la chaussée réservoir 73
Figure 41 : Dimensionnement des chantiers test 73
Figure 42 : Photographies de la réalisation du chantier de Leers 75
Figure 43 : Photographies de la réalisation du chantier de Tourcoing 76
Figure 44 : Localisation du chantier test avec sédiments 77
Figure 45 : Délimitation entre le chantier test témoin et expérimental 78
Figure 46 : Dimensionnement du profil des chantiers test 78
Figure 47 : Photographies de la réalisation du chantier de Tourcoing 79
Figure 48 : Prélèvement sur le site de Tourcoing 85
Figure 49 : Evolution de la teneur en COT (mg/l) pour le chantier de Tourcoing 86
Figure 50 : Prélèvement sur le site de Leers 87
Figure 51 : Evolution de la teneur en matières en suspension (mg/l) pour le chantier de Leers 88
Figure 52 : Prélèvement sur le site de Bondues 89
Figure 53 : Schéma de l'essai de lixiviation sur monolithe 84
Figure 54 : Graphique montrant les résultats de la porosité accessible à l'eau 93
Figure 55 : Graphique montrant les résultats de la porosité au mercure - Témoin 94
Figure 56 : Graphique montrant les résultats de la porosité au mercure – Sédiments 5 %.. 94
Figure 57 : Graphique montrant les résultats de la porosité au mercure – Sédiments 6 %.. 95
Figure 58 : Graphique montrant les résultats de l'attaque sulfatique externe 97
Figure 59 : Graphique montrant les résultats des résistances mécaniques 98
Figure 60 : Localisation du chantier expérimental de Bondues 101
Figure 61 : Immersion / séchage à l'air libre des hydrocyls 102
Figure 62 : Extrait du guide Réalisation des remblais et des couches de forme » réalisé par le SETRA 109
Figure 63 : Illustration d'une structure réservoir « Hydrocyls » 114
Figure 64 : Mise en œuvre du chantier de Leers 115
Figure 65 : Domaines d'application des matériaux autocompactants 118
Figure 66 : Mise en œuvre du coulis autocompactant 118
Figure 67 : Coupe transversale d'une structure routière. 122
Figure 68 : Réalisation d'un panneau sur le site de Bondues 124
Figure 69 : Réalisation d'une plaque sur le site de Bondues 125
Figure 70 : Réalisation d'une plaque sur le site de Leers 126
Figure 71 : Réalisation d'une plaque sur le site de Tourcoing 126
Figure 72 : Publication sur le site internet de Neo-Eco 128
Figure 73 : Extrait de la plateforme Sedilab 129
Figure 74 : Extrait d'une publication sur la plateforme Sedilab 130

Figure 75 : Extrait d'une page internet de la MEL 131
Figure 76 : Diffusion sur La Clause Verte 132
Figure 77 : Extrait de la Gazette 133
Figure 78 : Extrait d'Actu-Environnement 133
Figure 79 : Extraits des vidéos 134
Figure 80 : Diffusion du projet lors des Assises Nationales 2019 135
Figure 81 : Réalisation d'une affiche exposée lors des assises nationales des sédiments par le CD2E 136
Figure 82 : Communiqué de presse (3 juin 2019) 138
Figure 83 : Article paru dans La Chronique du BTP (2 juillet 2019) 139
Figure 84 : Article paru dans La Voix du Nord (12 juillet 2019) 140
Figure 85 : Article paru dans le Moniteur (20 septembre 2019) 141
Figure 86 : Publication sur LinkedIn 142

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Phasage de projet 14
Tableau 2 : Identification des essais de caractérisation des sédiments de dragage 18
Tableau 3 : Essais de caractérisation des sédiments de la MEL 20
Tableau 4 : Classification des sols en fonction de leur indice de plasticité..... 24
Tableau 5 : Résultats des limites d'Atterberg des sédiments de la MEL 24
Tableau 6 : Détermination de la catégorie de sol selon la valeur VBS. 25
Tableau 7 : Synthèse des résultats de caractérisation des sédiments de la MEL..... 30
Tableau 8 : Résultats de l'analyse par fluorescence aux rayons X..... 33
Tableau 9 : Récapitulatif des différents paramètres à respecter dans le sédiment et dans l'éluât pour chaque installation de stockage envisagée (mg/kg MS)..... 35
Tableau 10 : Résultats de la caractérisation environnementale des sédiments de la MEL... 37
Tableau 11 : Essais de formulation d'une grave routière traitée aux liants hydrauliques..... 38
Tableau 12 : Composition de la grave routière utilisée dans l'étude 40
Tableau 13 : Formulations testées dans le cadre de l'étude 43
Tableau 14 : Synthèse des résultats des essais Proctor et IPI des différentes formules 44
Tableau 15 : Résultats des essais de mesure des gonflements linéaires 46
Tableau 16 : Rc minimale pour une résistance au trafic direct de chantier 48
Tableau 17 : Résistance à la traction indirecte des graves traités aux LHR 49
Tableau 18 : Classification mécanique des GTLH à base de sédiments à 360 jours..... 50
Tableau 19 : Formulations des pilotes expérimentaux 53
Tableau 20 : Equipement des pilotes expérimentaux - application "graves traitées" 53
Tableau 21 : Dimensions des pilotes expérimentaux - application "graves traitées" 54
Tableau 22 : Résultats de la conductivité, du pH et de la température – Application "graves traitées" – Chantier à Houplines 60
Tableau 23 : Résultats du comportement mécanique entre les hydrocyls comprenant 5 % de sédiments et les hydrocyls comprenant 6 % de sédiments 68
Tableau 24 : Résultats du comportement mécanique entre les hydrocyls comprenant 5 % de sédiments et la formulation témoin..... 69
Tableau 25 : Localisation des chantiers test "hydrocyls"..... 69
Tableau 26 : Dimensionnement des chantiers test "hydrocyls" 71
Tableau 27 : Résultats de la conductivité, du pH et de la température – Application "hydrocyls" – Chantier de Tourcoing..... 86
Tableau 28 : Résultats de la conductivité, du pH et de la température – Application "hydrocyls" – Chantier à Leers..... 87
Tableau 29 : Résultats de la conductivité, du pH et de la température – Application "coulis" – Chantier à Bondues..... 89
Tableau 30 : Résultats de l'essai gel / dégel 91
Tableau 31 : Résultats de l'essai de porosité accessible à l'eau 93
Tableau 32 : Résultats de la porosité au mercure..... 94
Tableau 33 : Résultats de l'essai de la réaction sulfatique externe 96
Tableau 34 : Résultats de l'essai de compression (en MPa)..... 98

Tableau 35 : Résultats de la lixiviation sur monolithe 99
Tableau 36 : Seuils d'acceptabilité en installation de stockage 104
Tableau 37 : Résultats de la lixiviation réalisée sur les hydrocyls témoin, les éco-produits hydrocyls 5% et hydrocyls 6% et le coulis témoin 105
Tableau 38 : Cahier des charges de la caractérisation pour les filières remblais et couche de forme 106
Tableau 39 : Cahier des charges de la caractérisation pour la filière remblais 106
Tableau 40 : Cahier des charges de la caractérisation pour les filières remblais et couche de forme 107
Tableau 41 : Résultats de la caractérisation pour les filières remblais et couche de forme 107
Tableau 42 : Résultats de la caractérisation pour la filière remblais..... 108
Tableau 43 : Sortie implicite du statut de déchet - application hydrocyls 116
Tableau 44 : Eléments devant apparaitre dans la fiche produit fournie par le producteur de matériaux autocompactants - Dossier CERTU n°78..... 121
Tableau 45 : Sortie implicite du statut de déchet - application coulis autocompactant 121
Tableau 46 : Sortie implicite du statut de déchet - application grave traitée 123

1. CONTEXTE DE REALISATION DU PROJET

En partenariat avec la région Nord Pas de calais, la MEL s'engage vers une prise de compétence en matière de gestion de certaines voies d'eau dans le cadre du plan bleu métropolitain. En effet, il apparaît que ces voies répondent à des objectifs déjà identifiés dans le cadre des politiques communautaires en constituant :

- Une armature de développement des espaces naturels de la métropole et un corridor écologique remarquable
- Un élément fonctionnel de l'alimentation en eau, de l'assainissement urbain et de la prévention des inondations
- Un potentiel d'amélioration de la qualité de vie par le développement d'animations touristiques
- Une dynamisation économique par le rayonnement provoqué
- Un élément clef d'une politique plus large d'aménagement, déjà éprouvé au travers des exemples de réhabilitation des canaux anglais et hollandais et au travers des mécanismes amorcés de retournement des villes vers l'eau.

Le maillage bleu est constitué des cours d'eau principaux du réseau domanial, accueillant le transport fluvial de marchandises, tels que la Deûle ou la Lys, mais irrigue également l'ensemble du territoire métropolitain au travers des voies d'eau secondaires, connectées ou non au réseau principal et de l'ensemble du réseau des rivières et becques. Aujourd'hui, l'État et Voies Navigables de France se recentrent très fortement sur la vocation marchande de la voie d'eau au détriment des autres éléments constitutifs du maillage bleu. La mise en place du Plan Bleu Métropolitain passe donc en premier lieu par la sauvegarde et la valorisation des voies d'eau décentralisables, aujourd'hui délaissées.

Dans cette logique, l'article 56 de la loi du 30 juillet 2003 sur les Risques Naturels et Technologiques révisé par la loi du 13 août 2004 et désormais codifié à l'article L 3113-1 et suivant du Code Général de la Propriété des Personnes Publiques permet la décentralisation optionnelle des rivières et canaux. Cette loi permet désormais aux groupements de collectivités, dès lors qu'elles se dotent de la compétence requise, de solliciter le transfert en pleine propriété et à titre gratuit des rivières et canaux ne relevant pas de la catégorie des voies navigables d'intérêt national (réseau magistral) dont la consistance a été précisée par le décret du 16 août 2005. En région Nord - Pas de Calais, plusieurs voies d'eau régionales sont décentralisables (Sambre, Scarpe, etc...). La Région Nord-Pas de Calais est aujourd'hui favorable à une implication et a décidé par délibération du 25 juin 2009 de l'élaboration d'un programme d'actions ayant pour optique la préservation et la valorisation du réseau fluvial secondaire en synergie avec les projets des agglomérations et des territoires concernés.

- Au sein du périmètre communautaire, plusieurs voies d'eau sont concernées par cette problématique
- Les boucles des Prés du Hem à ARMENTIERES et NIEPPE, les boucles d'ERQUINGHEM à NIEPPE/ERQUINGHEM et délaissés de HOUPLINES
- Le Canal de SECLIN

- Les bras et délaissés de la Deûle et la Lys
- Le canal de Roubaix et la Marque Urbaine et ses bras de CROIX et TOURCOING.

Parmi ces différentes voies, certaines ont déjà fait l'objet de démarches et des études sont en cours.

Ainsi dans le cadre de la délibération 12C0701 du 14 décembre 2012 impliquant la sa prise de compétence expérimentale sur le bras de la basse Deûle, la MEL souhaite requalifier et valoriser ce cours d'eau.

2. PRESENTATION DU PROJET

Les projets de la valorisation des sédiments de la Métropole Européenne de Lille se réalise selon la démarche SEDIMATERIAUX.

Comme décrit dans le chapitre précédent, cette démarche passe par une validation à échelle laboratoire de la faisabilité géotechnique et environnementale de la valorisation des sédiments dans les usages visés.

Cette phase laboratoire a été réalisée par la MEL entre 2013 et 2015 en partenariat avec NEOECO et l'IMT Lille-Douai.

L'objectif de cette phase du projet était de substituer des matières granulaires « nobles » utilisées dans les coulis et les bétons de chaussée réservoir (hydrocyl) tout en maintenant des caractéristiques mécaniques fonctionnelles et environnementales acceptables.

La conclusion de cette étude laboratoire était que les sédiments peuvent être utilisés en proportion non négligeable dans les filières de type coulis autocompactant et béton en modules de chaussée réservoir.

En effet, à la fois les essais mécaniques et environnementaux ont permis de démontrer l'acceptabilité des matériaux dans les conditions suivantes :

- Utilisation jusqu'à 20 % de sédiments dans la formule de coulis ;
- Utilisation de jusqu'à 15 % de sédiments en substitution du sable dans la formule de béton en modules de chaussée réservoir ;
- Criblage et séchage préalable des sédiments nécessaires ;

À la suite de ces résultats très concluants de cette laboratoire la MEL souhaite donc passer à la phase terrain de réalisation des chantiers expérimentaux à base de sédiments.

Pour cette phase terrain 3 chantiers expérimentaux seront mis en œuvre sur la métropole de Lille, deux de ces chantiers seront consacrés à l'application Hydrocyl et un chantier sera consacré à l'application Coulis.

En complément, la MEL souhaite également développer des formulations de grave traitée à base de sédiment. Des pilotes expérimentaux seront réalisés à base de cette formulation de « grave traitée » à base de sédiment.

D'autre part, la MEL souhaite porter le projet « SEDIMEL » qui consiste à l'utilisation de sédiments fluviaux inertes et non inertes non dangereux, pour réaliser une expérimentation à l'échelle 1 de la valorisation en technique routière et plus spécifiquement en Remblai et couche de forme. Le projet consistera à étudier pour les applications visées, l'impact de différents taux de matières organiques.

La MEL a choisi les deux filières de valorisation des sédiments en fonction à la fois :

- des caractéristiques des sédiments ;
- des besoins propres de la MEL en matériaux de construction pour les travaux engagés sur ses missions principales.

Des volumes de matériaux considérables sont utilisés annuellement sur des chantiers d'assainissement en Remblai de tranchée. Une proportion importante de ces matériaux de Remblai est constituée par des coulis autocompactants.

Dans le cadre de ses compétences de planification de l'urbanisme et de gestion des eaux pluviales, la MEL prescrit ou réalise des ouvrages de stockage des eaux pluviales. Des techniques alternatives comme les chaussées réservoir (ballast, modules de béton creux) apparaissent adaptées dans de nombreux cas.

CHAUSSEE RESERVOIR

Une chaussée réservoir est une chaussée composée de matériaux granulaires ou préfabriqués (ex : cylindres creux en béton préfabriqués) ayant une porosité importante assurant ainsi une capacité de stockage importante. Cette innovation s'inscrit dans le cadre réglementaire relatif à la gestion des eaux pluviales :

- Directive européenne
- Loi sur l'eau
- Titre II du fascicule 70 du CCTG : Il s'applique à l'exécution des ouvrages de recueil, de stockage et de restitution des eaux pluviales, couramment appelés « techniques alternatives » ou « solutions compensatoires »

Lors d'une forte pluie, la structure réservoir assure les trois fonctions hydrauliques suivantes :

- Absorption des eaux précipitées
- Stockage temporaire
- Restitution du volume stocké à faible débit contrôlé

L'utilisation de cylindres creux apparait comme une solution efficiente en raison de la forte porosité de l'ensemble de l'ordre de 60 %. Cela correspond à une capacité de stockage de 600 litres d'eau par mètre cube de structure mise en place. Par comparaison, la capacité de stockage des structures réservoir en ballast (grave calibrée de granulométrie 20/60 mm par exemple) est nettement inférieure (de l'ordre de 300 à 350 litres par mètre cube de structure).

COULIS AUTOCOMPACTANT

Les matériaux autocompactants pour le remblayage des tranchées combinent caractère autoplaçant, acquisition de portance rapide et caractéristiques mécaniques volontairement limitées et adaptées à l'usage. Ces matériaux ont une fluidité et une viscosité élevées, qui leur permettent de se placer dans des formes géométriques complexes sans problème.

Ce sont des mélanges de granulats (sables, gravillons, fillers, etc.), de liants hydrauliques (ciments, laitiers, cendres volantes…) en faible quantité (moins de 100 kg/m3 dans la majeure partie des cas), d'eau et d'adjuvants. Cette faible proportion de liants leur donne leur caractère réexcavable (nécessaire en cas d'intervention ultérieure pour la maintenance des réseaux).

GRAVE TRAITEE

Une grave est un matériau composé d'un mélange de sable et de gravillon. Celui-ci est utilisé principalement dans l'exécution des corps de chaussées ou de plateformes. Dans toutes ces réalisations, ce sont quelques décimètres d'épaisseur de grave qui sont utilisées sous la couche de finition (enrobé bitumineux de couverture, dallage béton, enduit superficiel d'usure…).

Les graves traitées sont des matériaux obtenus avec un rajout de liant, ce dernier peut être :

- liants hydrauliques
- liants hydrocarbonés
- chaux

3. PHASAGE DU PROJET

Phase du projet		MEL Porteur	Neo-Eco Prestataire de la MEL	IMT Lille-Douai Prestataire de Neo-Eco
Phase 1 - Caractérisation des sédiments			X	X
Phase 2 - Etude de formulation « Grave traitée »				X
Phase 3 - Pilotes expérimentaux pour l'application « Grave traitée »	7.8.1 Réalisation des pilotes expérimentaux		X	
	7.8.2 Suivis des pilotes expérimentaux		X	
Phase 4 - Ouvrages expérimentaux pour les applications coulis et hydrocyl	7.9.1- Rédaction des cahiers des clauses techniques particulières spécifiques aux ouvrages expérimentaux		X	
	7.9.2 Réalisation des 3 ouvrages expérimentaux	X		
	7.9.3 Suivi de la réalisation des ouvrages expérimentaux		X	
	7.9.4 Suivis environnementaux et mécaniques des ouvrages expérimentaux		X	
Phase 5 - Etude du potentiel de recyclabilité des produits			X	
Phase 6 - Analyse des conditions de mise sur le marché			X	
Phase 7 - Communication			X	

Tableau 1 : Phasage de projet

4. PHASE 1 : CARACTERISATION DES SEDIMENTS

Livrables	Rapport de caractérisation Fiche « Sédiment »

Afin d'assurer un niveau de service acceptable des infrastructures portuaires et fluviales, les gestionnaires des ports et voies navigables réalisent des opérations de dragage et de curage régulièrement. Annuellement, les volumes dragués dans le monde représentent près de 600 Mm^3 (Boutin, 1999). La pratique du dragage engendre des volumes importants de sédiments qui peuvent contenir des éléments polluants. En France, les volumes de sédiments dragués représentent environ 50 Mm^3 de sédiments marins, dont 90% concernent les dragages maritimes des ports estuariens et plus de 3 millions de mètres cubes chaque année. Il s'instaure alors une problématique liée à la gestion de ces sédiments. Il a été démontré que les contaminants qui peuvent être présents dans les sédiments se concentrent principalement dans la fraction fine (<45 µm) (Noppe, 1996 ; Gosselin, 1999 ; Zhou, 2009). En effet, de par la composition des sédiments où la fraction fine est majoritaire, ils constituent le dernier refuge pour l'accumulation des polluants de différentes origines. La granulométrie est l'un des facteurs principaux qui détermine la variation des concentrations de contaminants dans les sédiments (Robbe, 1981 ; Noppe, 1996). Ainsi, les opérations de dragage peuvent engendrer une remobilisation de ces polluants et leurs mises en suspension pouvant, à certaines teneurs, avoir un impact néfaste sur l'environnement. En effet, ces matériaux sont considérés comme des déchets dès leur émersion depuis 2002 (Décret n°2002-540 du 17 avril 2002 relatif à la classification des déchets) et ils peuvent parfois avoir un impact environnemental non négligeable. La gestion à terre et la valorisation des sédiments de dragage dans les matériaux de construction est l'une des solutions potentielles exploitées depuis plusieurs années.

Concernant la Métropole Européenne de Lille (MEL), l'évaluation des volumes de sédiments à dragués, dans le cadre de l'étude stratégique Plan Bleu « sédiments de dragage », a permis de recenser environ 800 000 m^3 de sédiments, dont 556 000 m^3 qui sont considérés comme non dangereux. Dans ce contexte de développement du territoire, qui vise à valoriser le patrimoine « voie d'eau » afin d'être un élément fort et structurant du développement, environ 167 000m^3 de sédiments devront être dragués (rapport : LES SÉDIMENTS POLLUÉS DANS LES CANAUX, 2014). Aujourd'hui la priorité de la MEL est de trouver des filières viables pour la valorisation de ces volumes de sédiments, car cela représente des enjeux économiques et sociétaux majeurs.

Dans ce contexte, la MEL a initiée plusieurs projets régionaux visant à valorisés et promouvoir l'utilisation des sédiments comme matière première secondaire dans la réalisation d'ouvrage de génie civil à grande échelle, à travers la réalisation de chantiers test de valorisation de sédiments en grave traitée en structure routière (couche de base et couche de fondation). Dans ce rapport nous présenterons les résultats de caractérisation physicochimiques et mécaniques des sédiments prélevés dans les canaux gérés par la MEL. Cette étape de caractérisation représente une étape clé dans la démarche de valorisation des sédiments.

4.1 PREPARATION DES SEDIMENTS DE LA MEL

4.1.1 PRELEVEMENT ET STOCKAGE DES SEDIMENTS

Les sédiments ont dans un premier temps été prélevés (400 m^3) en février 2018. Puis, ils ont été stockés sur un site de la Métropole Européenne de Lille situé au 7 avenue de Rotterdam à Bondues (cf. Figure 1).

Figure 1 : Etat initial des sédiments

4.1.2 PREPARATION DES SEDIMENTS

Dans un premier temps, les sédiments ont été déshydratés à l'air libre, puis ils ont fait l'objet d'un protocole de préparation bien définis dans le but d'obtenir une fraction 0 – 20 mm. Le protocole est le suivant :

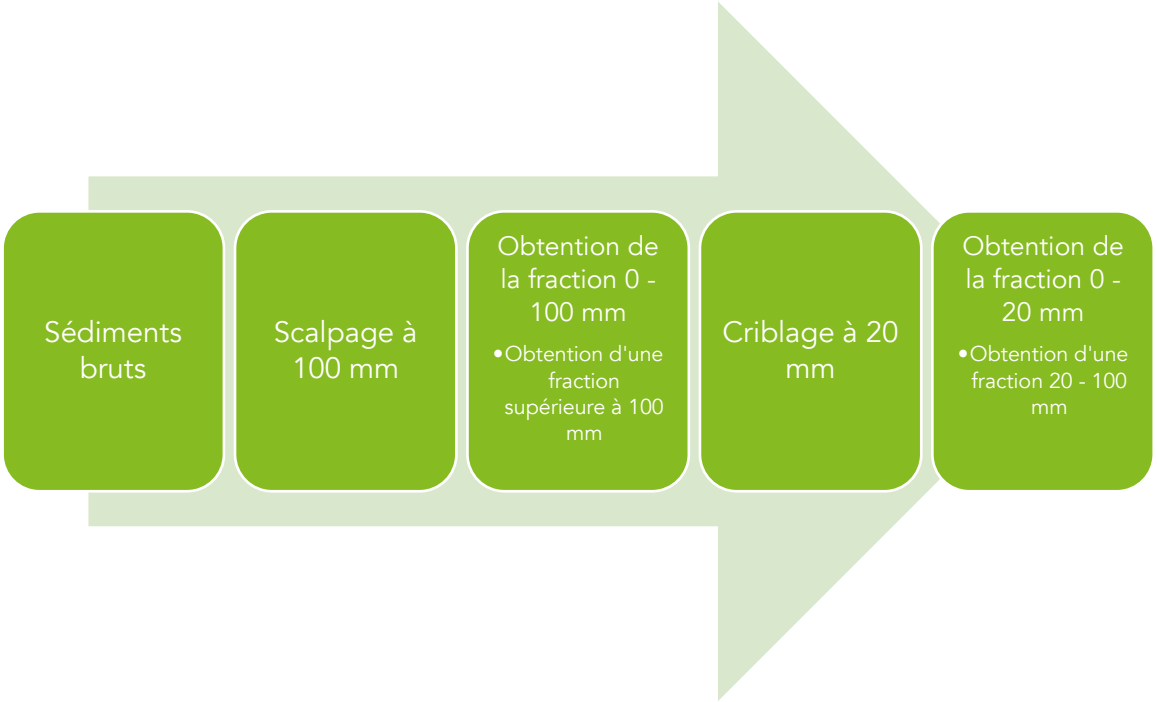


Figure 2 : Protocole de préparation

Les fractions résultantes seront déposées sur un géotextile, ceci afin de ne pas contaminer le gisement de sédiments par le terrain naturel, comme montré dans le schéma ci-dessous.

Figure 3 : Emplacement des fractions préparées

La Figure 2 montre l'état des sédiments 0 – 20 mm après préparation.

Figure 4 : Etat des sédiments (0 - 20 mm) après préparation

4.2 DEMARCHE DE CARACTERISATION DES SEDIMENTS DE LA MEL

Une caractérisation physico-chimique, géotechnique et environnementale des sédiments bruts est indispensable pour envisager une valorisation adaptée. Les analyses ont été réalisées sur un échantillon moyen représentatif de la zone de prélèvement, et obtenu à la suite de l'homogénéisation de plusieurs échantillons séparément (homogénéisation de plusieurs fûts). Le tableau 1 présente l'ensemble des caractérisations qui ont été réalisé.

Type de caractérisation	Identification
Caractérisation physique et géotechnique	Classification selon le guide de réalisation des remblais (GTR, LCPC-SETRA, 1992) des matériaux étudiés
Caractérisation chimique	Détermination de la composition chimique de la fraction solide et des éléments mobilisables
Caractérisation environnementale	Détermination des concentrations d'éléments chimiques dans la fraction solide et dans l'éluât pour la classification selon la réglementation de gestion de déchets à terre- Critères d'acceptation en installations de stockage L'annexe II de l'arrêté du 28 octobre 2010 (remplacé par l'arrêté du 12 décembre 2014)

Tableau 2 : Identification des essais de caractérisation des sédiments de dragage

4.2.1 CARACTERISATION PHYSIQUE ET GEOTECHNIQUE

Les sédiments de dragage de la MEL ont été caractérisés selon le protocole de caractérisation spécifiés dans le guide de réalisation des remblais et des couches de forme « GTR » (LCPC-SETRA, 1992). Les essais ont été réalisés selon les normes présentées dans le tableau ci-dessous.

Essai	Norme	Principe
Teneur en eau pondérale	XP P 94-047	Etuvage à 50°C jusqu'à stabilisation de la masse
Teneur matières organiques pondérale	NF P 94-050	Calcination à 450-500°C de la fraction 0/2mm, pendant 3h
Identification granulométrique, tamisage par voie humide	XP P 94-041	Séparation des fractions granulaires par lavages à travers des tamis de diamètres différents
Analyse granulométrique des sols – Méthode par sédimentation	NF P 94-057	Mesure de la densité d'une solution contenant la fraction 0/80µm d'un sol en fonction du temps. Application loi de Stokes
Détermination de la masse volumique des particules solides des sols – Méthode du pycnomètre à hélium	NF P 94-054	Mesure du volume des particules (d=0/2mm) par pesée à l'aide d'un pycnomètre.
Détermination des limites d'Atterberg – Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau	NF P 94-051	Recherche de la teneur en eau à laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle se ferme (W_L), recherche de la teneur en eau à laquelle un rouleau de sol confectionné manuellement se fissure (W_P)
Détermination des limites d'Atterberg – Partie 1 : Limite de liquidité – Méthode du cône de pénétration	NF P 94-052-1	Mesurer l'enfoncement, après un temps fixé, l'enfoncement d'un cône, sous son poids propre, dans un sol remanié.
Mesure de la quantité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau	NF P 94-068	Mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène qui peut être adsorbé par un échantillon de sol.
Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor normal - Essai Proctor modifié	NF P 94-093	Mesurer la teneur en eau et la densité sèche d'un sol après l'avoir humidifié à plusieurs teneurs en eau, et compacté selon un procédé bien défini.

Indice CBR après immersion - Indice CBR immédiat - Indice Portant Immédiat - Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR	NF P 94-078	Mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de matériau

Tableau 3 : Essais de caractérisation des sédiments de la MEL

TENEUR EN EAU INITIALE

Selon les études antérieures menées sur les sédiments de dragage la teneur en eau des sédiments dragués peut être importante (entre 100 et 300. Une fois mis en zone de dépôt, cette teneur en eau initiale va rapidement évoluer par un processus naturel de décantation voire de consolidation.

Les mesures de la teneur en eau des sédiments de la MEL ont été réalisées selon la norme NF P 94-050. Les résultats des mesures sont repris dans le tableau. La teneur en eau moyenne des sédiments analysés était de 48.26 %. La teneur en eau des sédiments de la MEL n'est pas très importante en comparaison avec les valeurs qu'on peut trouver dans la littérature des travaux réalisés sur les sédiments de dragage. Ces valeurs sont influées en premier lieu par l'état de consolidation des sédiments et aussi par le mode de prélèvement.

Par ailleurs, la température de séchage influe sur cette mesure. En général, le séchage se fait à des températures comprises entre 40 et 60°C pour ne pas altérer les matières organiques qui sont sensibles à la température (Boutouil, 1998 ; Dubois, 2006 ; Rekik, 2007 ; Tran, 2009 ; Zri, 2009 ; Wang, 2011). En effet, plusieurs études ont traités l'influence de la température de séchage sur la mesure de la teneur en eau. Il s'avère qu'un écart de 2% de mesure de la teneur en eau peut être constaté entre un séchage à 40°C et un séchage à 105°C (Dubois, 2006 ; Wang, 2011).

TENEUR EN MATIERES ORGANIQUES

La présence des matières organiques (M.O.) dans les sédiments est une source d'instabilité physico-chimique considérable (Dubois, 2006 ; Rekik, 2007). En effet, Boutouil (1998) a démontré que la teneur en carbone organique (C.O.) d'un sédiment est proportionnelle à sa teneur en eau. De ce fait, leur structure instable joue un rôle d'amplificateur dans les changements de volume sous l'effet d'un chargement ou d'une variation de teneur en eau (Rekik, 2007 ; Tran, 2009). Ceci peut être expliqué aussi par le fait de la présence de complexes argilo-humiques ou limoneux humiques qui ont un potentiel de rétention d'eau très important (Dubois, 2006). Il existe plusieurs techniques qui permettent de mesurer la quantité de matières organiques d'un matériau (la calcination, la méthode chimique, en dosant le carbone organique par oxydation sulfochromique). D'après les travaux précédents menés sur les sédiments de dragage, les teneurs en M.O. de ces derniers varient entre 2 à 20% de la matière sèche.

La **teneur moyenne des matières organiques** des sédiments de la MEL était de **13,14%** de la matière sèche. D'après la classification du guide des réalisations des remblais et des couches de forme GTR (LCPC-SETRA, 1992), les sédiments de de la MEL sont classés comme **fortement organique** (9 < M.O.). Des mesures de pertes au feu (PAF) ont également réalisées par calcination à **550 °C.** Cette mesure permet de quantifier les matières organiques non volatiles. La valeur moyenne de la PAF était de **13,82%** de la matière sèche.

ANALYSE GRANULOMETRIQUE

L'analyse granulométrique permet de déterminer la distribution pondérale de la taille des grains des matériaux étudiés. Elle permet aussi de quantifier les différentes fractions constituants le matériau (argile < 2 µm < limon < 63 µm < sable). Lors d'une analyse de sédiments les trois paramètres essentiels pour leur classification selon leur granularité sont :

- le Dmax est la dimension du plus gros élément contenu dans le matériau ;
- le tamisât à 2 µm (ou fraction argileuse) permet de distinguer les sédiments riches en fines des sédiments sableux et graveleux ;
- le tamisât à 63 µm (ou fraction fine) permet de distinguer les sédiments riches en fines des sédiments sableux et graveleux ;
- le tamisât à 2 mm permet la distinction entre les sédiments à tendance sableuse et les sédiments à tendance graveleuse.

L'analyse granulométrique des sédiments de la MEL a était réalisée selon la norme la granulométrie laser (NF ISO 13320-2, 2000), à l'aide d'un granulomètre laser de la marque Beckman Coulter LS 13 320 MW. Cet appareil permet de mesurer, en une seule analyse, la distribution des particules de taille comprise entre 17 nm et 2000 µm dans une suspension.

Les résultats des analyses réalisées sur les trois échantillons de sédiments MEL sont présentés dans la figure ci-dessous. D'après ces résultats il s'avère que l'ensemble des matériaux sont des matériaux fins (D_{max}=1mm et tamisât à 80µm > 35 %) avec une large fraction sableux-limoneuse (fraction inférieure à 1mm). La majeure partie des granulats ont un diamètre compris entre 60 et 1000 µm.

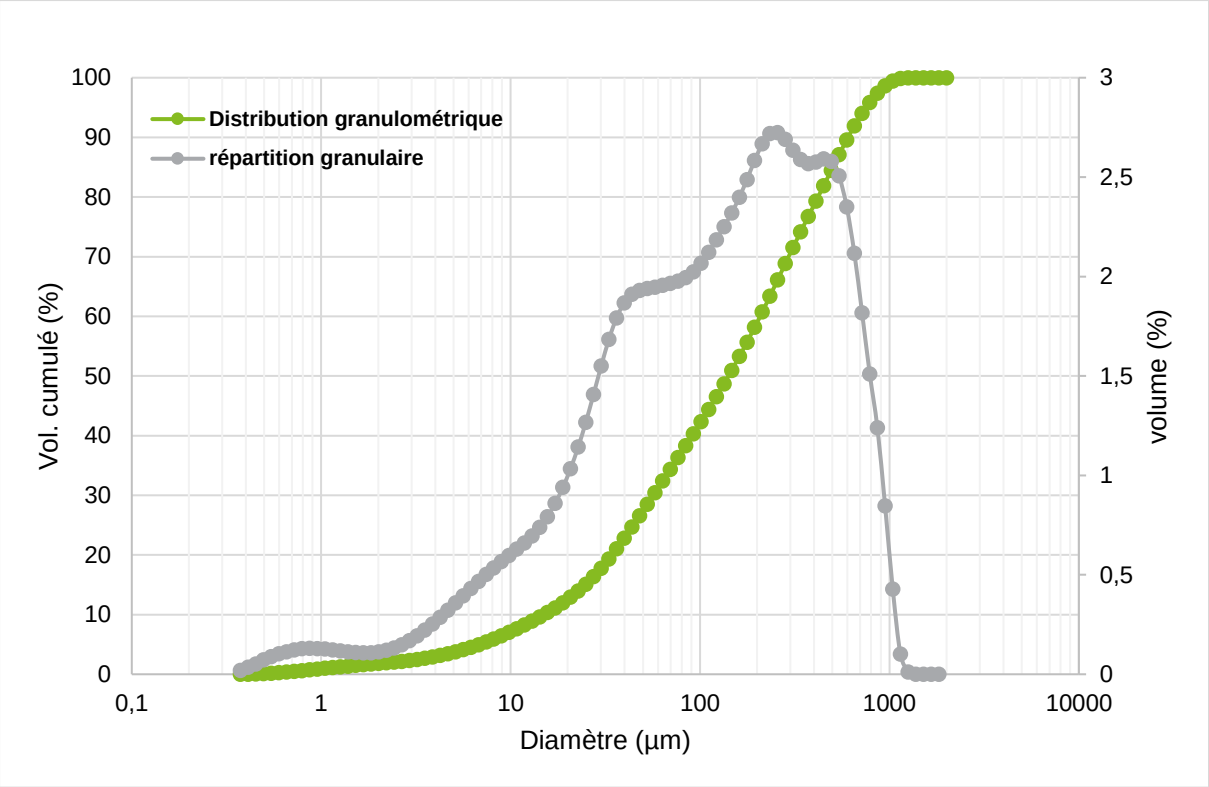


Figure 5 : Distribution granulométrique des sédiments de la MEL

LIMITES D'ATTERBERG

Les limites d'Atterberg sont des essais qui permettent de mettre en avant des teneurs en eau caractéristiques des sols fins permettant d'établir leur classification, d'évaluer leur consistance, ainsi que de caractériser les différents états des sols (liquide, plastique et solide). Cela permettra de prévoir au mieux le comportement des sols pendant les opérations de tassement. A la frontière de ces états, se trouvent les limites suivantes :

La limite de plasticité (WP) : limite entre l'état solide et l'état plastique,

La limite de liquidité (WL) : limite entre l'état plastique et l'état liquide.

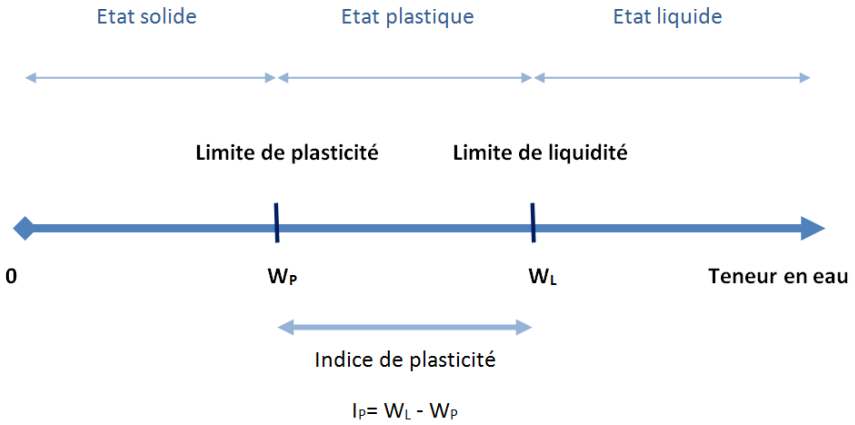


Figure 6 : Schéma montrant les limites d'Atterberg.

Détermination de la limite de Plasticité : méthode des cylindres

Cet essai consiste à prendre un échantillon de sol, de lui ajouter un peu d'eau et d'homogénéiser le mélange. Par la suite, un cylindre de 3 mm de diamètre et 10 cm de longueur est réalisé, comme montré sur la photographie ci-dessous. Des manipulations lui sont faites jusqu'à ce que des fissures apparaissent sur le rouleau. L'échantillon est ensuite récupéré et pesé (mh). Par la suite, il est mis dans un four afin qu'il sèche et la nouvelle masse est alors notée (ms). Le calcul suivant permet de connaitre la teneur en eau : W (%) = $\frac{mh-ms}{mh}$ x 100%

La limite de plasticité correspond à la teneur en eau en dessous de laquelle il est impossible de fabriquer des cylindres de 3 mm de diamètre sans qu'ils se cassent.

Figure 7 : Méthode des cylindres pour la détermination de la limité de plasticité

Limite de Liquidité : mesure avec la coupelle de Casagrande

La limite de liquidité représente une teneur en eau qui correspond au passage de l'état liquide à l'état plastique au fur et à mesure qu'il sèche, ou de l'état plastique à l'état liquide lorsqu'il s'imprègne d'eau. L'expérience consiste à prendre un échantillon de sol, l'humidifier, et l'homogénéiser. Par la suite, cet échantillon est placé dans la coupelle de manière à avoir une épaisseur d'environ 1 cm. Dans ce même échantillon, une rainure lui est appliquée au milieu. Puis des chocs sont provoqués sur cette coupelle et il faut compter le nombre de coups nécessaires pour que la rainure se referme sur 10 mm. Pour finir, l'échantillon est récupéré et pesé (mh). La teneur en eau pourra alors être déterminée avec l'obtention de la nouvelle masse (ms) après passage au four. On réitère la manipulation, mais avec des teneurs en eau différentes afin de s'approcher au mieux du nombre de 25 coups. Les résultats sont calculés à l'aide de la formule de la teneur en eau.

La limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à un nombre de 25 coups. Par conséquent, les résultats peuvent être également calculés avec la formule suivante :

$$WL = W + \left(\frac{N}{25}\right)^{0.121}$$

À la suite de l'obtention de cette valeur, il est possible de déterminer l'indice de plasticité IP. Cet indice correspond à l'écart entre la limite de liquidité et la limite de plasticité. Pour toutes les teneurs en eau comprises entre ces deux limites, le matériau sera dans un état plastique. Plus l'écart est important, plus la plasticité l'est également. La formule est la suivante :

$$IP = WL - WP$$

La valeur de l'indice de plasticité Ip obtenue pourra être comparée aux seuils du tableau suivant.

Sous - classe	seuils	Plasticité
A1	0 < IP < 12	Faiblement plastique
A2	12 < IP < 25	Moyennement plastique
A3	25 < IP < 40	Plastique
A4	40 > IP	Très plastique

Tableau 4 : Classification des sols en fonction de leur indice de plasticité.

Les résultats des mesures des limites d'Atterberg sont repris dans la figure et le tableau ci-dessous. La limite de liquidité était de WL= 63%, la limite de plasticité était de WP= 49% et l'indice de plasticité était **IP= 14%**. Selon le GTR (1992) les sédiments de la MEL sont **moyennement plastiques**. Ces résultats sont dans le même ordre de grandeur des valeurs obtenus sur d'autres sédiments de la région dans d'autres études.

Limite de liquidité :	W_L =	63,54 %
Limite de plasticité :	W_P =	49,13 %
Indice de plasticité :	IP =	14,41 %

Tableau 5 : Résultats des limites d'Atterberg des sédiments de la MEL

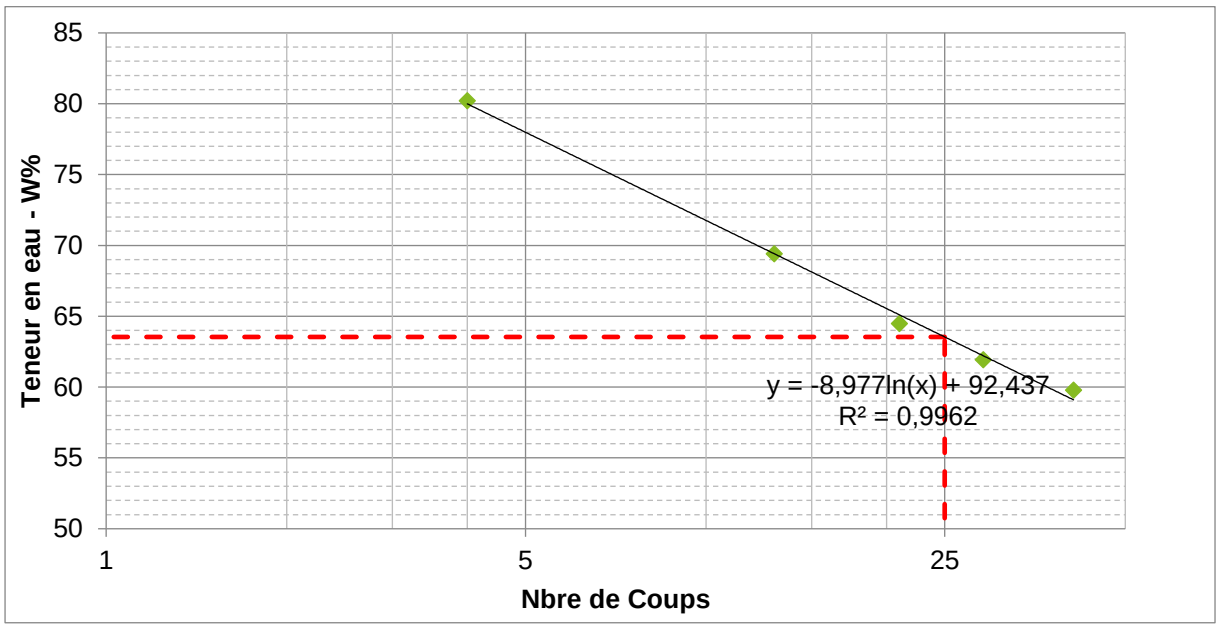


Figure 8 : Résultats de la mesure des limites d'Atterberg (W_l) des sédiments bruts de la MEL

VALEUR AU BLEU DE METHYLENE ET MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE

L'essai à la valeur bleue méthylène consiste à évaluer l'indice de l'angulosité d'un sol en mesurant la capacité d'adsorption des molécules de bleu de méthylène à la surface des particules suivant la norme NF P94-068. L'essai consiste à mélanger un échantillon de sol ou

de sédiments avec de l'eau déminéralisée. Progressivement, on ajoute des volumes constants et réguliers dans le temps de bleu de méthylène par pas de 5 cm^3 à 10 cm^3, selon l'argilosité du matériau. La suspension de sol est maintenue en agitation permanente à une vitesse de 400 tr/min (plus ou moins 100 tr/min). A chaque ajout, une goutte de ce mélange est prélevée et déposée sur du papier buvard. Dès qu'une auréole bleu clair apparait (figure 6), de largeur millimétrique, dans la zone humide de la tâche, l'essai est dit « positif ». En effet, l'adsorption du bleu sur les particules d'argile est considérée comme terminée et c'est l'excès de bleu de méthylène qui apparait dans l'auréole. L'essai est poursuivi jusqu'à obtention de 5 tâches consécutives dites « positives » déposées toutes les minutes sur le papier buvard sans ajout de solution. A ce moment-là, l'expérience est alors stoppée. Toutefois, si l'auréole disparait, de nouvelles injections de bleu de méthylène, avec des pas de 2 cm^3 à 5 cm^3, doivent être réalisées. Par la suite, le volume de bleu de méthylène qui a été injecté (V bleu) est relevé et la teneur de la valeur au bleu peut être connue grâce à une des deux formules suivantes :

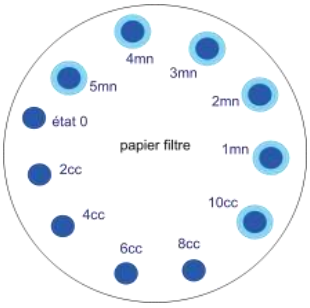


Figure 9 : Essai au bleu de méthylène - Vue du papier filtre et des tâches auréolées

$VBS = \frac{B}{m} \times 100$ pour D_{max} inférieur à 5 mm

$VBS = \frac{B}{m} \times C \times 100$ pour D_{max} supérieur à 5 mm

Avec B : masse de bleu introduite (V x 0,01)

m : masse sèche de la prise d'essai

La valeur pourra ensuite être comparée aux divers seuils retenus par le GTR afin de définir à quelle catégorie de sol appartient l'échantillon (tableau ci-dessous).

Sous - classe	seuils	Catégorie de sol
A1	VBS < 0,2	Sol sableux
	0,2 < VBS <2,5	Sol limoneux
A2	2,5 < VBS < 6	Sol limoneux – argileux
A3	6 < VBS < 8	Sol argileux
A4	8 < VBS	Sol très argileux

Tableau 6 : Détermination de la catégorie de sol selon la valeur VBS.

La mesure de la valeur au bleu de méthylène (VBs) permet de qualifier l'activité argileuse d'un matériau, c'est-à-dire la quantité de particules argileuses susceptible de changer de comportement face aux variations de teneurs en eau. Selon plusieurs auteurs (Maherzi, 2013 ; Dubois, 2006), les sédiments de dragage marins ont une activité non négligeable, avec une VBs comprise entre 2,6 et 5,2. Pour des valeurs de VBs autour de 2,5, les sols sont qualifiés de limoneux de plasticité faible à moyenne et pour des VBs autour de 6, les sols sont des limons ou bien des argiles. La mesure de la VBs peut être influencée par la présence d'autres éléments chargés en surface, comme des matières organiques par exemples, qui peuvent entraîner un échange cationique dans la solution de bleu de méthylène. La valeur de bleu de méthylène

La mesure de la valeur de bleu de méthylène des sédiments de la MEL était de **VBs= 1,30 g/100 MS**. Selon le GTS (1992) les sédiments de la MEL sont assimilables à un **sol limoneux**.

PARAMETRES DE DENSIFICATION : OPTIMUM PROCTOR ET INDICE PORTANT IMMEDIAT IPI

L'essai Proctor (NF P94-093) consiste à compacter une quantité de matériau dans un moule de dimensions normalisées. L'essai est effectué sur plusieurs échantillons ayant des teneurs en eau différentes. Cet essai permet d'obtenir une teneur en eau optimale pour laquelle le matériau présente la masse volumique sèche la plus importante. Il existe deux types d'essais Proctor : l'essai Proctor normal et l'essai Proctor modifié. La différence entre ces deux essais est l'énergie de compactage appliquée. Parallèlement à cette recherche de l'optimum Proctor, des mesures de poinçonnement sur les éprouvettes compactées permettent d'estimer la portance du matériau lors de sa mise en œuvre. L'indice portant immédiat (IPI) (NF P-94-078) est une grandeur utilisée pour apprécier la capacité d'un sol ou d'un matériau élaboré à supporter la circulation des engins de chantier.

Le principe de l'essai de portance immédiate consiste à poinçonner avec une masse cylindrique et avec une vitesse constante égale 1,27 mm/min±0,1 mm/min une éprouvette de matériau compacté. Les enfoncements obtenus à 2,5 et 5,0 mm sont rapportés à ceux d'un sol de référence pour lequel 13,35 kN sont nécessaires

pour avoir un enfoncement de 2,5 mm (I1) et 19,93 kN pour 5 mm (I2). L'IPI, exprimé en %, est choisi conventionnellement comme étant la plus grande valeur des deux rapports calculés.

$$I_1 = \frac{\textit{Effort de pénétration à 2,5mm(kN)}}{13,35(kN)} \times 100$$

$$I_2 = \frac{\textit{Effort de pénétration à 5 mm(kN)}}{19,93(kN)} \times 100$$

La détermination de l'optimum Proctor est très importante pour juger de l'utilisation d'un matériau dans le domaine routier. Par ailleurs, plusieurs études ont montré que la présence

de matières organiques influence les caractéristiques de compactage (Holtz et al., 1970 ; Franklin et al., 1973 ; Tran, 2009). En effet, plus la teneur en M.O. est importante, plus la masse volumique sèche optimale du sol diminue et plus la teneur en eau optimale augmente, comme illustré dans la figure ci-dessous (Hussein, 1998).

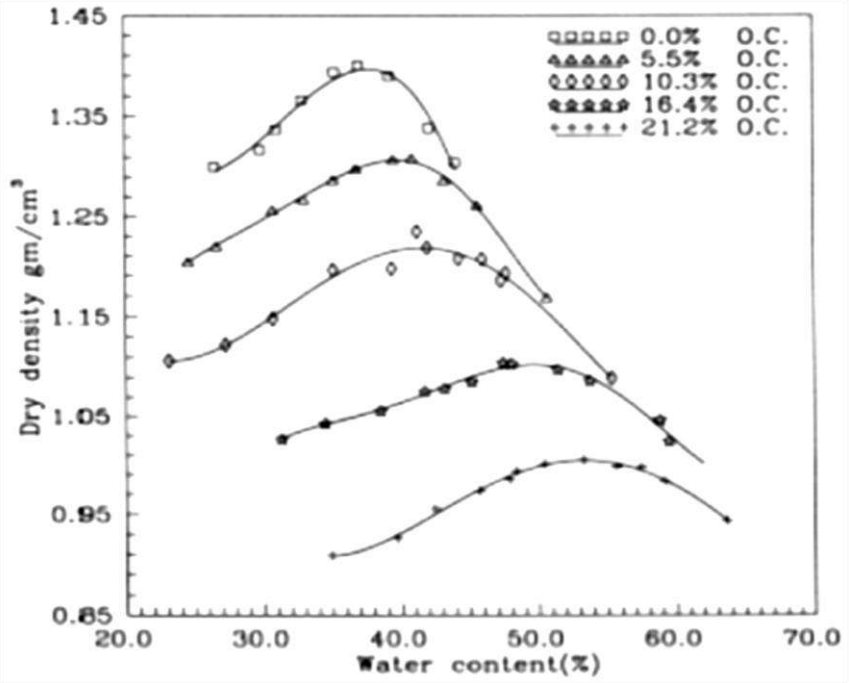


Figure 10 : Influence des matières organiques sur les caractéristiques de compactage (Hussein, 1998)

La figure ci-dessous montre les variations de la masse volumique sèche ρ_d en fonction de la teneur en eau des sédiments MEL. La masse volumique sèche optimale est de **1,33 Mg/m³** pour une teneur en eau optimale de **28,4%**. Les ordres de grandeur des teneurs en eau et des masses volumiques sont tout à fait particulières par rapport aux sols usuellement utilisés en remblai ou en sous couches routières (W_{OPN}=10,2 à 11,7% ; ρd_{OPN}=1,77 à 1,93t/m³). Ceci peut être expliqué par trois hypothèses : la présence de matières organiques, la sensibilité à l'eau qui est en relation directe avec la composition minéralogique des sédiments (proportion et nature des argiles entre autres) et la distribution granulométrique.

En ce qui concerne l'Indice Portant Immédiat (IPI), la figure 8 présente l'évolution de l'IPI en fonction des teneurs en eau. La valeur de l'IPI mesurée était de **5,8**. Cette valeur est dans le même ordre de grandeur des valeurs obtenues avec les sédiments du port de Ouistreham (IPI à W_{OPN} = 7%) (Rekik, 2007) et des sédiments du port de Rouen (IPI à W_{OPN} = 8%) (Colin, 2003).

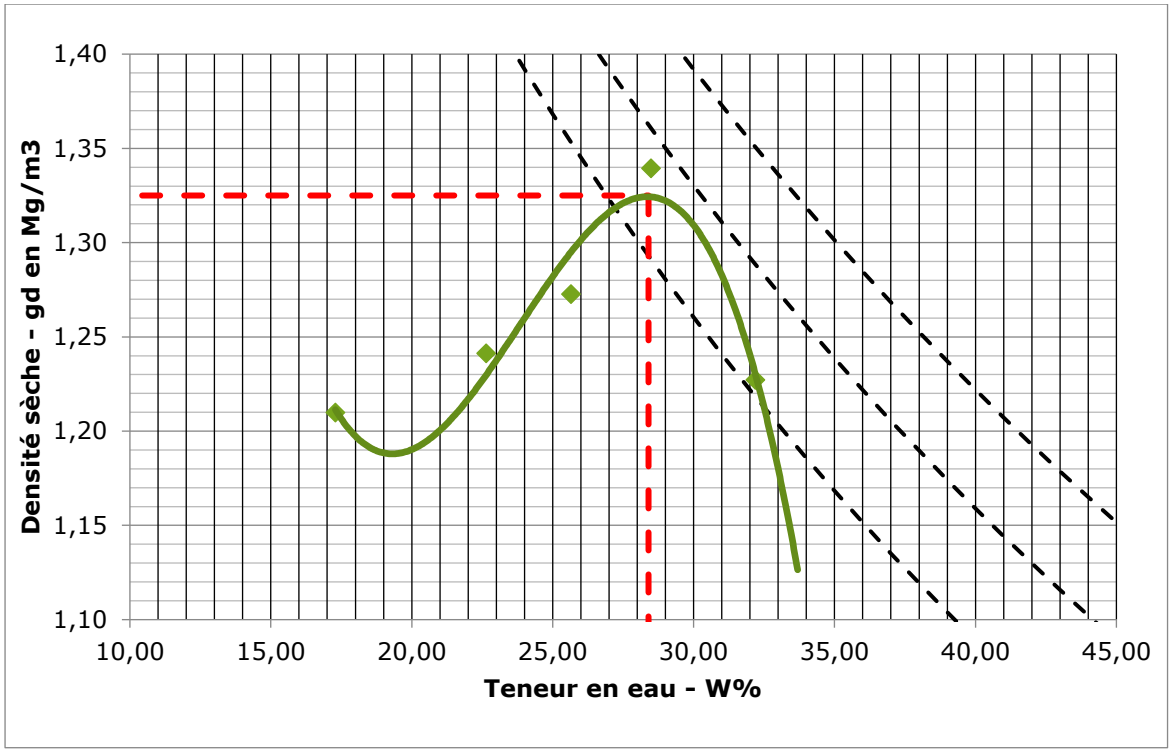


Figure 11 : Résultats de l'essai Proctor réalisé sur les sédiments de la MEL Bruts

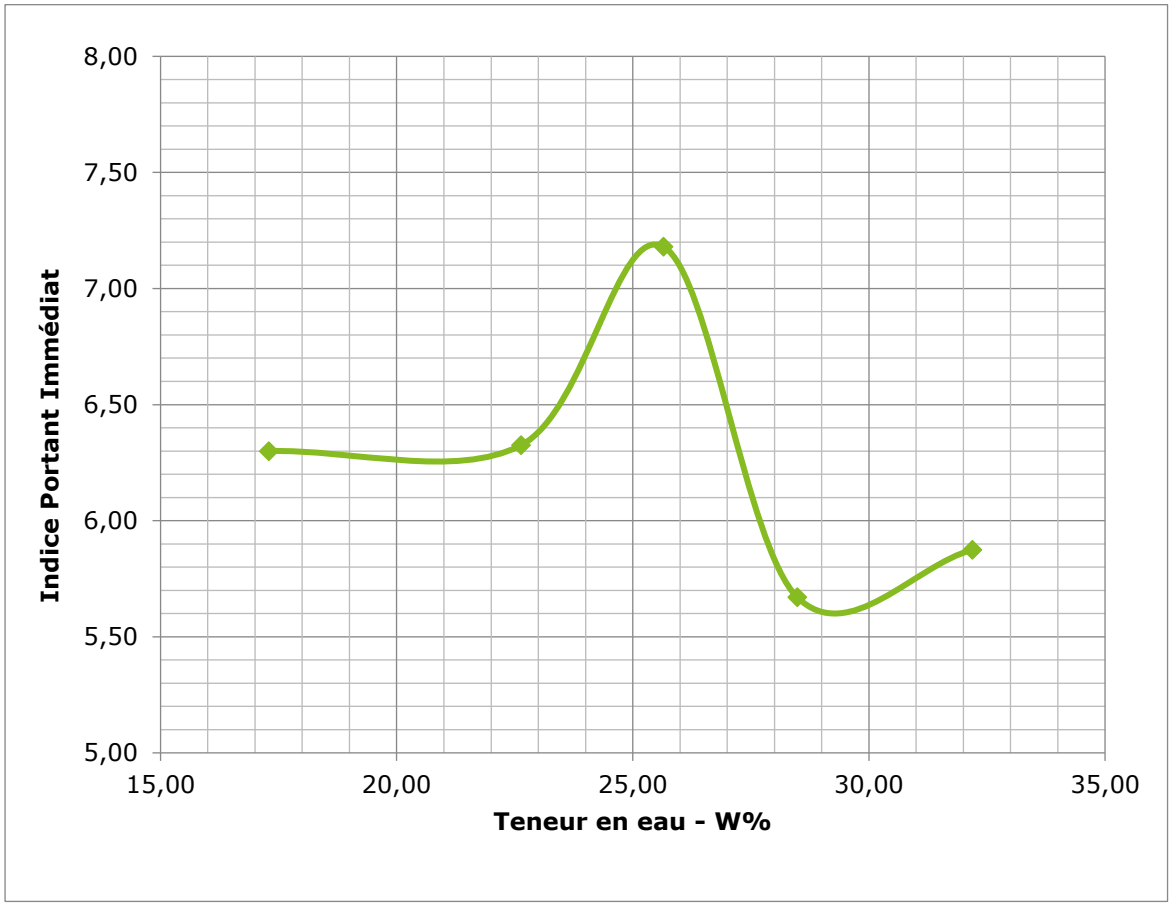


Figure 12 : Résultats de la mesure de l'IPI sur les sédiments bruts de la MEL

CLASSIFICATION DES SEDIMENTS DE LA MEL SELON LE GTR (1992)

Le GTR (1992) définit la classe des matériaux utilisables en remblais et en couches de formes. La classification se fait sur la base de la connaissance des caractéristiques du matériau déjà évoqués dans les paragraphes précédents. La classe d'un matériau est définit selon deux niveaux : 1er niveau : Classement selon la nature ; 2ème niveau : Classement selon l'état hydrique. Selon le premier niveau, les sols peuvent être classés en quatre classes :

- Classe A : sols fins,
- Classe B : sols sableux et graveleux avec fines,
- Classe C : sols comportant des fines et des gros éléments,
- Classe D : sols insensibles à l'eau.

La distinction entre les classes se fait sur la base des trois paramètres suivants : Dmax, tamisât à 80µm et tamisât à 2mm. Chaque classe est subdivisée en plusieurs sous-classes.

Le deuxième niveau de classification concerne la classification selon l'état hydrique. D'après le GTR (1992), la détermination des états hydriques permet de :

- Définir les dosages des produit(s) de traitement à incorporer,
- Contrôler le bon déroulement de la prise et du durcissement,
- Définir les conditions de mise en œuvre du matériau étudié : épandage, malaxage, compactage, etc.

Les matériaux dont la teneur en matières organiques est supérieure à 3% font partie de la classe des sols organiques et des sous-produits industriels. Elle est notée classe F. Neuf familles, notées de F1 à F9, composent cette classe. Chacune est subdivisée en sous-classes. Les matériaux naturels qui renferment des matières organiques font partie de la famille notée F1. Elle est constituée de deux sous-classes : F11 et F12, séparées par une valeur seuil en M.O. de 10%. Ainsi, la sous-classe F11 regroupe les matériaux dont la teneur en M.O. est comprise entre 3 et 10%. La sous-classe F12 désigne ceux dont la fraction organique dépasse le seuil de 10%.

Selon les résultats de la caractérisation (tableau 6), les sédiments MEL sont classés **dans la classe F1** qui contient **les matériaux naturels renfermant des matières organiques** : terres végétales, humus, vases, tourbes…, et qui selon leurs caractéristiques géotechniques de nature peuvent être assimilé **aux sols de la classe A1,** qui contient les sols limoneux peu plastiques, les silts alluvionnaires, etc. et selon leurs caractéristiques hydriques ils sont classés comme **humides (A1h)**. Les détails de la classification des sédiments de la MEL sont présentés dans les figures ci-dessous.

	Sédiment MEL
Teneur en eau initiale (%)	34,97
Masse Volumique absolue (Mg/m3)	2,39
MO 450° (%)	13,15

PAF 55°C	13,82
VBS (g/100gMS)	1,30
D<63µm	31,33
D<80µm	36,26
D10	15,44
D50	46,58
D90	633,24
W_{OPM} (%)	28,40
Masse volumique sèche OPM (Mg/m3)	1,33
IPI	5,80
Classe GTR (1992) - NF P 11 300	F11 ass. A1h

Tableau 7 : Synthèse des résultats de caractérisation des sédiments de la MEL

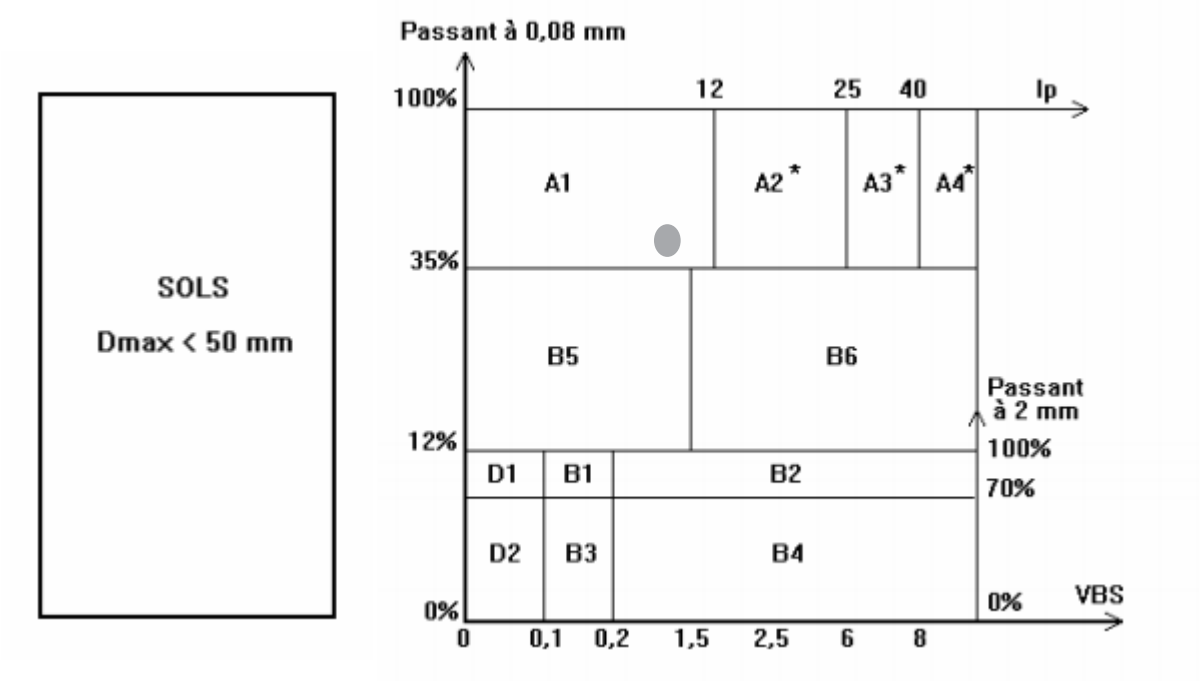


Figure 13 : Classification des sédiments de la MEL selon le GTR (1992)

4.2.2 CARACTERISATION MINERALOGIQUE

DIFFRACTION DES RAYONS X (DRX)

Les mesures par diffraction des rayons X sont réalisées à l'aide d'un appareil de mesure appelé « chambre de diffraction » ou « diffractomètre ». Des rayons X sont envoyés sur un échantillon solide, et lorsque ces rayons rencontrent un cristal, ils sont renvoyés selon une certaine orientation dans l'espace qui est déterminée par la longueur d'onde des rayons X, par les dimensions et par l'orientation du réseau cristallin. Par la suite, un détecteur fait le tour de l'échantillon pour mesurer l'intensité des rayons X selon leur direction. Les rayons X diffusés interférent entre eux, l'intensité présente donc des maximas dans certaines directions. On enregistre alors l'intensité détectée en fonction de l'angle de déviation 2θ du faisceau. Les résultats sont reportés dans des diagrammes de diffraction ou diffractogramme. On compare ensuite ce diffractogramme au catalogue de fiches de références stockées dans la base de données PDF (Powder Diffraction Data). S'il s'agit d'un mélange de produit, il y aura superposition des différentes fiches.

Sur le diffractogramme, le décalage de certains pics peut avoir plusieurs origines :

- Soit la hauteur de l'échantillon n'est pas bonne ;
- Soit le produit n'est pas pur, alors que la fiche correspond à un produit pur.
- La variation de hauteur peut également avoir plusieurs origines :
- L'orientation préférentielle ;
- Les cristallites sont trop gros ;
- La superposition des pics.

La figure ci-dessous présente les résultats de l'analyse DRX réalisée sur les sédiments de la MEL. On peut voir clairement que les phases majoritaires dans nos sédiments sont le quartz (SiO_2) et les carbonates : la calcite ($CaCO_3$) et la dolomite ($CaMg(CO_3)_2$). On constate également la présence feldspaths : l'albite ($NaAlSi_3O_8$) et enfin les argiles : la muscovite. Sur cette figure, la silice amorphe ne semble pas être représentée.

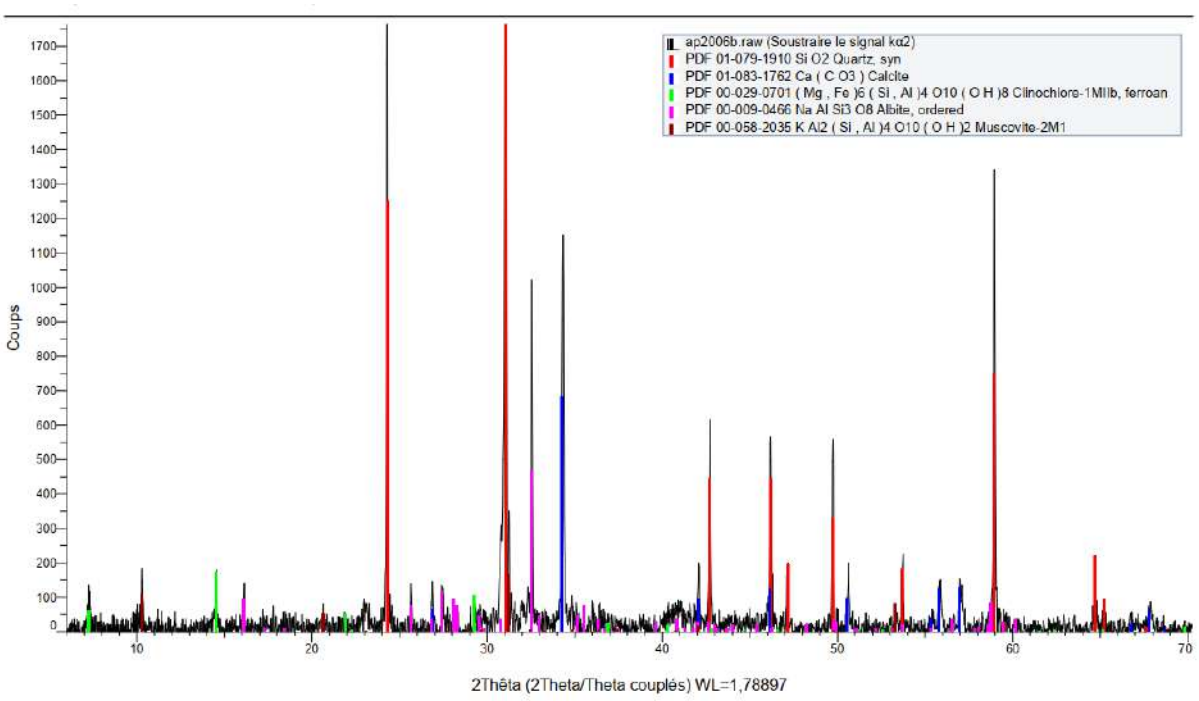


Figure 14 : Analyse DRX des sédiments bruts de la MEL

FLUORESCENCE DES RAYONS X (FX)

La spectrométrie de fluorescence des rayons X est une technique non destructive, permettant l'analyse élémentaire, et ainsi déterminer la quantité d'atomes présents. L'échantillon à analyser peut être un matériau brut, sans préparation au préalable. C'est le cas pour un échantillon solide ayant une tenue mécanique suffisante et les bonnes dimensions. Dans d'autres cas, il doit faire l'objet d'une préparation :

- Poudre obtenue par un broyage,
- Verre obtenu par dissolution du matériau,
- Liquide mis dans une coupe.

Par la suite un échantillon est placé sous un faisceau de rayon X de manière à exciter les atomes qui se trouvent dans l'échantillon. Cette matière réémet de l'énergie sous forme de rayons X qui lui sont propres ou sous forme d'émission secondaire de rayons X. Le spectre des rayons X émis par la matière est caractéristique de chaque élément présent et par conséquent la composition de l'échantillon peut être déterminée. L'intensité et l'énergie de ces rayons X sont ensuite mesurées et représentées dans un diagramme. La hauteur des pics permet de déterminer la quantité de ces éléments. Les résultats des analyses de fluorescence X sont représentés dans le tableau ci-dessous. Les résultats montrent que la silice, l'aluminium et le calcium sont les éléments majoritaires. On constate également la présence de métaux lourds. Ces résultats confirment les observations de l'analyse DRX.

	Bouclage forcé à 100%
Formule du composé	Concentrations
C	présent
O	51,4
Na	0,6
Mg	1,0
Al	5,9
Si	24,8
P	0,4
S	0,5
Cl	traces
K	1,9
Ca	8,9
Ti	0,4
Cr	traces
Mn	traces
Fe	3,7
Cu	traces
Zn	0,1
Rb	traces
Sr	traces
Zr	traces
Ba	traces
Pb	traces

Tableau 8 : Résultats de l'analyse par fluorescence aux rayons X

Les analyses par diffraction des Rayons X (DRX) et par la fluorescence des rayons X (FX) ont été réalisées sur les sédiments de la MEL et ont permis de caractériser les sédiments selon leur composition élémentaire et minéralogique. Ces essais permettent à la fois d'avoir des informations sur les phases cristallines présentent au sein des sédiments, mais également d'avoir une qualification et une quantification des atomes. Si l'on se réfère aux normes relatives aux granulats, les résultats de ces essais peuvent être utiles afin de repérer 4 éléments en particulier :

- les sulfates (FX),
- les chlorures (FX),
- la silice réactive (DRX),
- la dolomite (FX-DRX).

En effet, la présence de ces éléments dans les matrices cimentaires va avoir un effet négatif sur la durabilité des matériaux à matrice cimentaire. A titre d'exemple, la silice réactive, celle-ci est responsable du phénomène d'alcali-réaction. Il s'agit de la réaction entre la silice

réactive contenue dans certains granulats avec les alcalins présents dans la solution interstitielle de la pâte de ciment. Cette réaction entraine la formation d'un gel silico-alcalin qui se manifeste par un gonflement et la fissuration des matériaux formulés. La silice réactive correspond à des minéraux amorphes tels que l'opale et la calcédoine (silex). Pour ce qui est de la dolomite, sa réaction avec les ions hydroxyles associés aux alcalins du ciment provoquent la formation de brucite. Celle-ci s'accompagne également d'un gonflement et de l'endommagement du matériau. On parle ici de réaction alcali-carbonate. Ensuite, la présence de chlorure dans le béton a pour conséquence la corrosion des armatures en acier. Or, dans les poutres de couronnement, un ferraillage est mis en place avant le coulage du béton. Ce paramètre est donc important à prendre en compte. Pour finir, la présence de sulfates dans les granulats peut engendrer une réaction sulfatique. Il s'agit de la réaction entre les sulfates contenus dans les granulats et les aluminates du ciment. Cette réaction entraine la formation d'ettringite. La formation de ce minéral s'accompagne d'un gonflement ce qui, à terme, entraine une fissuration néfaste pour la durabilité des matériaux à matrice cimentaire.

4.2.3 CARACTERISATION ENVIRONNEMENTALE

L'annexe II de l'arrêté du 28 octobre 2010 (remplacé par l'arrêté du 12 décembre 2014) relatif aux Installation de Stockage de Déchets Inertes (ISDI) donne des seuils à ne pas dépasser en contenu total et en éléments relargués par lixiviation ; ces derniers sont récapitulés dans le tableau 5. Lorsque les valeurs limites pour les chlorures, les sulfates ou la fraction soluble sont dépassés dans l'éluât, il est toujours possible d'admettre le déchet en ISDI s'il respecte soit les limites en chlorures et sulfates soit la limite en fraction soluble.

Ces seuils peuvent aussi bénéficier d'une certaine souplesse en vertu de l'article 10 de l'arrêté du 28 octobre 2010 sous condition d'une étude à l'appui, par arrêté préfectoral, le seuil du COT en contenu total peut être multiplié par 2 et les seuils de relargage dans l'éluât (hors COT) peuvent être multipliés par 3. Si la limite d'admission en ISDI est tout de même dépassée pour les sulfates dans l'éluât, il est possible de réaliser l'essai de lixiviation normalisé en percolation ascendante selon la norme NF EN 14405 (2017). Au terme de cet essai, le sédiment peut être admis en ISDI au regard du relargage en sulfate si la teneur en sulfate dans la première fraction (ratio L/S cumulé de 0,1) ne dépasse pas 1500 mg/kg de matière sèche et si la teneur en sulfate totale (ratio L/S cumulé de 10) ne dépasse pas 6000 mg/kg de matière sèche. Si c'est la teneur en COT de l'éluât qui est trop élevée pour que le sédiment soit admis en ISDI, il est possible, lorsque le pH de l'éluât n'est pas compris entre 7,5 et 8, de recommencer le test en fixant le pH. En plus de ces seuils à respecter, il est nécessaire, et ce pour toutes les installations de stockage des déchets, que les sédiments ne présentent pas de radioactivité, qu'ils ne soient pas fermentescibles, qu'ils ne présentent pas de risques infectieux et qu'ils ne soient pas pulvérulents.

Paramètres	Seuils stockage de déchets Inertes (ISDI)*	Seuils stockage de déchets non dangereux (ISDND)**	Seuils stockage de déchets dangereux (ISDD)***	Seuils stockage de sédiment dangereux (ISDS)****
Paramètres physiques				
Siccité	>30%	>30%	>30%	-
Température	< 60°C	< 60°C	< 60°C	-
pH	-	≥ 6	entre 4 et 13	≥ 6
Contenu total				
BTEX	6	-	-	-
HAP	50	-	-	-
HCT	500	2500	50000	-
PCB	1	50	50	-
COT	30 000	50 000	60 000	50 000
Éluat NF EN 12457-2 (2002)				
COT	500	800	1000	800
Fraction soluble globale	4000	60 000	100 000	60 000
As	0,5	2	25	2
Ba	20	100	300	100
Cd	0,04	1	5	1
Cr total	0,5	10	70	10
Cu	2	50	100	25
Hg	0,01	0,2	2	0,2
Mo	0,5	10	30	10
Ni	0,4	10	40	10
Pb	0,5	10	50	10
Sb	0,06	0,7	5	0,7
Se	0,1	0,5	7	0,5
Zn	4	50	200	50
Chlorures	800	15 000	25 000	15 000
Fluorures	10	150	500	150
Sulfates	1000	20 000	50 000	20 000
Indice phénols	1	3	1000	-

*Arrêté du 28 octobre 2010 abrogé et remplacé par l'arrêté du 12 décembre 2014

**Arrêté du 9 septembre 1997 modifié par arrêté du 12 mars 2012, modifié par l'arrêté du 15 février 2016

***Arrêté du 30 décembre 2002 modifié par l'arrêté du 10 octobre 2012

**** Arrêté du 15 février 2016 relatif aux installations de stockage de déchets de sédiments

Tableau 9 : Récapitulatif des différents paramètres à respecter dans le sédiment et dans l'éluât pour chaque installation de stockage envisagée (mg/kg MS)

Les résultats des essais de lixiviations et sur le total des sédiments de la MEL sont présentés dans le tableau ci-dessous. Ces résultats montrent un dépassement de la limite d'acceptation

en ISDI pour les concentrations du COT et du HCT pour la fraction totale et de l'antimoine pour l'analyse sur éluât. D'après ces analyses les sédiments étudiés rentrent dans la classe des déchets non dangereux non inerte, et sont donc admis en ISDND.

Paramètres	Unité	ISDI	*1 MEL*	*2 MEL*	MEL final	*MEL*
			0-20 mm	0-20mm	0-20mm	20- 100mm
matière sèche	% massique	<30	70.9	66.2	66.1	65.7
COT	mg/kg MS	30000	42000	73000	73000	72000
pH (KCl)	-		7.6	7.4	7.4	7.4
température pour mes. pH	°C		19.6	20.2	19.9	19.9
LIXIVIATION						
Lixiviation 24h - NF-EN-12457-2			#	#	#	#
BTEX totaux	mg/kg MS	6	<0.25	<0.25	<0.25	<0.25
Somme des HAP (16) - EPA	mg/kg MS	50	15	32	29	23
PCB totaux (7)	µg/kg MS	1000	18	59	46	37
hydrocarbures totaux C10-C40	mg/kg MS	500	370	880	750	590
LIXIVIATION						
L/S	ml/g		9.99	9.97	9.99	9.98
pH final ap. lix.	-		7.99	7.89	7.98	7.92
température pour mes. pH	°C		20.5	20.5	20.1	20.5
conductivité (25°C) ap. lix.	µS/cm		316	495	404	437
ELUAT COT						
COT	mg/kg MS	500	63	110	94	80
ELUAT METAUX						
antimoine	mg/kg MS	0.06	0.060	0.14	0.14	0.077
arsenic	mg/kg MS	0.5	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
baryum	mg/kg MS	20	0.25	0.38	0.35	0.37
cadmium	mg/kg MS	0.04	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004
chrome	mg/kg MS	0.5	<0.01	<0.01	0.012	<0.01
cuivre	mg/kg MS	2	0.19	0.40	0.40	0.34

mercure	mg/kg MS	0.01	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
plomb	mg/kg MS	0.5	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
molybdène	mg/kg MS	0.5	<0.05	0.059	0.063	0.063
nickel	mg/kg MS	0.4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
sélénium	mg/kg MS	0.1	<0.039	<0.039	<0.039	<0.039
zinc	mg/kg MS	4	<0.2	0.21	0.21	<0.2
ELUAT COMPOSES INORGANIQUES						
fraction soluble	mg/kg MS	4000	1460	3670	2320	2490
ELUAT PHENOLS						
Indice phénol	mg/kg MS	1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
ELUAT DIVERSES ANALYSES CHIMIQUES						
Fluorures	mg/kg MS	10	3.1	2.5	2.8	3.3
Chlorures	mg/kg MS	800	16	36	24	36
Sulfates	mg/kg MS	1000	316	648	554	575

Tableau 10 : Résultats de la caractérisation environnementale des sédiments de la MEL

4.2.4 CONCLUSION DE LA PARTIE IDENTIFICATION ET CARACTERISATION DES SEDIMENTS DE LA MEL

Selon la caractérisation physicochimique et géotechnique les sédiments de la MEL sont des matériaux fins avec une forte teneur en matière organique. Selon la classification GTR, ces derniers rentrent dans la classe la classe F1 qui contient les matériaux naturels renfermant des matières organiques : terres végétales, humus, vases, tourbes…, et qui selon leurs caractéristiques géotechniques de nature peuvent être assimilé aux sols de la classe A1, qui contient les sols limoneux peu plastiques, les silts alluvionnaires, etc. et selon leurs caractéristiques hydriques ils sont classés comme humides (A1h). Selon la classification environnementale les sédiments de la MEL sont classés comme non inerte et non dangereux et donc peuvent être valorisés dans les matériaux de construction par exemple.

5. PHASE 2 : ETUDE DE FORMULATION

Livrable	Rapport de l'étude de formulation de la grave traitée intégrant les sédiments

Le traitement aux liants hydrauliques des matériaux est une technique très répandue pour la réutilisation des matériaux en sous couches routières. Le traitement des matériaux aux liants hydrauliques est complexe et son efficacité dépend, entre autres, de la nature du matériau. Cette technique consiste à incorporer un ou plusieurs éléments qui ont la faculté d'avoir des affinités chimiques avec le matériau, ce qui permet d'obtenir un matériau homogène et stable avec des nouvelles propriétés. La technique de traitement des sols aux liants hydrauliques est basée sur plusieurs mécanismes. Le traitement des sédiments de dragage aux liants hydrauliques permet, en plus de l'amélioration de leurs performances mécaniques, la réduction de leur impact sur l'environnement (Maherzi, 2013 ; Boutouil, 1998).

Cette partie de l'étude a été consacrée à l'optimisation de l'incorporation des sédiments MEL dans une formule de graves routières traités. Le choix des formulations a été dicté par des contraintes économiques et techniques. En effet, les matériaux formulés doivent être conformes aux exigences techniques requises pour une utilisation en couche de forme et en même temps leurs coûts doivent être concurrentiels par rapport aux coûts des matériaux standards habituellement utilisés. Par ailleurs, les études précédentes menées sur la formulation de matériaux à base de sédiments de dragage et de correcteurs granulaires ont permis de mettre en évidence la faisabilité du traitement aux liants hydrauliques pour une application en techniques routières (Colin, 2003 ; Dubois, 2006, Tran, 2009 ; Miraoui, 2010). Dans le cadre de cette étude les essais préconisés pour la formulation de grave routière traitée ont été réalisés afin de s'assurer de la faisabilité de l'incorporation des sédiments dans la formulation. Les essais réalisés dans cette étape sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Essais	Normes – méthodes
Points de fixation de la chaux	Eades et Grim (1966)
Paramètres de densification (W_{OPM}, γ_{OPM})	NF P 94-093
Compacité des mélanges	NF EN 13286-2
Indice portant immédiat et indice CBR après immersion	EN 13286-47
Gonflement linéique après immersion dans l'eau	EN 13286-47
Performances mécaniques (Rc, Rt, Et)	NF EN 13286-41, 42 et 43
Classe mécanique	14227-5

Tableau 11 : Essais de formulation d'une grave routière traitée aux liants hydrauliques

5.1 OPTIMISATION D'UN PRETRAITEMENT A LA CHAUX DES SEDIMENTS

L'influence de la chaux vive sur le pH des sédiments a été étudiée selon la méthode proposée par Eades et Grim (1966). Cette méthode consiste à préparer et de mesurer le pH des mélanges particules solides-chaux mis en suspension dans de l'eau.

Les sédiments ont été humidifiés à une teneur en eau de 20 % et conservés pendant 24 h avant de les traités à la chaux (à différents dosages). Un temps de réaction d'une heure est observé avant que les échantillons ne soient humidifiés une deuxième fois, avec un rapport Eau/Solide égale à 5. Les solutions (chaux + sédiments) ainsi obtenues sont misent en agitation pendant 1h avant de mesurer leurs pH à l'aide d'un pH mètre (figure ci-dessous). La mesure du pH a été réalisée selon la norme NF ISO 10390.

Figure 15 : Préparation des sédiments pour l'essai de points de fixation de la chaux

L'évolution du pH en fonction du dosage de chaux est représentée sur la figure ci-dessous. Il a été observé qu'entre les dosages 1 et 2 % de chaux une évolution rapide du pH. Au-delà de 2% de chaux le pH se stabilise à une valeur de 12,4. Ceci est expliqué par le fait qu'une quantité de chaux a été consommée pour la floculation des argiles et une autre partie a réagi avec les matières organiques, plus précisément avec les acides humiques, pour former des humâtes de calcium. De ce fait, avant incorporation dans les formulations de la grave routière traitée, un prétraitement avec **2 % de chaux vive** sera appliqué aux sédiments MEL.

Pour la suite de l'étude de formulation les sédiments utilisés ont été prétraités avec 2 % de chaux vive au moins une heure avant leur incorporation dans les formules de graves traités.

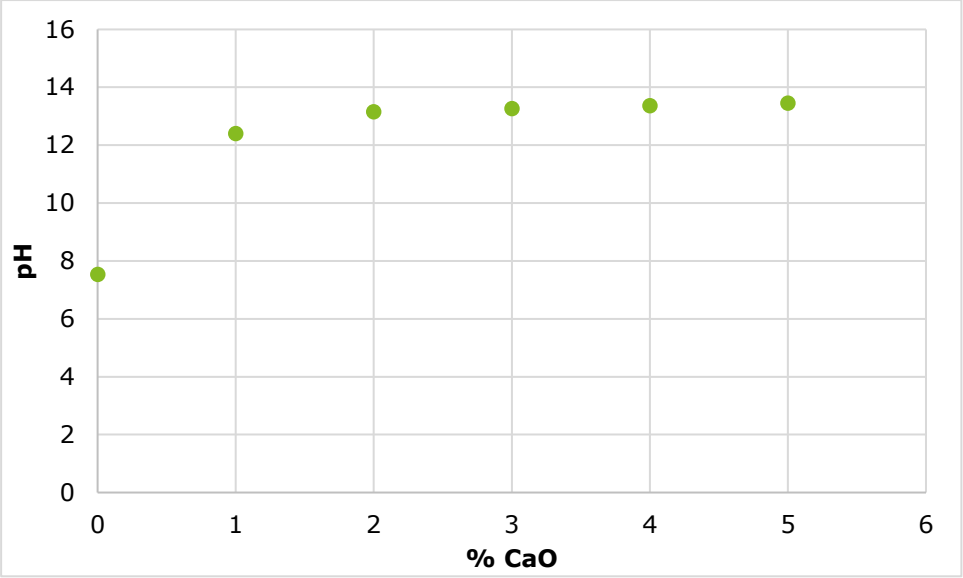


Figure 16 : Résultats de l'essai de point de fixation de la chaux réalisé sur les sédiments MEL

5.2 MATERIAUX ET FORMULATION TEMOIN DE LA GRAVE ROUTIERE TRAITEE

5.2.1 3.1. GRANULATS

Les granulats utilisés dans cette étude proviennent d'une carrière belge, pas très loin des frontières françaises et qui sont largement utilisé dans la région Hauts de France et autour de l'agglomération lilloise. Ces granulats sont des granulats concassés et de nature calcaire. Deux classes granulaires ont été utilisées dans le mélange, à savoir, un sable 0-5.6mm et un gravier 6-20mm. La composition granulaire de la grave routière est représentée dans le tableau ci- dessous. La distribution granulométrique de la grave routière est représentée dans la figure 13. Il apparait clairement que la distribution granulométrique de la grave respecte les critères du fuseau de référence TFT. Les fiches techniques de la grave routière sont annexées à la fin de ce rapport d'étude.

Composants	Pourcentage
Gravier calcaire 6-20 mm	48.00%
Sable calcaire 0-5.6 mm	49.00%
Liant routier ROC AS	3.0%

Tableau 12 : Composition de la grave routière utilisée dans l'étude

5.2.2 LIANTS HYDRAULIQUES

Afin de voir l'impact du type de traitement sur les formulations de graves à base de sédiments, dans cette étude deux types de traitement ont été utilisé :

- Traitement aux liants hydrauliques routiers type ROC AS,
- Traitement mixte aux laitiers et cendres volantes.

Les caractéristiques des différents matériaux de traitements sont présentées dans les fiches techniques annexées à la fin de ce rapport.

Les dosages utilisés de liants hydrauliques varient entre 3 et 8 %.

5.3 OPTIMISATION DU SQUELETTE GRANULAIRE D'UNE GRAVE ROUTIERE A BASE DE SEDIMENTS MEL

Le squelette granulaire de la grave routière à base de sédiments a été optimisé en utilisant les courbes de références appelées aussi les courbes de Talbot-Fuller-Thomson (TFT). Cette méthode permet de vérifier l'étalement des courbes granulométriques des mélanges étudiés. Des courbes granulométriques théoriques ont été tracées en utilisant la formule de TFT (Equation 1). Ces courbes sont obtenues pour des valeurs de n de 0,25 et 0,45. Elles définissent ainsi un fuseau optimal des courbes granulométriques. Cela représente une approximation de la courbe granulométrique idéale.

$$P = \left[\frac{d}{D}\right]^n \times 100 \qquad \text{Équation 1}$$

Avec

D: le diamètre maximal pris égal à 2 mm,

d : grosseur des tamis (mm),

P : pourcentage passant (%) des particules selon le tamis de grosseur d

Les résultats obtenus montrent que l'augmentation du taux d'incorporation des sédiments dans le mélange donne des distributions granulométriques qui sortent et s'éloignent du fuseau optimal de Talbot-Fuller-Thomson. Afin de respecter au mieux les critères techniques de valorisation des sédiments de dragage, des taux d'incorporation de **10 et 20 % des sédiments MEL** a été retenu pour la suite de l'étude.

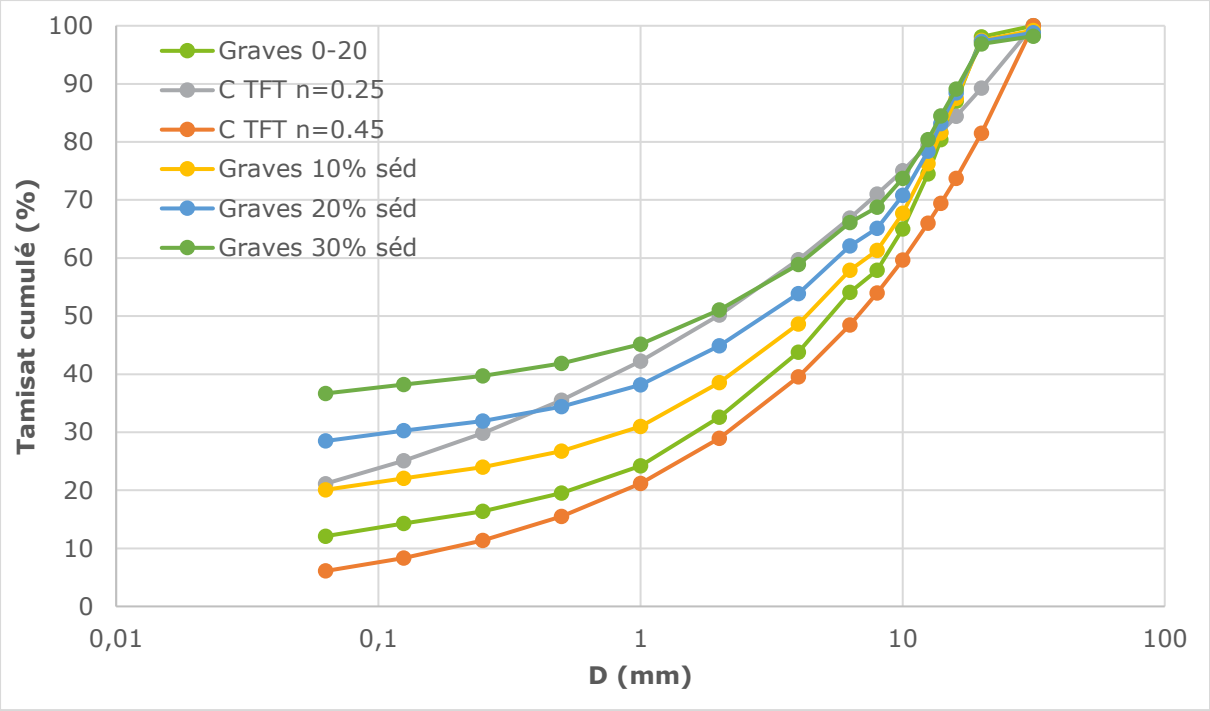


Figure 17 : Courbe granulométrique de la grave routière - fuseau optimal de Talbot-Fuller-Thomson

5.4 FORMULATION ET TRAITEMENT DES MATERIAUX ROUTIERS A BASE DE SEDIMENTS

Selon leur composition, les liants peuvent être classés en deux familles : les liants minéraux (les liants aériens et les liants hydrauliques) et les liants organiques (les liants hydrocarbonés et les résines). Le ciment, la chaux, les laitiers de haut fourneau et les cendres volantes sont des liants minéraux couramment utilisés pour le traitement des sols.

Le traitement des sols au liant hydraulique provoque des réactions, appelées réactions d'hydratation. Deux types d'oxydes qui composent le liant hydraulique jouent un rôle important dans l'hydratation et l'augmentation des résistances : les silicates di calciques et tricalciques (C_2S et C_3S) et les aluminates tricalciques (C_3A). Les réactions d'hydratation permettent la formation d'hydrates cimentaires qui entourent les particules solides. En effet, l'hydratation du liant engendre la formation de silicates de calcium hydratés (C-S-H), de portlandite (C-H), d'aluminates de calcium hydratés (C-A-H), de trisulfoaluminate de calcium hydraté ou ettringite primaire (C_3A, $3CaSO_4$, $32H_2O$), de monosulfoaluminate de calcium hydraté ou ettringite secondaire (C_3A, $CaSO_4$, $12H_2O$).

Le processus de traitement des sols à la chaux repose sur plusieurs réactions :

Echange cationique : dans un sol, la fraction argileuse et les matières organiques ont la faculté de pouvoir échanger une partie de leurs cations constitutifs et de fixer l'ion calcium. D'autre part, l'hydratation de la chaux entraîne une augmentation de la présence des cations de calcium (Ca^{2+}) et d'hydroxyle (OH-). Cela entraîne des échanges cationiques qui se produisent entre les charges de surface des particules argileuses et les cations apportés par

l'hydratation de la chaux. La capacité d'échange cationique (CEC) est alors modifiée ainsi que la concentration des électrolytes. Cela induit des forces attractives entre les feuillets d'argiles et permet de réduire la double couche des particules argileuses. Cela signifie que l'espace disponible initialement entre les feuillets d'argile et l'eau diffuse est réduit. Les particules d'argiles s'agrègent et floculent. Ce phénomène provoque un changement de la texture de la fraction argileuse.

Réaction pouzzolanique : elle se produit entre les cations Ca^{2+} en excès et les feuillets tétraédriques et octaédriques des argiles. En effet, la dissolution de la chaux dans l'eau permet la saturation du milieu en Ca^{2+} et neutralise l'acidité du milieu. En milieu basique et en présence des cations Ca^{2+}, les particules d'argile libèrent l'alumine et la silice. Des réactions d'hydratation se produisent permettant la formation de nouveaux hydrates calciques (C-S-H, C-A-H). Cette réaction est conditionnée par plusieurs paramètres dont la nature des minéraux argileux

Le tableau ci-dessous présente les différentes formulations testées dans le cadre de cette étude. Au total sept formulations ont été testées. Elles sont référencées FGT de 1 à 7. Des formulations contenant 10 et 20% de sédiments ont été traitées avec 3, 4 et 5% de ROCAS et avec 3 et 5% de laitiers de haut fourneau associé à des cendres volantes (2 et 3%).

	FGT1	FGT2	FGT3	FGT4	FGT5	FGT6	FGT7
	10SED3LHF3CVF	20SED3LHF2CVF	20SED3LHF3CVF	10SED1CaO3ROCAS	20SED1CaO4ROCAS	20SED1CaO5ROCAS	20SED5LHF3CVF
Sable 0/5,6 (%)	42,73	38,39	37,99	43,65	38,39	37,99	36,80
Graviers 6/20 (%)	46,52	47,01	46,52	47,50	47,01	46,52	46,00
Sédiments MEL (%)	4,75	9,60	9,49	4,85	9,60	9,49	9,20
CV F (%)	3,00	2,00	3,00	0,00	0,00	0,00	3,00
LHF (%)	3,00	3,00	3,00	0,00	0,00	0,00	5,00
ROC AS (%)	0,00	0,00	0,00	3,00	4,00	5,00	0,00
CaO (%)	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,00

Tableau 13 : Formulations testées dans le cadre de l'étude

5.5 PARAMETRES DE COMPACTAGE

5.5.1 RESULTATS DES ESSAIS PROCTOR MODIFIE ET IPI

L'identification des paramètres de densification ont été réalisés conformément à la norme NF EN 14227 spécifique pour la formulation des graves traités au LHR. Les essais de compactage ont été réalisé dans des moules CBR avec une énergie de compactage modifié. Les différentes étapes de préparation et de compactage sont représentées dans la figure ci-dessous

Figure 18 : Essais de compactage et de l'IPI sur la grave routière à base de sédiments

Les résultats des essais de compactage sont présentés dans le tableau ci-dessous. Les masses volumiques sèches varient entre 2,2 et 2,3 Mg/m^3 et l'IPI entre 27 et 65. Les formulations traités aux LHR ROC AS (FGT 4 à 6) présentent les meilleures performances comparées formulations traités au LHF et CV (FGT 1 à 3 et FGT 7). Ceci peut être expliqué par le fait que le LHR ROC AS réagi au très jeune âge pour former des produits d'hydratation, qui jouent un rôle important dans la solidification du matériau, car il contient du clinker. À l'inverse du LHF et les CV qui leur réaction intervient plus tard dans le temps et c'est ce qu'on identifie comme les réactions pouzzolaniques.

	FGT 1	FGT 2	FGT 3	FGT 4	FGT 5	FGT 6	FGT 7
W_{OPM} (%)	7,6	6,2	6,2	6,5	6,2	6,1	6,6
MV sèche (Mg/m^3)	2,26	2,29	2,31	2,25	2,27	2,3	2,255
Compacité	80,81%	81,19%	81,04%	80,45%	80,48%	80,69%	84,88%
IPI	27	27	49	32	65	65	52

Tableau 14 : Synthèse des résultats des essais Proctor et IPI des différentes formules

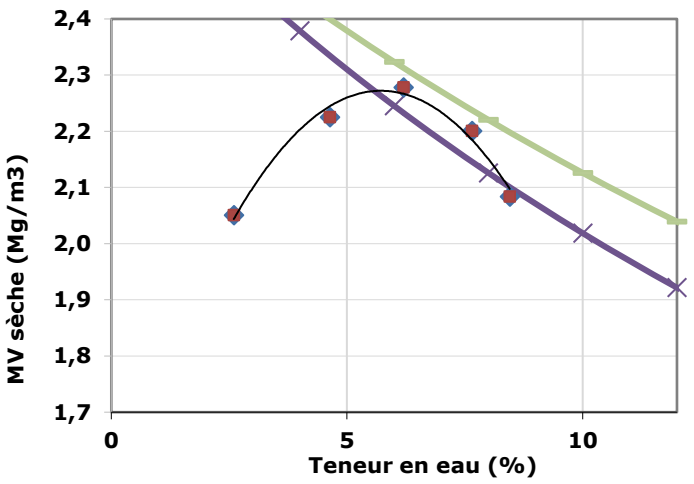


Figure 19 : Courbe Proctor de la formulation FGT5

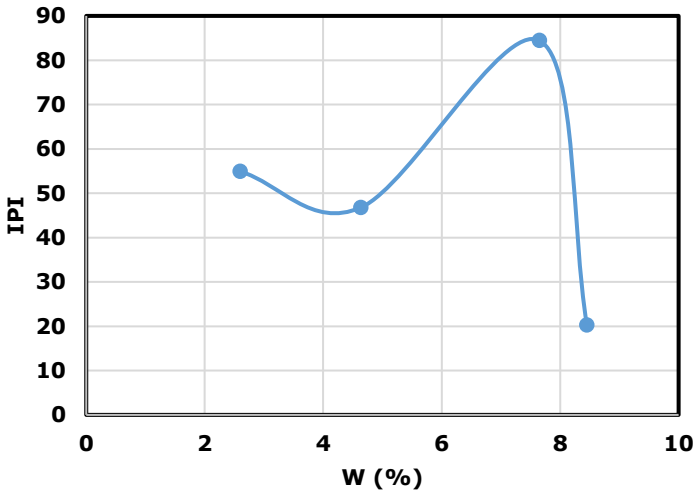


Figure 20 : Courbe de mesure de l'indice Portant Immédiat IPI de la formulation FGT5

5.5.2 MESURE DU GONFLEMENT LINEAIRE DES MATERIAUX FORMULES

Les essais de mesure du gonflement linéaire ont été réalisé sur des échantillons de graves traités compactés dans des moules CBR. Les différents échantillons sont immergés pendant 4 jours (figure 18). Des mesures de gonflement linéaires sont relevées des comparateurs placés au droit de chaque moule à 24, 48 72 et 96 h. Les résultats des mesures sont présentés dans le tableau 12. L'ensemble des formulations testées présentes de bonnes résistances à l'immersion. Les formulations traitées avec le ROC AS présentent les meilleures performances. Ceci s'explique par le fait que le liant ROC AS est composé en partie de clinker, qui réagit au très jeune âge plus rapidement que les laitiers associés aux cendres volantes.

Mesures (mm)	FGT 1	FGT 2	FGT 3	FGT 4	FGT 5	FGT 6	FGT 7
24 h	0.5	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5
48 h	1.0	2.0	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5
72 h	1.3	2.1	1.1	1.0	0.6	0.6	1.1
96 h	1.3	2.2	1.1	1.4	0.6	0.6	1.3

Tableau 15 : Résultats des essais de mesure des gonflements linéaires

Figure 21 : Essais de mesure du gonflement linéaire des différentes formulations

5.6 SUIVI DES PERFORMANCES MECANIQUES DE LA FORMULATION FGT 5

Les essais mécaniques ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques de dimension 100x200 mm, préparées par vibro-compression, conformément à la norme NF EN 13286-52. Les éprouvettes ainsi confectionnées ont été conservées dans des étuis hermétiques et dans des conditions hygrothermiques contrôlées (T°=20C et HR= 90%), jusqu'à l'échéance des essais mécaniques. La figure ci-dessous présente les types d'essai réalisés.

Figure 22 : Essais de traction indirecte et de compression simple des graves routières traités

5.6.1 RESISTANCES A LA COMPRESSION SIMPLE DES GRAVES ROUTIERES TRAITEES

Les résultats des résistances à la compression sont présentés dans la figure ci-dessous. Les résistances à la compression simple ont été mesurées à 28, 60 et 90 jours de cure normale. Le seuil de 1 MPa est atteint à l'échéance de 28 jours.

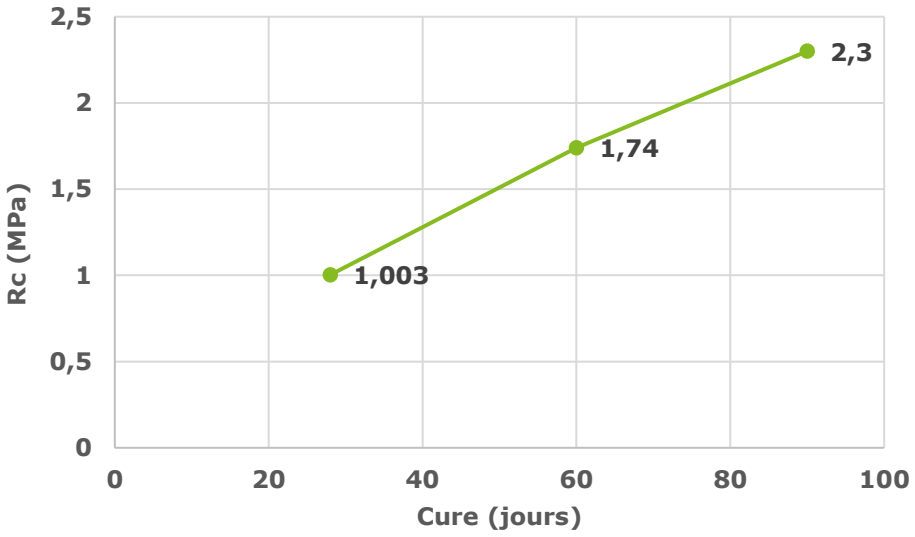


Figure 23 : Résultats des mesures de la résistance à la compression

La mesure de la résistance à la compression permet de s'assurer que le matériau formulé résiste au trafic direct de chantier. Le tableau ci-dessous récapitule les résistances à satisfaire en fonction du nombre de poids lourds cumulés par sens.

Résistance à la compression	PL cumulés par sens
Rc> 1,0 MPa	20
Rc> 1,2 MPa	20 à 500
Rc> 1,5 MPa	Supérieur à 500

Tableau 16 : Rc minimale pour une résistance au trafic direct de chantier

5.6.2 RESISTANCE A LA TRACTION INDIRECTE ET MODULE DE RIGIDITE

Les résultats de mesures de l'indice de rigidité et de la résistance à la traction indirecte sont présentés dans le tableau ci-dessous. La résistance à la traction dépasse le seuil de 0,25 MPa à l'échéance de 60 jours. Ceci indique que les matériaux **formulés résisteront à l'action du gel à 60 jours après leur mise en place sur chantier.** Ces résultats restent inférieurs aux résultats de la GTLH sans sédiments (R_{it}=0,9 MPa), mais ils répondent aux exigences pour une application en sous couches routières.

Age (jours)	Rit (MPa)
28	0,17
60	0,54
90	0,85

Tableau 17 : Résistance à la traction indirecte des graves traités aux LHR

L'évaluation de l'insensibilité à l'eau du matériau consiste à comparer les résistances obtenues à 60 jours sur des éprouvettes ayant subies deux modes de cure distincts. Une première série d'éprouvettes, conservée normalement en étuis hermétiques pendant 60 jours, constitue, après écrasement, la RC60. La seconde série, après 28 jours de cure normale, est immergée dans de l'eau à 20 °C pendant 32 jours et donne, après écrasement, la RCi60. Le rapport RCi60/RC60 permet alors de juger l'insensibilité à l'eau du matériau traité. Elle est satisfaisante si :

Rci60/Rc60>0,80 lorsque la VBS du sol est < 0,5

Rci60/Rc60>0,70 lorsque la VBS du sol est > 0,5

D'après les résultats de mesure des résistances à la compression en cure normal et en cure mixte (normal-eau), le rapport entre les deux mesures est très proche de la limite de 0,7. La grave routière peut être classée comme insensible à l'eau (**Rci60/Rc60=0,38/0,54=0,704 > 0,7**)

5.6.3 CLASSE MECANIQUE DE LA GRAVE TRAITEE AUX LHR, A BASE DE SEDIMENTS

La classification mécanique des mélanges traités selon un abaque de référence où les valeurs de la résistance à la traction et le module de rigidité estimés à 360 jours de cure sont représentés. La formule permettant d'estimer la résistance à la traction directe et le module de rigidité à 360 jours sont ci-dessous

$$\frac{Rt60}{Rt360} = 0.65 \qquad \text{Équation 2}$$

$$\frac{Et60}{Et360} = 0.7 \qquad \text{Équation 3}$$

Dans le cadre de l'étude des performances de la GTLH, les résultats d'estimation de la résistance à la traction et le module de rigidité à moyens et à long terme sont présentés dans le tableau ci-dessous. D'après ces résultats et l'abaque de classification mécanique de la norme 14227-5, la GTLH à base de sédiments être classée à terme en T2 (figure ci-dessous).

Echéance (jours)	Rt (MPa)	Et (GPa)
60	0,432	12,59
360	0,660	17,99

Tableau 18 : Classification mécanique des GTLH à base de sédiments à 360 jours

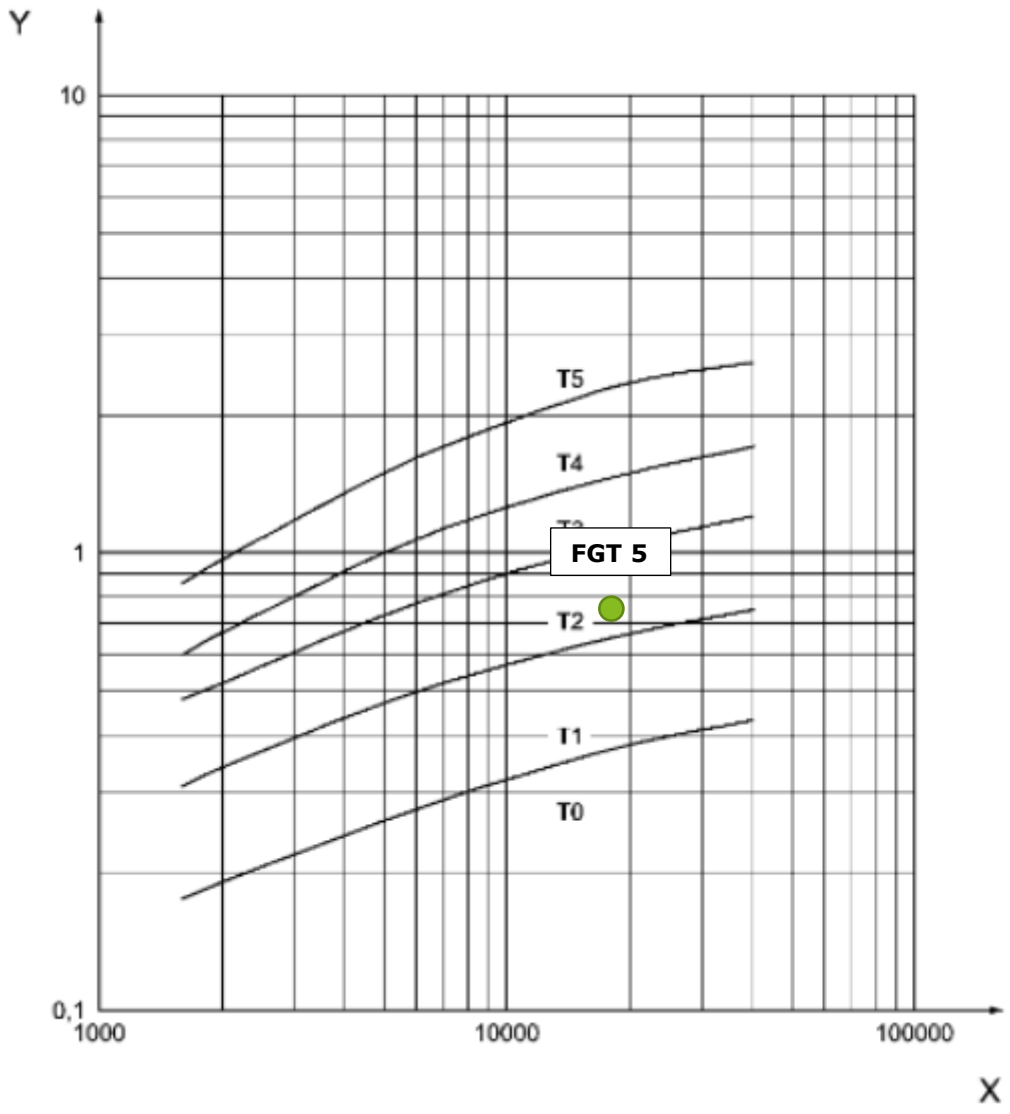


Figure 24 : Classe mécanique de la grave routière à base de sédiments de la MEL

5.7 CONCLUSION

Dans ce rapport nous avons présentés les résultats de caractérisation des sédiments bruts et l'optimisation des formulations de GTLH à base de sédiments.

D'après l'étude de caractérisation minéralogique, physique et mécanique des sédiments de dragage de la MEL, il s'avère qu'on est en présence de matériaux très fins avec une fraction organique forte (MO>10%). Ceci contribue à augmenter leur sensibilité à l'eau, et c'est qui a été confirmé par les mesures des limites d'Atterberg et la VBs. D'un point de vue environnemental les sédiments de la MEL sont classés comme déchets non inertes et non dangereux. Ces résultats confirment les résultats des précédentes études menées sur les sédiments d'une manière générale. Selon les critères de base du GTS (2000) leur utilisation à l'état brut parait impossible. Une correction granulométrique et/ou un traitement au liant hydraulique doit être préconisé. La première phase de caractérisation était nécessaire afin de comprendre et d'expliquer les résultats vis-à-vis d'un éventuel traitement aux liants hydrauliques et/ou correcteur granulométrique.

Dans la deuxième partie de cette étude nous nous sommes intéressés à l'incorporation des sédiments dans la formulation d'une GTLH. Plusieurs formulations ont été testées afin d'optimiser le taux de sédiments et le type et le pourcentage de LHR. Le taux d'incorporation des sédiments retenus était de 20%. Les résultats de l'étude de formulation de GTLH ont permis de valider et classer cette dernière en T2.

6. PHASE 3 : PILOTES EXPERIMENTAUX POUR L'APPLICATION « GRAVE TRAITEE »

Livrables	Rapport et plan de la conception des pilotes expérimentaux Rapport du protocole et du suivi environnemental et mécanique Fiches « Pilotes expérimentaux »

6.1 REALISATION DES PILOTES EXPERIMENTAUX

L'objectif des pilotes expérimentaux est de simuler d'une part le relargage de substances chimiques tout en s'affranchissant de l'effet d'échelle qui peut être occasionné lors de la réalisation d'essais à des échelles plus réduites (essai sur planches expérimentale à échelle laboratoire).

Les pilotes expérimentaux permettront ainsi de vérifier l'innocuité environnementale des ouvrages. Ces derniers seront soumis aux conditions d'exposition réelles locales (en termes d'ensoleillement et de pluviométrie).

Les pilotes expérimentaux sont instrumentés de sorte à collecter les eaux, qui seront dans un second temps analysé au regard des référentiels existants. A minima, les éléments traces métalliques ainsi que les polluants organiques réglementés seront analysés sur les eaux des pilotes expérimentaux.

La réalisation des pilotes devra prévoir les suivis sur la formulation témoin et sur la formulation à base des sédiments validée en phase laboratoire.

La conception du pilote sera inspirée des guides de l'évaluation environnementale pour une acceptabilité des matériaux alternatifs.

6.1.1 EMPLACEMENT

Les pilotes expérimentaux permettant de simuler une application grave traitée sont localisés à Houplines. Ci-dessous une photographie des pilotes expérimentaux.

Figure 25 : Localisation des pilotes expérimentaux "graves traitées" à Houplines

Des pilotes expérimentaux, au nombre de deux, ont été réalisés. Les formulations sont reprises dans le Tableau 19.

Pilote dit "témoin" Formulation Classique	Pilote dit "expérimental" Formulation avec sédiments
Sable 48 % Gravier 47 % Liant 4 % Chaux 1 %	Sable 38 % Gravier 47 % Liant 4% Sédiment 10 % Chaux 1 %

Tableau 19 : Formulations des pilotes expérimentaux

6.1.2 EQUIPEMENT / DIMENSIONNEMENT

La conception du pilote sera inspirée des Guides du Cerema sur *l'Evaluation environnementale pour une acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière*.

Les pilotes expérimentaux ont été installés sur une surface plane et présentent pour équipements les éléments suivants :

Fonction	Equipment
Structure	Structure carrée en béton
Pente	Renformis donnant la pente à 2 %
Etanchéité	Protection anti-poinçonnement
Prélèvement	Tuyaux perforés en fond de pilote relié à un fût
Eau de process	Eau de pluie

Tableau 20 : Equipement des pilotes expérimentaux - application "graves traitées"

Les diverses couches de matériaux seront effectuées de manière à obtenir une succession de couche proche de la structure routière habituellement réalisé. La couche étudiée lors du projet pourra s'apparenter à la couche d'assise (cf. Figure 26).

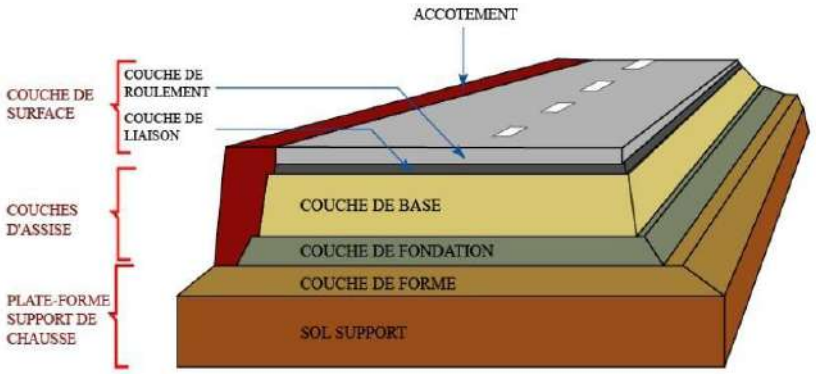


Figure 26 : Structure d'une voirie

Les pilotes expérimentaux, au nombre de deux, font 4 m² chacun.

	Dimensions	
Structure en béton	Longueur : 2400 mm Largeur : 2000 mm Hauteur : 700 mm	Déposé sur une surface horizontale et plane.
Rebord en béton	60 mm	Permet de stocker l'eau dans la structure et de ce fait de se mettre dans le cas le plus défavorable.
Fûts	30 L	Bac en PVC.
Renformis donnant la pente	2 %	Permet la récupération les eaux du suivi.
Couche de forme	Epaisseur : 10 cm	Couche drainante.
Couche d'assise	Epaisseur : 27 cm	Formulation classique de graves traitées aux liants hydrauliques.
		Formulation expérimentale de graves traitées aux liants hydrauliques à base de sédiments.
Couche de roulement	Epaisseur : 6 cm	Pavés béton espacés.

Tableau 21 : Dimensions des pilotes expérimentaux - application "graves traitées"

6.1.3 MODELISATION 3D

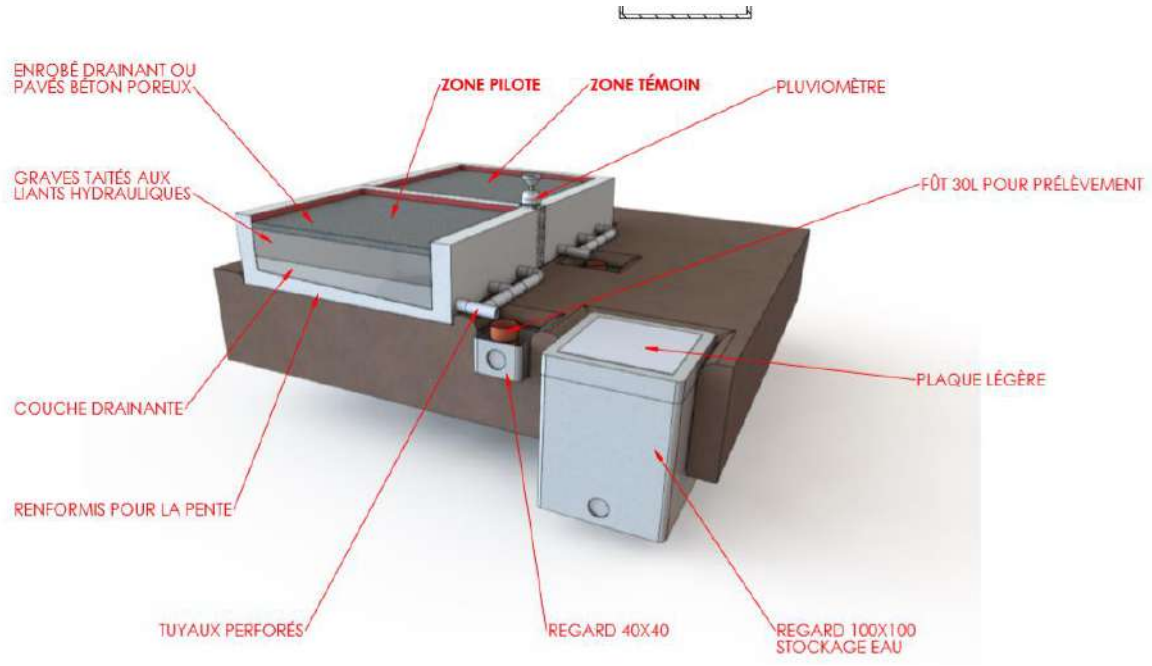


Figure 27 : Dimensions de la structure des pilotes expérimentaux - application "graves traitées"

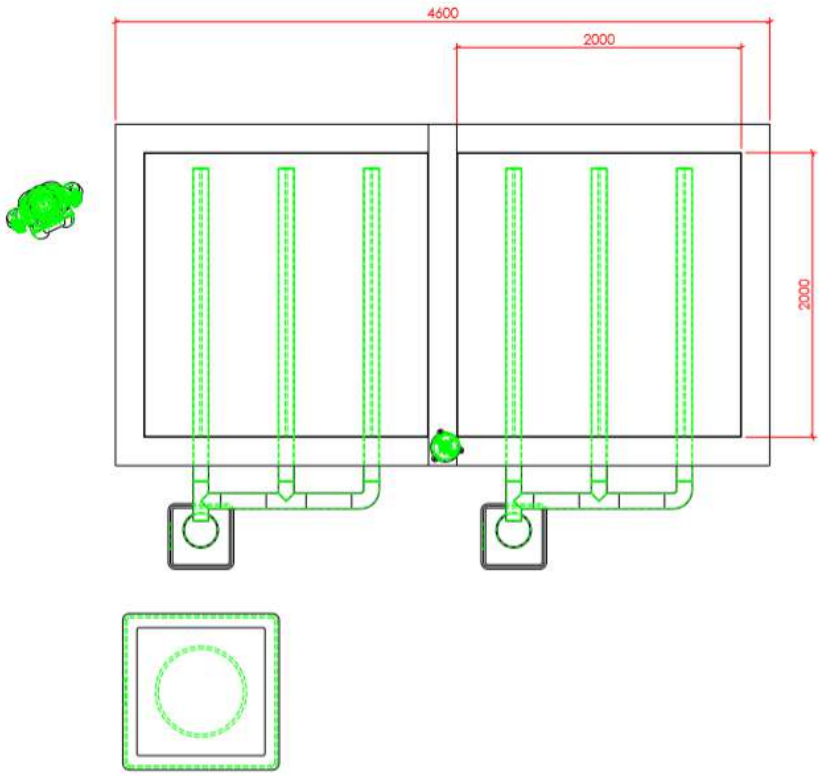


Figure 28 : Application "graves traitées" - Plan des pilotes expérimentaux (du dessus)

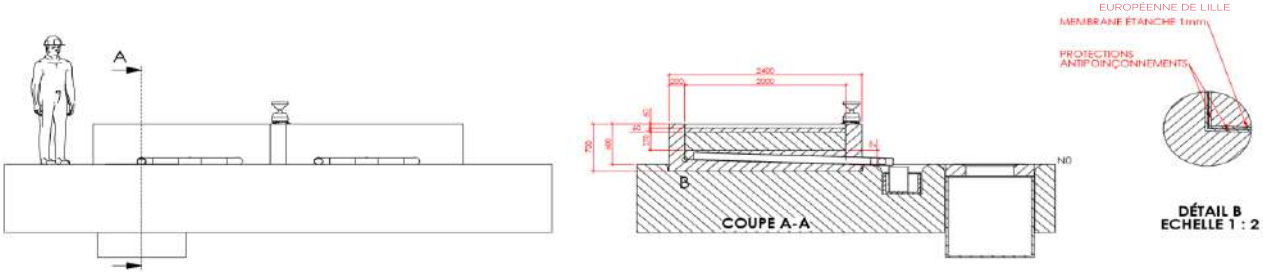


Figure 29 : Application "graves traitées" - Plan des pilotes expérimentaux (coupe)

6.1.4 CONSTRUCTION DES PILOTES EXPERIMENTAUX

Construction de la structure béton

Installation des géomembranes et des tubes perforés

Mise en place de la grave traitée à base de sédiments

Mise en place du sable

Installation des pavés

Figure 30 : Photographies de la réalisation des pilotes expérimentaux à Houplines

6.2 SUIVIS DES PILOTES EXPERIMENTAUX

6.2.1 PROTOCOLE DU SUIVI ENVIRONNEMENTAL

Les eaux collectées des pilotes seront analysées au regard des référentiels existants utilisés lors de la phase laboratoire.

Tout comme les ouvrages expérimentaux, le programme analytique pour le suivi environnemental sera le même que celui de la phase des planches expérimentales (phase laboratoire SEDIMATERIAUX réaliser entre 2013 et 2015).

CONDITION D'EXPOSITION

Dans le cas étudié, les pilotes expérimentaux seront soumis à des conditions d'exposition réelles d'extérieur. Au cours du suivi, les ouvrages seront donc soumis aux conditions d'ensoleillement et de pluviométrie.

PRISE D'ECHANTILLON

Les eaux de suivi sont prélevées à chaque manipulation et analysées dans un second temps. Les prélèvements sont réalisés directement dans les fûts, conformément à la *norme AFNOR ISO 5667-6 « Guide de prélèvement des rivières et cours d'eau »* qui précise les techniques d'échantillonnage et la manipulation des échantillons d'eaux superficielles (en rivières et cours d'eau).

Les prélèvements seront réalisés dans les flaconnages préconisés par la *norme NF EN ISO 5667-3* et en accord avec les procédures établies par le laboratoire d'analyses. Les flaconnages seront rincés plusieurs fois avec l'eau à prélever avant prélèvement, sauf dans le cas de flaconnages contenant un stabilisant (spécifié par le laboratoire sur le flacon).

Conformément à la norme, il conviendra de s'affranchir d'une contamination de l'échantillon : lors du prélèvement, les dépôts inférieurs ne doivent pas être remis en suspension et en cas de présence de matières en suspension (MES) à la surface de l'eau, celles-ci ne doivent pas être prélevées.

Les échantillons seront conservés dans un ensemble de flacons conformes aux préconisations de la *norme NF EN ISO5667-3*, appropriés aux analyses envisagées et fournis par le laboratoire. Les échantillons seront acheminés en glacière (5°c +/- 3) vers le laboratoire en charge des essais. Les analyses effectuées sur les différentes eaux ont permis de vérifier l'innocuité environnementale grâce à la comparaison des résultats du pilote témoin et ceux du pilote expérimental.

Lors de ces prélèvements, les mesures du pH, de la conductivité et de la température ont été prises.

ECHEANCE DE PRELEVEMENT

A l'issue de la mise en place des ouvrages expérimentaux, le suivi environnemental sera réalisé sur une **durée de 1 an**.

Les échéances de mesures ont été choisies selon la *norme américaine EPA METHOD 1315.* Ces dernières sont les suivantes :

- 1 mesure **semaine 1** ;
- 1 mesure **semaine 2** (reportée au 06/10/2020) ;
- 1 mesure **semaine 3** ;
- 1 mesure **semaine 4** ;
- 1 mesure **semaine 6** ;
- 1 mesure **semaine 8** ;
- 1 mesure **semaine 12** ;
- 1 mesure **semaine 26** ;
- 1 mesure **semaine 39** ;
- 1 mesure **semaine 45** (en remplacement de la semaine 2) ;
- 1 mesure **semaine 52.**

Un prélèvement devait initialement être réalisé la semaine 2 (10/12/2019). En raison d'un manque de matériel ce jour-ci (absence de détecteur multi-gaz), ce dernier n'a pas été réalisé. Ainsi, une date a été rajoutée (le 06/10/2020) en semaine 45, en remplacement du prélèvement de la semaine 2.

PROGRAMME ANALYTIQUE

On propose de choisir les analyses à réaliser conformément à la phase laboratoire et pour une évaluation en fonction des valeurs de références SEQ (Système d'Evaluation de la Qualité) EAU et NQE – Seuils Très bon état écologique.

Nous proposons donc le suivi des paramètres suivants :

- métaux : antimoine, arsenic, baryum, cadmium, chrome, cuivre, mercure, plomb, molybdène, nickel, sélénium et zinc ;
- *pack des 16 HAP* : naphtalène, acénaphtylène, acénaphtène, fluorène, phénanthrène, anthracène, fluoranthène, pyrène, benzo(a)anthracène, chrysène, benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, benzo(a)pyrène, dibenzo(ah)anthracène, benzo(ghi)pérylène, indéno(1, 2, 3 – cd)pyrène ;
- *pack de 7 PCB* : PCB 28, PCB 52, PCB 101, PCB 118, PCB 138, PCB 153, PCB 180 ;
- anions : fluorures, chlorures, sulfates ;
- DBO5 ;
- DCO ;
- MES ;
- COT.

6.2.2 RESULTAT DU SUIVI ENVIRONNEMENTAL

Figure 31 : Photographie du prélèvement sur le site de Houplines

RESULTATS DE LA CONDUCTIVITE, DU PH, DE LA TEMPERATURE

N° Semaine	Date de prélèvement	Cond. (mS)		pH		Temp. (°C)	
		Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp
Semaine 1	04/12/2019	4,21	6,95	12,45	12,62	2,2	2,8
Semaine 2 Pas de détecteur	10/12/2019	*Report au 06/10/2020*					
Semaine 3	17/12/2019	1,797	4,65	11,76	11,81	9,5	10,7
Semaine 4	24/12/2019	1,274	3,75	12,54	12,87	8,4	7,7
Semaine 6	07/01/2020	1,176	4,31	12,34	12,68	5,3	6,4
Semaine 8	21/01/2020	1,433	3,61	10,72	7,98	3,8	3,1
Semaine 12	18/02/2020	0,715	2,18	12,1	12,5	7,8	7,9
Semaine 26	26/05/2020	0,759	0,823	11,36	11,65	23,1	22,4
Semaine 39	25/08/2020	0,492	0,537	11,19	9,93	20	19
Semaine 45 (Report semaine 2)	06/10/2020	0,739	0,793	11,26	11,33	19,1	19,4
Semaine 52	24/11/2020	0,422	0,139	11,34	9,72	14,2	13,9

Tableau 22 : Résultats de la conductivité, du pH et de la température – Application "graves traitées" – Chantier à Houplines

RESULTATS DU SUIVI ENVIRONNEMENTAL

Les résultats du suivi environnemental sont donnés en *Annexe 8 : Résultats du suivi environnemental des pilotes expérimentaux "graves traitées" à Houplines.*

Les résultats d'analyses de lixiviation des pilotes expérimentaux installés à Houplines permettent de comparer l'innocuité environnementale du pilote témoin (avec une formulation classique) et l'innocuité du pilote expérimental (contenant 10% de sédiments).

Les résultats de la lixiviation étudiée sur les eaux de ruissellement des pilotes pendant 52 semaines montrent un dépassement en carbone organique total (COT) essentiellement pour le pilote expérimental pendant les 8 premières semaines d'analyses. Les résultats de COT sur le pilote témoin ne montrent aucun dépassement sur l'ensemble du suivi d'innocuité environnementale. En moyenne la valeur de COT du pilote témoin est 13 fois inférieure à la valeur de COT du pilote expérimental : 5 mg/l en moyenne, comparé à 66 mg/l en moyenne pour le pilote expérimental, avec un seuil fixé à 70 mg/l. Par conséquent, les résultats de la fin du suivi environnemental permettent tout de même au pilote expérimental de respecter en moyenne le seuil de COT.

Le COT est un paramètre que l'on retrouve classiquement dans les sédiments dû à leur oxydation, les dépassements obtenus sont cohérents compte-tenu de la composition des graves traitées.

Le graphique de la Figure 32 présente l'évolution de la teneur en DBO des deux pilotes, en fonction des semaines de prélèvement. Le seuil représenté en rouge est de 70 mg/l.

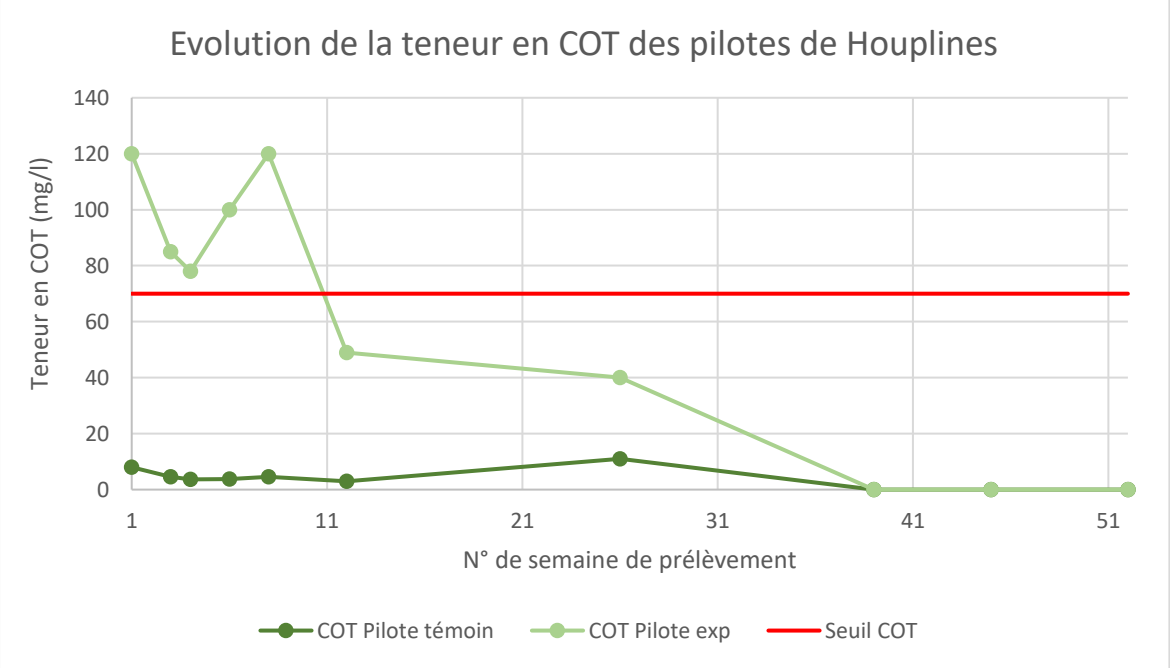


Figure 32 : Evolution de la teneur en COT (mg/l) pour les pilotes témoin et expérimental à Houplines

Un autre paramètre qui présente un dépassement lors de quatre relevés d'analyses du pilote expérimental est la demande biochimique en oxygène (DBO). De façon similaire aux résultats de COT, c'est lors du début du suivi environnemental que les dépassements sont les plus importants. Néanmoins, au bout de 12 semaines de suivi, les résultats pour les pilotes témoin et expérimental en DBO respectent le seuil de 100 mg/l. De plus, les dépassements en DBO

ne sont pas non plus surprenants et sont fréquemment rencontrés pour des applications formulées avec des sédiments.

Le graphique ci-dessous présente l'évolution de la teneur en DBO en fonction des semaines de prélèvement. La ligne rouge est le seuil fixé pour ce projet.

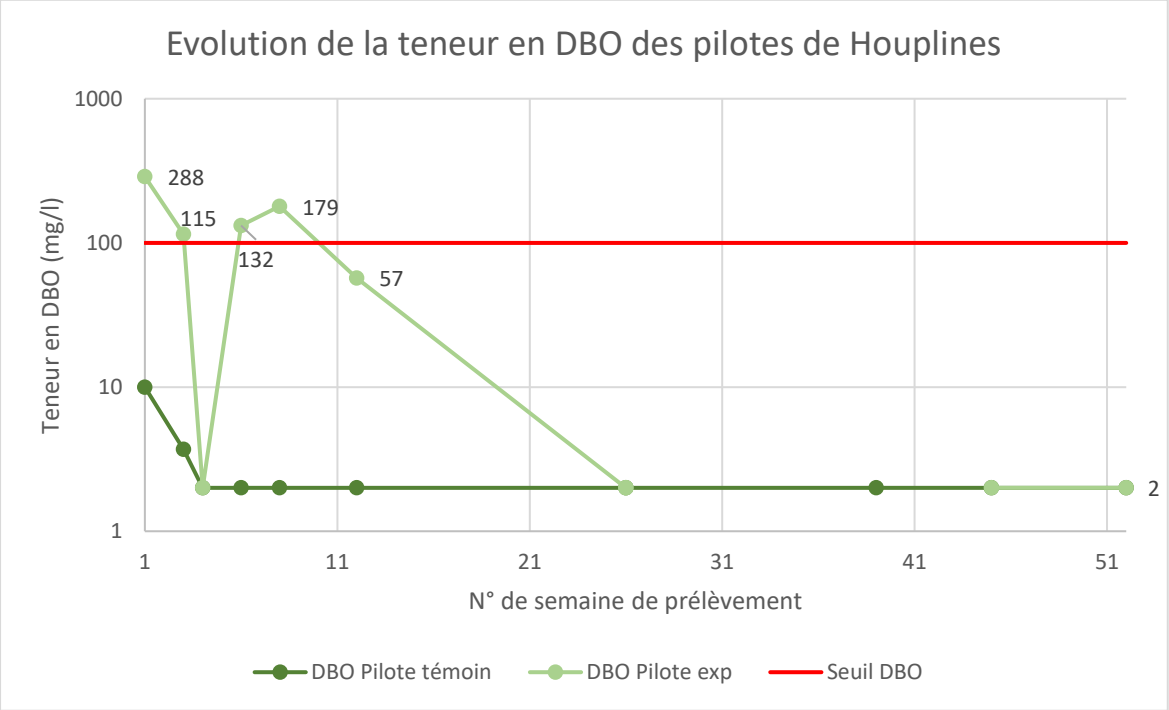


Figure 33 : Evolution de la teneur en DBO (mg/l) pour les pilotes témoin et expérimental à Houplines

7. PHASE 4 : OUVRAGES EXPERIMENTAUX POUR LES APPLICATIONS COULIS ET HYDROCYL

Livrables	Rapport du protocole de suivi environnemental et mécaniques des ouvrages expérimentaux Rapport, avec des illustrations photographiques, des étapes de la fabrication et de la mise en œuvre des ouvrages expérimentaux Rapport er suivi environnemental et mécaniques des 3 ouvrages expérimentaux Fiches « Ouvrages expérimentaux »

La mise en œuvre des ouvrages expérimentaux se fera dans les conditions usuelles moyennant la prise en compte de certaines spécificités liées à l'expérimentation SEDIMATERIAUX.

L'objectif de cette expérimentation est d'appliquer les résultats de la phase laboratoire sur un ouvrage à l'échelle 1/1 au sein duquel les hydrocyls et coulis à base de sédiments sont mis en œuvre dans des conditions représentatives de l'usage étudié (épaisseurs, nature des couches…).

Cela permettra de s'affranchir de l'effet d'échelle qui peut être occasionné lors de la réalisation d'essais à des échelles plus petites (échelle laboratoire).

Ainsi nous assurerons un suivi environnemental et mécanique de la structure de l'ouvrage afin de valider les études de laboratoire correspondantes.

Les spécificités liées à l'expérimentation Sédimatériaux consiste principalement à assurer une séparation entre la partie témoin de l'ouvrage réalisé à base d'hydrocyls ou coulis sans sédiments et la partie réalisée avec des hydrocyls ou coulis intégrant des sédiments. Cette séparation est assurée par une géomembrane, la soudure de la géomembrane sera illustrée sur des plans 2D et 3D.

En effet, la validation de la faisabilité technique et environnementale de la valorisation des sédiments dans les hydrocyls ou coulis se fera sur la base d'une comparaison des performances mécaniques et environnementales de la partie témoin de l'ouvrage et de la partie « prototype » ayant recours à des hydrocyls ou coulis à base de sédiment.

Pour la meilleure représentativité possible, les mêmes quantités d'hydrocyl et coulis seront mise en œuvre et sur la partie témoin et sur le prototype. En conséquence les volumes de la partie témoin de l'ouvrage et de la partie prototype seront égaux.

- Instrumentation de chaque partie séparément en vue de récupérer les eaux pour les analyses du suivi environnemental.
  Cette instrumentation constera à mettre des piézomètres qui permettront de réaliser des prélèvements des eaux pour les analyses du suivi environnemental.

Chaque partie de l'ouvrage (témoin et prototype à base sédiment) sera donc dotée d'un système permettant les prélèvements nécessaires au suivi environnemental.

- Assurer une étanchéité par les 3 couches suivantes :
  - Couche anti-poinçonnement ;
  - Géomembrane ;
  - Couche anti-poinçonnement.

Pour la réalisation des deux ouvrages, un minimum de 650 tonnes d'hydrocyls seront fabriqués dont la moitié sera des témoins sans sédiment et l'autre moitié intégrant des sédiments. La fabrication a été réalisé chez un industriel de préfabriqué du béton.
Le suivi proposé permettra d'évaluer précisément le comportement environnemental et mécanique des trois ouvrages intégrant les sédiments.

Les propositions de suivi seront basées sur le suivi déjà mis en place pour les projets SEDIMATERIAUX, et sur la base des méthodes établies par des guides scientifiques notamment le guide SETRA et le guide d'acceptabilité de matériaux alternatifs en techniques routières - Évaluation environnementale (SETRA, mars 2011).

De cette façon nous pourrons comparer les résultats des analyses des ouvrages à échelle 1 avec ceux de la phase laboratoire.

Une partie des ouvrages seront réalisés avec les formulations sans sédiment. Le but est d'avoir un témoin. Ce dernier reproduit la même structure mais utilise, en lieu et place du matériau testé, un matériau pris comme référence.

7.1 REDACTION DES CAHIERS DES CLAUSES TECHIQUES PARTICULIERES SPECIFIQUES AUX CHANTIERS EXPERIMENTAUX

7.1.1 CHAUSSEE RESERVOIR

Le cahier des charges des clauses techniques particulières concernant la fourniture des modules de béton de type hydrocyl est présenté en *Annexe 5 : Cahier des clauses techniques particulières – chantier chaussée réservoir.*

La fiche technique des sédiments accompagnant les CCTP est présentée en *Annexe 2 : Fiche technique des sédiments.*

Le cahier des charges des clauses techniques particulières pour le chantier de Leers et de Tourcoing est présenté en Annexe 3 : Fiche technique des pilotes expérimentaux.

7.1.2 COULIS

Le cahier des charges des clauses techniques particulières pour le chantier de Bondues est présenté en Annexe 6 : Cahier des clauses techniques particulière - chantier coulis.

7.2 REALISATION DES 3 CHANTIERS EXPERIMENTAUX

L'objectif a été d'appliquer les résultats de la phase laboratoire sur un ouvrage à l'échelle 1/1 au sein duquel les hydrocyls et les coulis à base de sédiments ont été mis en œuvre dans des conditions représentatives de l'usage étudié. Ceci a permis de s'affranchir de l'effet d'échelle qui peut être occasionné lors de la réalisation d'essais à plus petites échelles.

Les spécificités qui ont été prises en compte sont les suivantes :

1. Assurer une séparation entre la partie témoin de l'ouvrage réalisé à base d'hydrocyl ou coulis sans sédiments et la partie réalisée avec des hydrocyl ou coulis intégrant des sédiments. Cette séparation est assurée par une géomembrane.

   En effet, la validation de la faisabilité technique et environnementale de la valorisation des sédiments dans les hydrocyls ou coulis s'est faite sur la base d'une comparaison des performances mécaniques et environnementales de la partie témoin de l'ouvrage et de la partie « expérimentale » ayant recours à des hydrocyls ou coulis à base de sédiment.
   Pour la meilleure représentativité possible, les mêmes quantités d'hydrocyl et coulis ont été mises en œuvre sur la partie témoin et sur la partie expérimentale.

2. Instrumentation de chaque partie séparément en vue de récupérer les eaux pour les analyses du suivi environnemental.

   Cette instrumentation a consisté à mettre des piézomètres qui ont permis de réaliser des prélèvements des eaux pour les analyses du suivi environnemental.
   Chaque partie de l'ouvrage (témoin et expérimental) a donc été dotée d'un système permettant les prélèvements nécessaires au suivi environnemental.

3. Assurer une étanchéité avec la mise en place de couche anti-poinçonnement et de géomembrane.

Tout au long de la réalisation des chantiers, des visites ont été réalisés. A l'issue de ces réunions, des comptes-rendus ont été rédigés. Deux exemples sont présentés en *Annexe 7 : Comptes-rendus des réunions de suivi de chantier.*

APPLICATION « BETON POUR CHAUSSEE RESERVOIR » (2 CHANTIERS)

Fabrication des hydrocyls et essais complémentaires

Pour les besoins de l'étude, des hydrocyls ont été fabriqués en grande quantité pour la réalisation des chantiers de Tourcoing et de Leers selon les photographies suivantes.

150

Figure 34 : Fabrication des hydrocyls

Des essais complémentaires ont été effectués par le CERIB pour évaluer le comportement mécanique de structures en produits creux en béton pour chaussée réservoir, cela afin de comparer les résultats. Ces essais ont été effectués sur une formulation témoin, une formulation à base de 5 % de sédiments et une formulation à base de 6 % de sédiments.

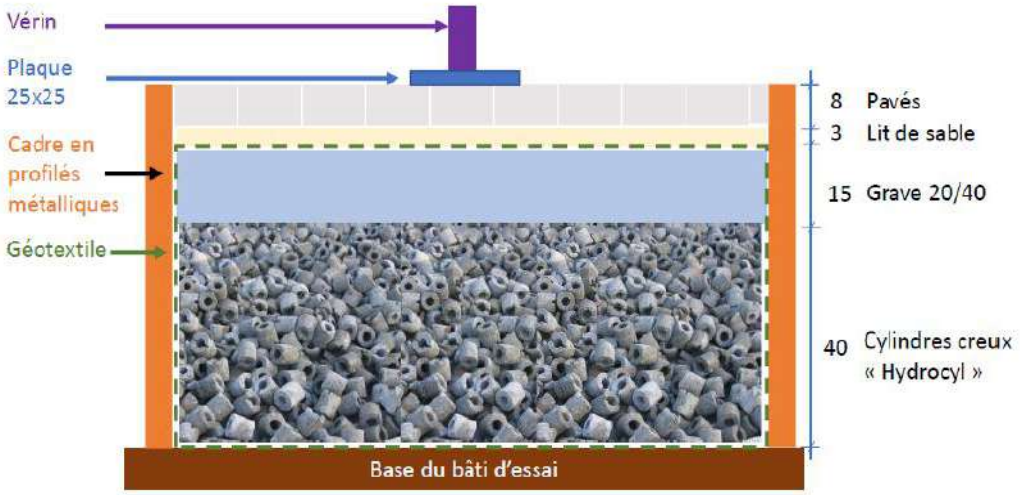


Figure 35 : Principe de l'essai

Figure 36 : Application d'une charge représentative d'une roue de poids lourd

	Formulation 5 %	Formulation 6 %
Tassement lors du 1er cycle de chargement sous 65 kN (mm)	5,5	5,4
Tassement cumulé lors du 10ème cycle de chargement à 65 kN (mm)	9,2	8,4
Tassement cumulé sous 65 kN lors de la dernière rampe de chargement (mm)	9,4	8,6

Tableau 23 : Résultats du comportement mécanique entre les hydrocyls comprenant 5 % de sédiments et les hydrocyls comprenant 6 % de sédiments

Les résultats obtenus pour la formulation à base de 5 % de sédiments et la formulation à base de 6 % de sédiments sont comparables pour des cycles de chargement à 65 kN (charge routière).

Essais	Essais dynaplaque sur chantier – Ouvrage de Leers	
	Ev2 Hydrocyls témoin en MPa	Ev2 Hydrocyls 5% en MPa
1	51	44
2	50	49
3	50	46

Tableau 24 : Résultats du comportement mécanique entre les hydrocyls comprenant 5 % de sédiments et la formulation témoin

Les résultats obtenus pour la formulation à base de 5 % de sédiments et le témoin sont comparables.

Emplacement

Nous rappelons que ces 2 ouvrages expérimentaux seront différents en termes d'utilisation finale, de sollicitation et de taux de sédiment incorporé dans les formulations. L'objectif serait de fiabiliser les résultats et de les généraliser sur tout différents types de chantier de la métropole de Lille.

Ouvrage expérimental 1	Ouvrage expérimental 2
Ouvrage d'aménagement du centre de la ville de Leers	Ouvrage de création de parking sur la rue de Rhin de la ville de Tourcoing
• Sollicitations modérées • Taux de substitution des sédiments moyen (5% de la composition globale des hydrocyls)	• Sollicitations faibles • Taux de substitution des sédiments maximale (6 à 7% de la composition globale des hydrocyls)

Tableau 25 : Localisation des chantiers test "hydrocyls"

Figure 37 : Plan du chantier d'aménagement du centre de la ville de Leers

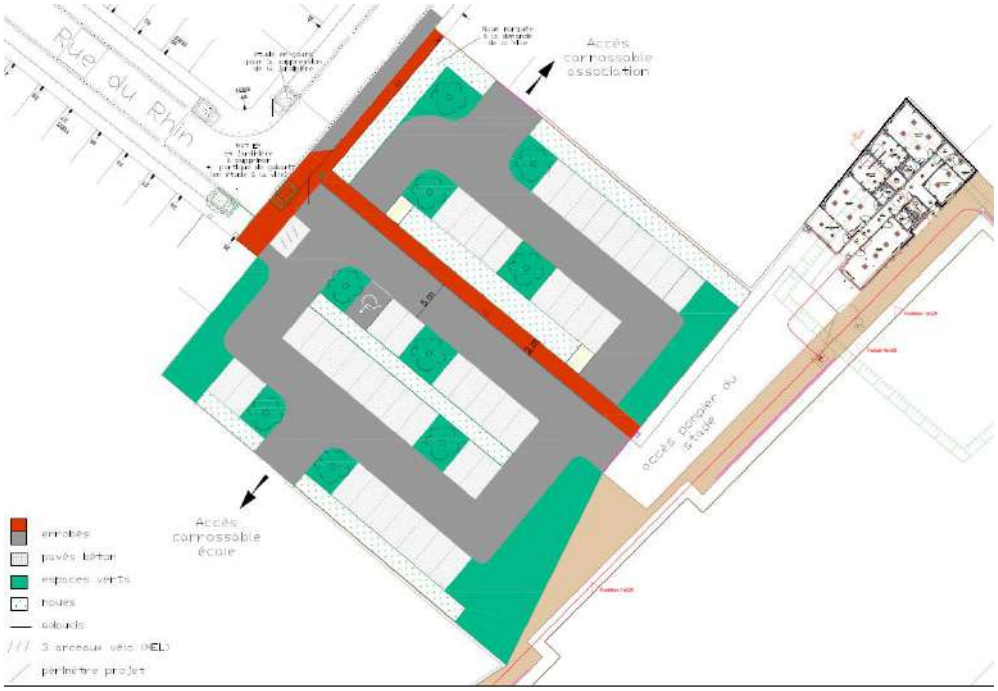


Figure 38 : Plan du chantier d'aménagement de la ville de Tourcoing

Equipement / Dimensionnement

Les ouvrages expérimentaux seront donc des ouvrages à l'échelle 1/1 au sein duquel les matériaux sont mis en œuvre dans des conditions représentatives de l'usage étudié.

Une partie de l'ouvrage sera mise en œuvre avec une formulation témoin d'hydrocyls sans intégration de sédiment, et une autre partie avec une formulation expérimentale à base de sédiments.

Les sites expérimentaux ont été instrumentalisés de manière à pourvoir procéder à la récupération des eaux de suivis environnementaux. Les ouvrages expérimentaux in-situ seront réalisés en accord avec le protocole rédigé lors des phases précédentes.

Chantier test 1	Chantier test 2
• Longueur : 76 mètres • Largeur : 10 mètres • Epaisseur : 0,9 mètres dont 0,6 mètres d'hydrocyl	• Longueur : 19 mètres (sur 2 zones) • Largeur : 10 mètres (sur 2 zones) • Epaisseur : 0,9 mètres dont 0,6 mètres d'hydrocyl

Tableau 26 : Dimensionnement des chantiers test "hydrocyls"

Modélisation 3D

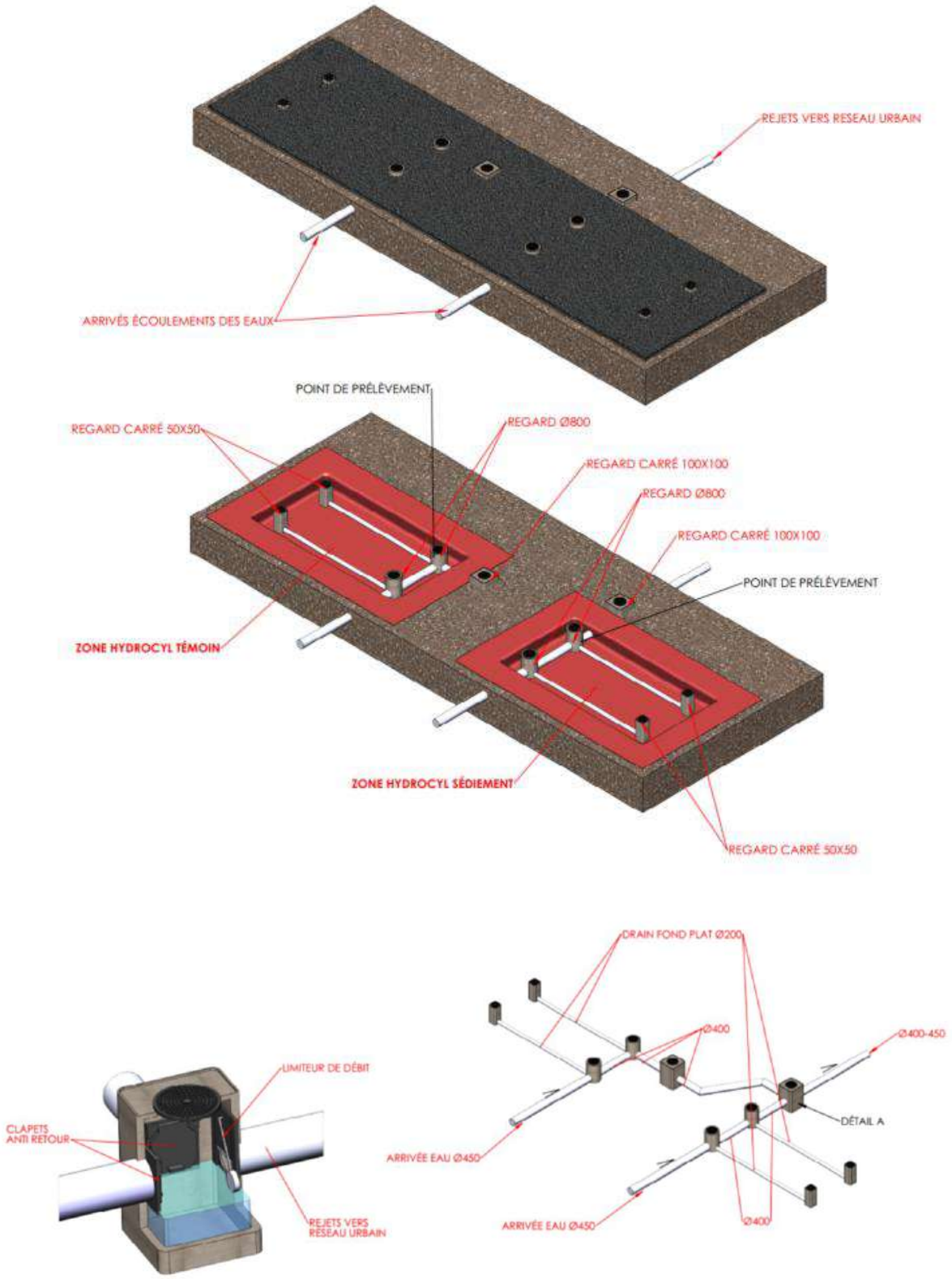


Figure 39 : Modélisation 3D des chantiers test

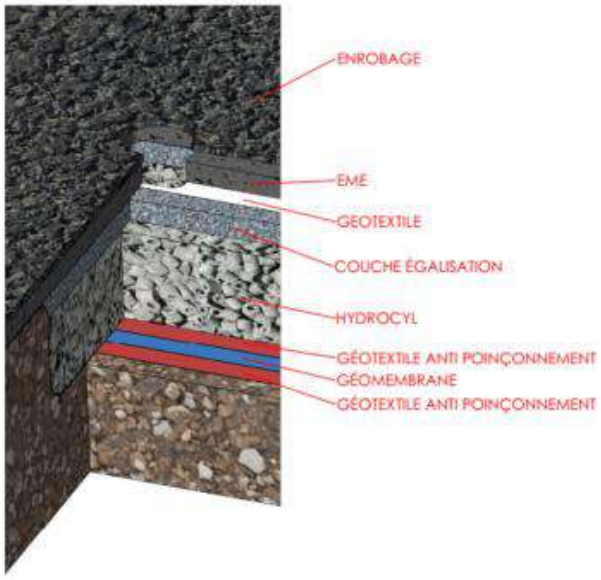


Figure 40 : Modélisation 3D du profil de la chaussée réservoir

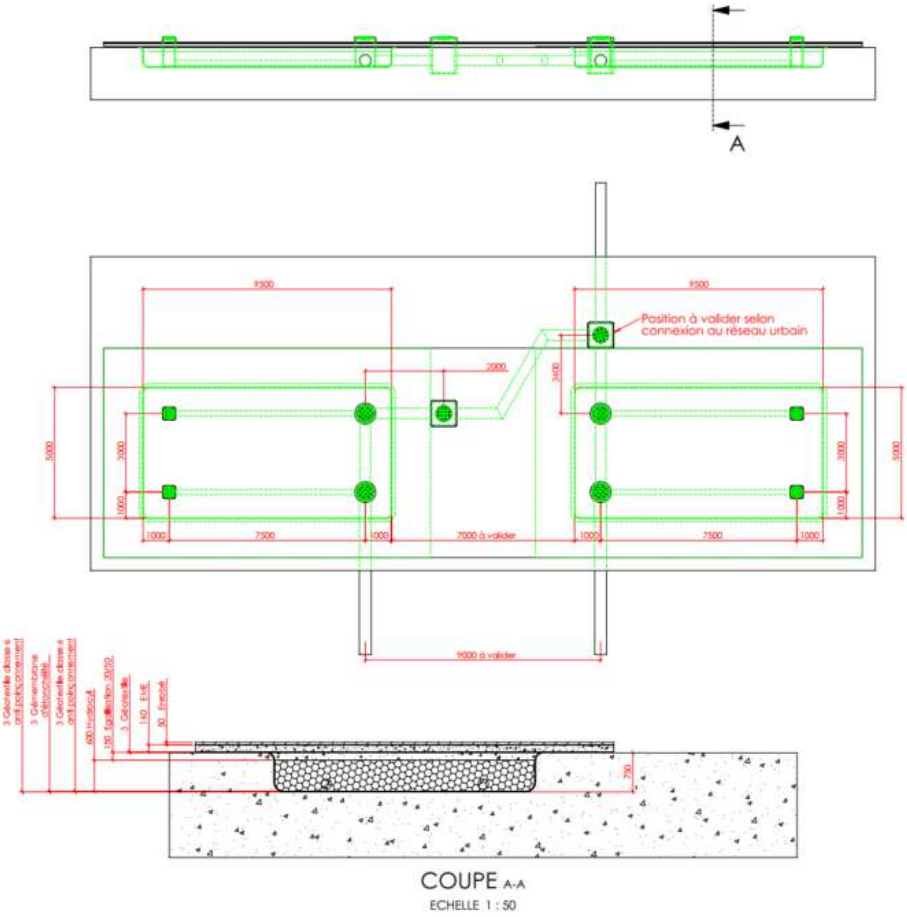


Figure 41 : Dimensionnement des chantiers test

Réalisation du chantier de Leers

Démarrage des travaux

Terrassement

Installation des regards

Mise en place des membranes d'étanchéité

Mise en place des hydrocyls

Fin des travaux

Figure 42 : Photographies de la réalisation du chantier de Leers

Réalisation du chantier de Tourcoing

Terrassement

Fourniture des hydrocyls

Fin des travaux

Figure 43 : Photographies de la réalisation du chantier de Tourcoing

APPLICATION « COULIS AUTOCOMPACTANT » (UN CHANTIER)

Emplacement

L'ouvrage de coulis est situé chemin de beau séjour à Bondues.

Le plan ci-dessous illustre le linéaire de 600 m de la ville de Bondues concerné par le coulage des coulis.

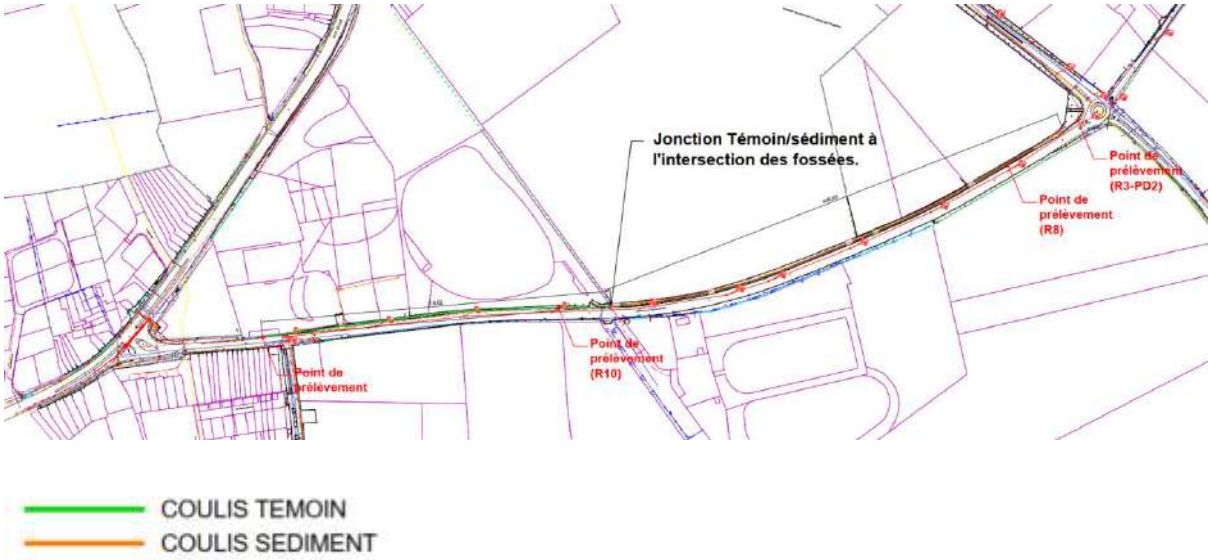


Figure 44 : Localisation du chantier test avec sédiments

Equipement / dimensionnement

Les ouvrages expérimentaux seront donc des ouvrages à l'échelle 1/1 au sein duquel les matériaux sont mis en œuvre dans des conditions représentatives de l'usage étudié.

Une partie de l'ouvrage sera mise en œuvre avec une formulation témoin de coulis sans intégration de sédiment, et une autre partie avec une formulation expérimentale à base de sédiments.

Les sites expérimentaux ont été instrumentalisés de manière à pourvoir procéder à la récupération des eaux de suivis environnementaux. Les ouvrages expérimentaux in-situ seront réalisés en accord avec le protocole rédigé lors des phases précédentes.

Le linéaire de canalisation concerné par l'ouvrage est de 600 mètres environ. La canalisation est en grès de diamètre 300 à 500 mm.

Pour la mise en œuvre de cet ouvrage, 700 m^3 de coulis ont donc été coulés.

Modélisation 3D

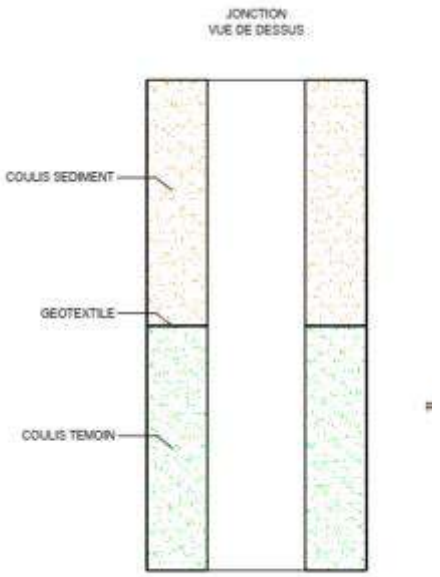


Figure 45 : Délimitation entre le chantier test témoin et expérimental

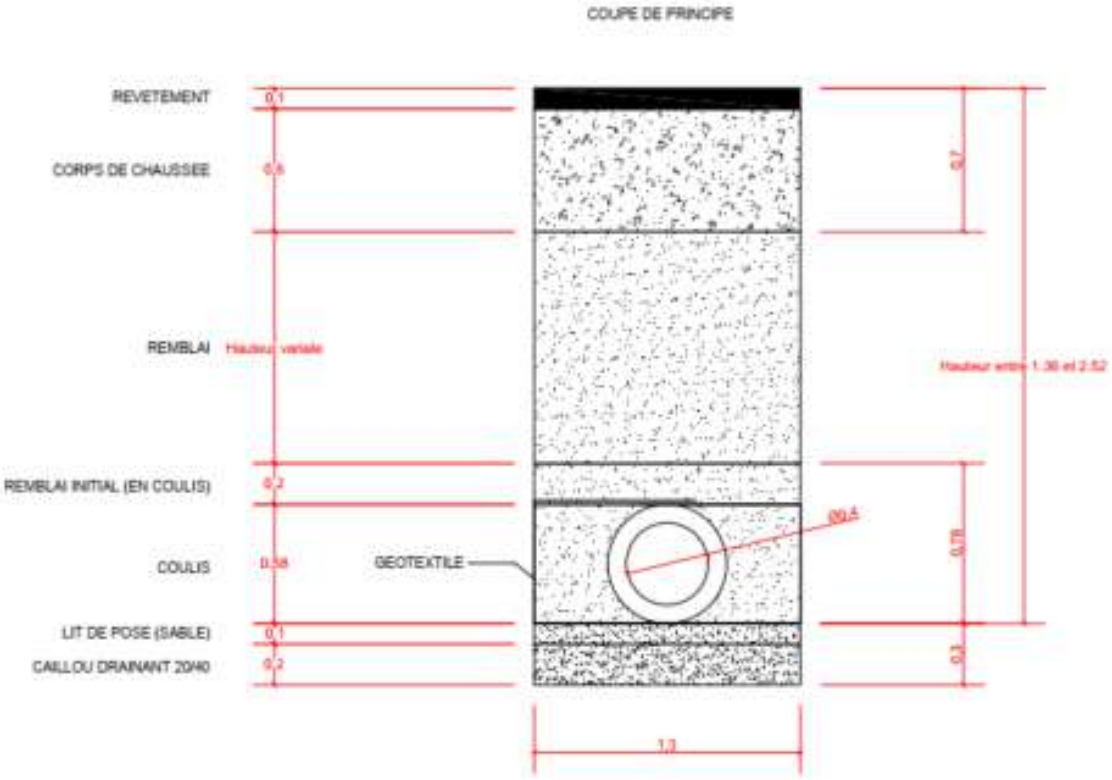
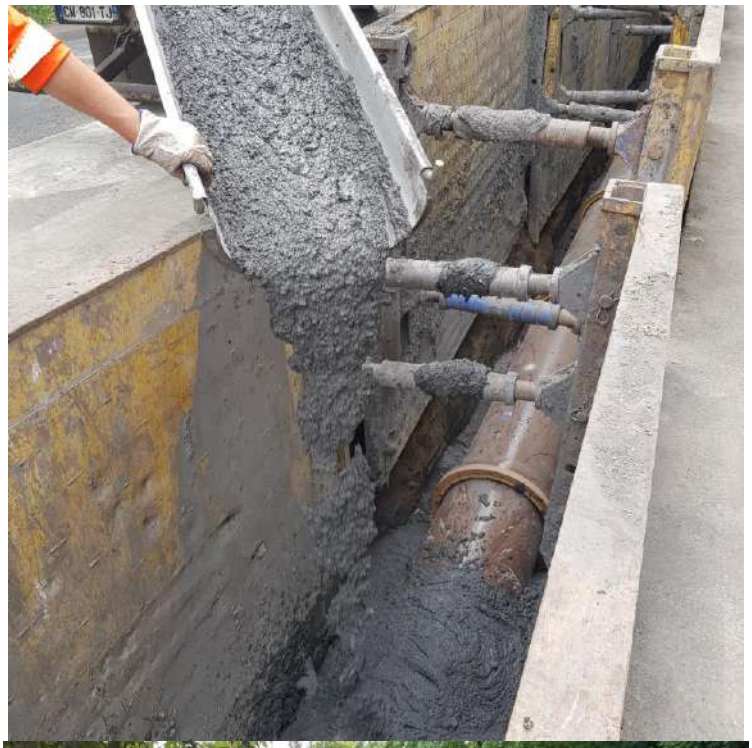


Figure 46 : Dimensionnement du profil des chantiers test

Réalisation du chantier de Bondues



Mise en place du coulis à base de sédiments

Fin des travaux

Figure 47 : Photographies de la réalisation du chantier de Tourcoing

7.3 SUIVIS DE LA REALISATION DES CHANTIERS EXPERIMENTAUX (NEO-ECO)

Les ouvrages expérimentaux ont été réalisés en accord avec le protocole rédigé dans les phases précédentes.

Les ouvrages expérimentaux sont donc des ouvrages à échelle 1/1 au sein duquel les matériaux sont mis en œuvre dans des conditions représentatives de l'usage étudié.

Plusieurs paramètres ont été vérifié au cours de la réalisation des trois ouvrages, ainsi que durant la fabrication des hydrocyls et des coulis à base de sédiments :

- le procédé de mise en œuvre sur site ;
- l'incorporation du bon taux de sédiments ;
- la bonne application des formulations développés lors de la phase laboratoire ;
- la qualité des sédiments avant leurs utilisations.

Des points de contrôles ont été réalisés.

7.4 PROTOCOLE DU SUIVI ENVIRONNEMENTAL ET MECANIQUES DES CHANTIERS EXPERIMENTAUX

PROTOCOLE DU SUIVI ENVIRONNEMENTAL

Le protocole du suivi environnemental est similaire entre les applications « béton pour chaussée réservoir » et « coulis autocompactant ».

Condition d'exposition

Dans le cas étudié, les ouvrages expérimentaux seront soumis à des conditions d'exposition réelles extérieures. Au cours du suivi, les ouvrages seront donc soumis aux conditions d'ensoleillement et de pluviométrie.

Echéance de prélèvement

A l'issue de la mise en place des ouvrages expérimentaux, le suivi environnemental sera réalisé sur une **durée de 1 an**.

Les échéances de mesures ont été choisies selon la *norme américaine EPA METHOD 1315.* Ces dernières sont les suivantes :

- 1 mesure **semaine 1** ;
- 1 mesure **semaine 2** ;
- 1 mesure **semaine 3** ;
- 1 mesure **semaine 4** ;
- 1 mesure **semaine 6** ;
- 1 mesure **semaine 8** ;
- 1 mesure **semaine 12** ;
- 1 mesure **semaine 26** ;
- 1 mesure **semaine 39** ;
- 1 mesure **semaine 52**.

Prise de mesure in situ

Les eaux du suivi sont prélevées à chaque manipulation et analysées dans un second temps. Les analyses effectuées sur les différentes eaux permettent de vérifier l'innocuité environnementale grâce à la comparaison des résultats du pilote témoin et ceux du pilote expérimental.

Les mesures in-situ à prendre lors des divers prélèvements sont :

- le pH ;
- la conductivité ;
- la température de l'eau.

Prise d'échantillon

Afin d'échantillonner les eaux de suivi, il est nécessaire d'attendre d'avoir suffisamment de précipitation pluviale. Cela permettra d'avoir une quantité suffisante d'eau dans des bacs de rétention pour les analyses. Nous proposons de réaliser les prélèvements, à l'aide de vannes installées sur les bacs de rétention, conformément à la *norme AFNOR ISO 5667-6 « Guide de prélèvement des rivières et cours d'eau »* qui précise les techniques d'échantillonnage et la manipulation des échantillons d'eaux superficielles (en rivières et cours d'eau).

Les prélèvements seront réalisés dans les flaconnages préconisés par la *norme NF EN ISO 5667-3* et en accord avec les procédures établies par le laboratoire d'analyses. Les flaconnages seront rincés plusieurs fois avec l'eau à prélever avant prélèvement, sauf dans le cas de flaconnages contenant un stabilisant (spécifié par le laboratoire sur le flacon).

Conformément à la norme, il conviendra de s'affranchir d'une contamination de l'échantillon : lors du prélèvement, les dépôts inférieurs ne doivent pas être remis en suspension et en cas de présence de matières en suspension (MES) à la surface de l'eau, celles-ci ne doivent pas être prélevées.

Les échantillons seront conservés dans un ensemble de flacons conformes aux préconisations de la *norme NF EN ISO5667-3*, appropriés aux analyses envisagées et fournis par le laboratoire. Les échantillons seront acheminés en glacière (5°c +/- 3) vers le laboratoire en charge des essais.

Programme analytique

On propose de choisir les analyses à réaliser conformément à la phase laboratoire et pour une évaluation en fonction des valeurs de références SEQ (Système d'Evaluation de la Qualité) EAU et NQE – Seuils Très bon état écologique.

Nous proposons donc le suivi des paramètres suivants :

- métaux : antimoine, arsenic, baryum, cadmium, chrome, cuivre, mercure, plomb, molybdène, nickel, sélénium étain et zinc ;
- azote total : azote Kjeldahl, nitrites, nitrates et calcul de l'azote total ;
- hydrocarbures totaux (HCT) C10-C40 ;
- *pack des 16 HAP* : naphtalène, acénaphtylène, acénaphtène, fluorène, phénanthrène, anthracène, fluoranthène, pyrène, benzo(a)anthracène, chrysène, benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, benzo(a)pyrène, dibenzo(ah)anthracène, benzo(ghi)pérylène, indéno(1, 2, 3 – cd)pyrène ;
- *pack de 7 PCB* : PCB 28, PCB 52, PCB 101, PCB 118, PCB 138, PCB 153, PCB 180 ;
- anions : fluorures, chlorures, sulfates ;
- DBO5 ;
- DCO ;
- MES ;
- COT.

PROTOCOLE DU SUIVI MECANIQUE

Les essais de durabilité ont été réalisés sur des hydrocyls à 3, 6 et 12 mois. Il a été décidé d'observer les effets d'agents extérieurs telles que les analyses ci-dessous :

- gel / dégel ;
- porosité accessible à l'eau ;
- porosité au mercure ;
- réaction sulfatique externe ;
- résistance à la compression ;
- lixiviation sur monolithe.

Gel / dégel

La réaction au gel / dégel peut occasionner des fissures en période de gel.

L'objectif de l'essai est donc de déterminer la résistance au gel d'un béton durci. L'essai est basé sur des mesures de variation d'allongement et de fréquence de résonance d'éprouvettes soumises à des cycles de gel-dégel.

Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau correspond à la capacité du béton à absorber l'eau et les polluants se trouvant dans l'eau en remplissant les pores de ce propre béton. Dans l'essai la quantité d'eau absorbée est comparée avec la quantité évaporée. Le béton compte comme étant étanche, si la quantité d'eau évaporée est plus grande que celle qui est absorbée.

Porosité au mercure

La porosité par intrusion de mercure a pour objectif de connaitre les caractéristiques de la porosité des matériaux solides en termes de porosité, de distribution de la taille des pores et de la densité. Alors que l'intrusion de mercure dans les macropores se produit déjà à basse pression, une pression plus élevée est nécessaire pour forcer l'intrusion du mercure dans les pores plus petites. De cette façon, une large étendue dynamique de la taille des pores peut être mesurée et une distribution de taille de pore peut être obtenu à partir de 4 nm jusqu'à env. 800 µm. En conséquence, la porosité par intrusion de mercure convient particulièrement aux matériaux à large distribution de pores ou ayant principalement des macropores.

Réaction sulfatique externe

La réaction sulfatique peut avoir des origines diverses qui dépendent des réactifs en présence et de leur quantité, de leur provenance et concomitance, ou encore du type de matériau concerné. Elle dépend aussi des paramètres liés à l'environnement. Lors d'une réaction sulfatique externe, les sulfates proviennent du milieu extérieur contrairement à la réaction sulfatique interne où les sulfates proviennent de l'ouvrage lui-même et de ses constituants.

La réaction a pour cause l'action des sulfates en excès sur les aluminates contenus dans la pâte de ciment en présence d'eau. Elle génère, par combinaisons ioniques, des minéraux sulfatés qui occasionnent expansions et fissurations des ouvrages.

Résistance à la compression

La résistance à la compression est la capacité d'un matériau ou d'une structure à supporter les charges qui tendent à réduire sa taille par compression (écrasement), par opposition à la résistance à la traction qui est une résistance à l'allongement (éclatement) et à la résistance au cisaillement qui est principalement une résistance à la torsion (vrille).

Par définition, la résistance à la compression d'un matériau est l'effort de compression uniaxial atteint à la rupture complète du matériau. Si le matériau est ductile cette rupture n'aura pas lieu, à l'inverse le matériau se déformera de manière irréversible.

Un essai de compression mesure la résistance à la compression d'un matériau sur une machine d'essais mécaniques suivant un protocole normalisé.

Lixiviation sur monolithe

Le test vise à caractériser les mécanismes de transfert de masse par l'observation des flux d'éléments chimiques relargués par les blocs monolithiques poreux. Le bloc est mis en contact avec un volume fixé de solution de lixiviation. La solution est renouvelée périodiquement et la dynamique du relargage de certains éléments est déterminée par l'analyse physico-chimique des éluats obtenus.

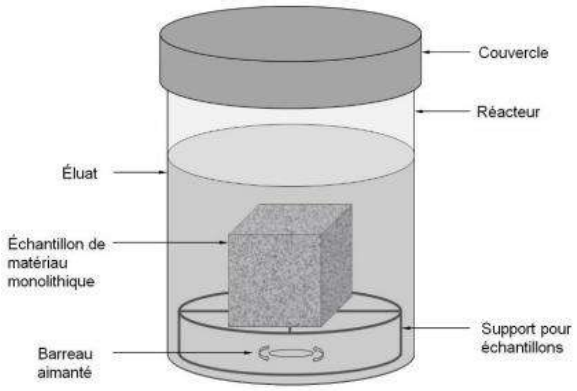


Figure 48 : Schéma de l'essai de lixiviation sur monolithe

7.5 RESULTATS DU SUIVI ENVIRONNEMENTAL ET MECANIQUES DES CHANTIERS EXPERIMENTAUX

RESULTATS DU SUIVI ENVIRONNEMENTAL « BETON POUR CHAUSSEE RESERVOIR »

Hydrocyls - Chantier test à Tourcoing

Figure 49 : Prélèvement sur le site de Tourcoing

Le tableau ci-dessous reprend les résultats de la conductivité, du pH et de la température.

N° Semaine	Date de prélèvement	Cond. (ms)		pH		Temp. (°C)	
		Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp
Semaine 1	02/05/2019	1,546	2,44	9,53	10,23	19,4	19,3
Semaine 2	09/05/2019	*Reporté au 01/08/2019 en raison d'absence d'eau*					
~~Semaine 3~~ Semaine4	~~16/05/2019~~ 20/05/19	1,355	2,23	10,01	10,32	15,4	16,0
Semaine 4	23/05/2019	*Reporté au 29/11/2019 en raison d'absence d'eau*					
Semaine 6	06/06/2019	0,250	0,981	10,10	9,88	20,4	20,2
Semaine 8	20/06/2019	0,458	0,605	9,40	9,18	20,9	22,0
Semaine 12	18/07/2019	0,555	0,618	8,56	9,20	21,8	22,9
Semaine 14 (Report semaine 2)	01/08/2019	0,367	0,479	9,55	6,41	24	23,8
Semaine 26	24/10/2019	0,1357	0,1994	9,03	8,81	16	15,3
Semaine 31 (Report semaine 4)	29/11/2019	0,186	0,131	9,25	9,82	11,8	10,6
Semaine 39	23/01/2020	0,190	0,147	7,44	8,83	7,30	9,70
~~Semaine 52~~ Semaine 53	~~23/04/2020~~ 28/04/2020	0,237	0,632	7,63	7,74	16,4	17,2

Tableau 27 : Résultats de la conductivité, du pH et de la température – Application "hydrocyls" – Chantier de Tourcoing

Les résultats sont montrés en Annexe 9 : Résultats du suivi environnemental des chantiers expérimentaux "hydrocyls" à Tourcoing.

Les résultats d'analyses de lixiviation sur le chantier de Tourcoing permettent de comparer les résultats de suivi environnementale du chantier témoin avec le chantier test, mais également de vérifier si les seuils de potabilité sont respectés.

En effet, il est possible de constater en Annexe 9 que le chantier expérimental émet en moyenne cinq fois plus de carbone organique total (COT) que le chantier témoin et cet écart est particulièrement visible au début du suivi environnemental des deux chantiers. Le COT est un paramètre déterminant quant à l'interprétation d'un produit sur son impact environnemental car il renseigne sur le type et l'origine des contaminations organiques des eaux usées. Cependant, les résultats des deux pilotes respectent le seuil de 70 mg/l sur toute la durée du suivi, comme le montre la Figure 50.

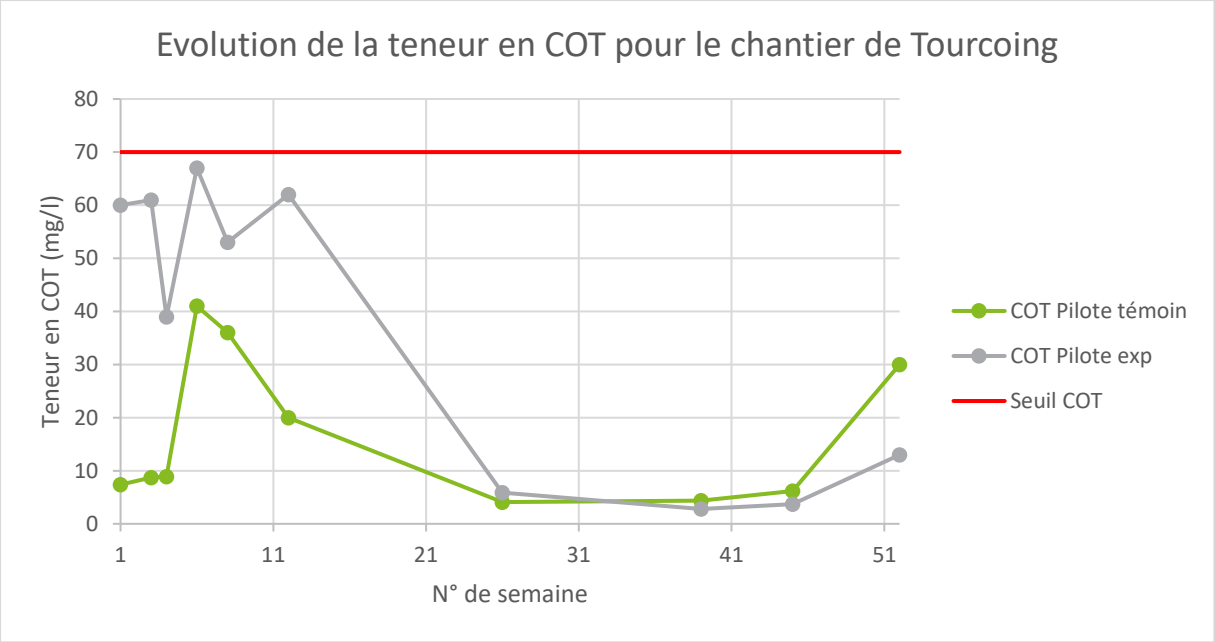


Figure 50 : Evolution de la teneur en COT (mg/l) pour le chantier de Tourcoing

De plus, contrairement au paramètre précédent, le seuil de la teneur en DCO (demande chimique en oxygène) est dépassé une fois sur la durée du suivi environnemental. Ce seuil n'est dépassé que par le chantier témoin cette fois-ci, lors de la semaine 8 où la teneur en DCO est égale à 485 mg/l. Le seuil étant fixé à 300 mg/l. A titre informatif, la teneur en DCO de la semaine 8 du chantier expérimental est de 200 mg/l.

Enfin, le paramètre de matières en suspension (MES) est également un paramètre critique. Les seuils de potabilité sont franchis (valeur de MES supérieure au seuil de 25 mg/l) lors des semaines 3 et 8 mais c'est le cas à la fois pour le chantier témoin et le chantier expérimental.

Hydrocyls – Chantier Test à Leers

Figure 51 : Prélèvement sur le site de Leers

Le tableau ci-dessous reprend les résultats de la conductivité, du pH et de la température.

N° Semaine	Date de prélèvement	Cond. (ms)		pH		Temp. (°C)	
		Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp
Semaine 1	08.10.2019	2,69	6,14	10,7	10,89	16	16,60
Semaine 2	15.10.2019	4,26	5,83	13,02	11,21	16,4	16,4
Semaine 3	22.10.2019	2,63	6,06	10,2	10,32	17	15,6
Semaine 4	29.10.2019	2,37	5,01	9,91	9,65	15	14,6
Semaine 6	12.11.2019	1,793	5,41	8,72	10,36	10,8	9,5
Semaine 8	26.11.2019	2,58	5,51	9,92	10,02	11,8	11,3
Semaine 12	24.12.2019	1,067	3,09	10,44	7,48	9,7	9,9
Semaine 26	31.03.2020	*Reporté au 28 avril 2020 (en raison du Covid-19)*					
Semaine 30 (report semaine 26)	28.04.2020	0,871	1,818	10,3	12,22	15,2	15,4
Semaine 39	30.06.2020	0,869	3,03	10,66	12,27	19,7	19,4
Semaine 52	29.09.2020	0,379	1,718	11,01	11,95	19,5	17,9

Tableau 28 : Résultats de la conductivité, du pH et de la température – Application "hydrocyls" – Chantier à Leers

Les résultats sont montrés en Annexe 10 : Résultats du suivi environnemental des chantiers expérimentaux "hydrocyls" à Leers.

Les résultats d'analyses de lixiviation sur le chantier de Leers permettent de comparer les résultats de suivi environnementale du chantier témoin avec le chantier test, mais également de vérifier si les seuils de potabilité sont respectés.

Le chantier expérimental fait l'objet d'un premier dépassement pour la teneur en COT. Le seuil de ce paramètre est dépassé à deux reprises, lors des semaines 1 et 2, respectivement 79 et 92 mg/l pour un seuil de 70 mg/l. Le chantier témoin ne montre quant à lui pas de dépassement de seuil. Ce résultat est cohérent avec les résultats des teneurs en COT pour le pilote expérimental. En effet, la présence de sédiments dans les formulations est à l'origine d'une présence en carbone organique totale plus élevée.

Un autre paramètre pour lequel le seuil est dépassé est la teneur en matières en suspension (MES). Le chantier témoin dépasse ce seuil de 100 mg/l à deux reprises et le chantier expérimental le dépasse à quatre reprises. La Figure 52 montre l'évolution de ce paramètre en fonction des semaines de prélèvement.

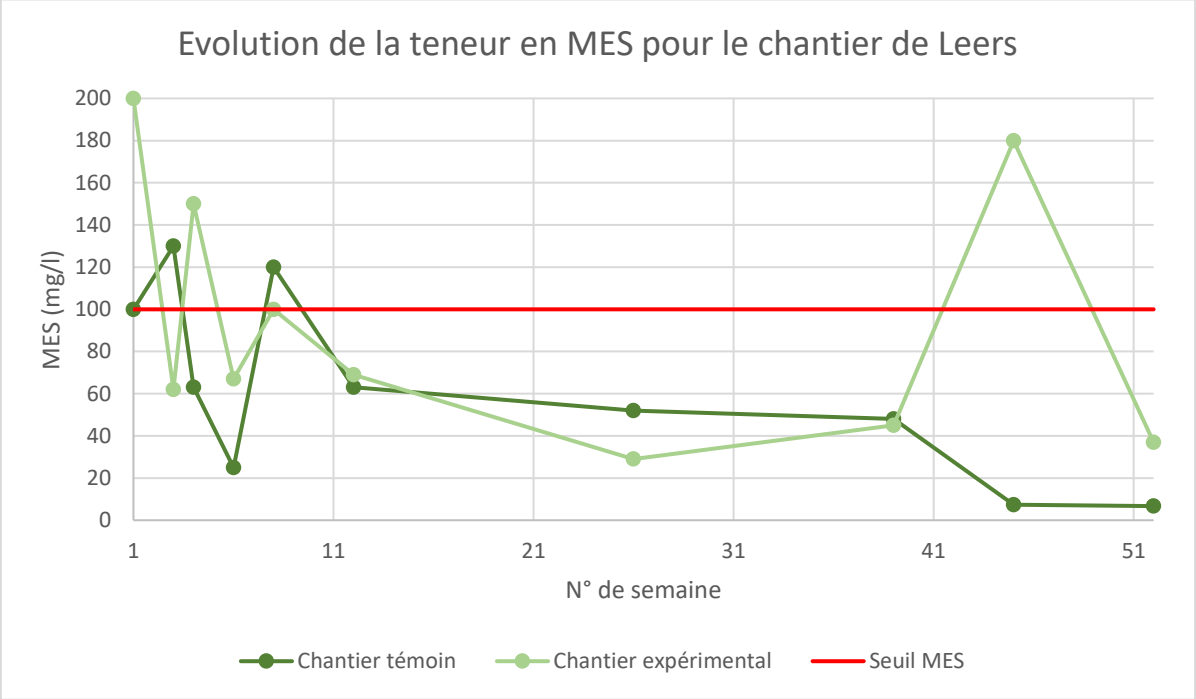


Figure 52 : Evolution de la teneur en matières en suspension (mg/l) pour le chantier de Leers

Un dernier point d'attention est la teneur en métaux totale en µg/l qui est sur toute la durée du suivi particulièrement importante pour le chantier expérimental. En moyenne la teneur en métaux est 3 fois plus importante pour le chantier expérimental que pour le chantier témoin : 502 µg/l contre 161 µg/l pour le chantier témoin. Néanmoins, le seuil de 15 000 µg/l demeure toujours respecté.

RESULTATS DU SUIVI ENVIRONNEMENTAL « COULIS AUTOCOMPACTANT »

Coulis – Chantier Test à Bondues

Figure 53 : Prélèvement sur le site de Bondues

Le tableau ci-dessous reprend les résultats de la conductivité, du pH et de la température.

N° Semaine	Date de prélèvement	Cond. (ms)		pH		Temp. (°C)	
		Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp
Semaine 1	08.10.2019	0,604	0,759	8,35	8,36	16,5	16,2
Semaine 2	15.10.2019	1,219	0,839	7,67	8,08	16,4	15,6
Semaine 3	22.10.2019	0,790	0,815	8,89	8,47	16,00	16,2
Semaine 4	29.10.2019	1,051	0,848	10,2	8,39	15,3	14,0
Semaine 6	12.11.2019	0,979	0,916	8,24	8,85	12,0	12,7
Semaine 8	26.11.2019	0,916	0,908	8,57	8,51	12,7	12,2
Semaine 12	24.12.2019	1,096	1,107	7,59	11,5	11,5	10,3
Semaine 26	31.03.2020	*Reporté au 28 avril 2020 (en raison du Covid-19)*					
Semaine 30 (report semaine 26)	28.04.2020	0,848	1,136	7,58	7,86	14	12,3
Semaine 39	30.06.2020	1,104	0,919	7,56	7,70	17	19
Semaine 52	29.09.2020	0,946	0,962	7,72	7,46	18,3	18,5

Tableau 29 : Résultats de la conductivité, du pH et de la température – Application "coulis" – Chantier à Bondues

Les résultats sont montrés en Annexe 11 : Résultats du suivi environnemental des chantiers expérimentaux "coulis" à Bondues.

Les résultats d'analyses de lixiviation sur le chantier de Bondues disponibles en Annexe 11 permettent de comparer les résultats de suivi environnementale du chantier témoin avec le chantier test, mais également de vérifier si les seuils de potabilité sont respectés.

Les résultats du chantier de Bondues montrent cette fois-ci que les seuils de potabilités sont globalement bien. Le chantier expérimental de Bondues est celui qui présente le moins de dépassement de seuils.

En effet, il n'y a que le seuil de la matière en suspension (100 mg/l) qui est dépassé. Néanmoins, ce dépassement n'a pas d'occurrence car il apparait essentiellement une seule fois, lors de la semaine 2 pour le chantier expérimental : 110 mg/l contre 30 mg/l pour le chantier témoin.

A titre indicatif, les teneurs en métaux en µg/l pour le chantier témoin et le chantier expérimental sont quasiment similaires, contrairement au chantier de Leers.

RESULTATS DU SUIVI MECANIQUE « BETON POUR CHAUSSEE RESERVOIR »

Gel / dégel

Témoin				
	Essai n°1	Essai n°2	Essai n°3	Moyenne
Immersion 3 mois	1,3 %	1,0 %	1,5 %	**1,3 %**
Immersion 6 mois	0,9 %	1,2 %	0,7 %	**0,9 %**
Immersion 12 mois	0,9 %	1,2 %	1,3 %	**1,1 %**
Hydrocyls 5 % sédiments				
	Essai n°1	Essai n°2	Essai n°3	Moyenne
Immersion 3 mois	3,9 %	3,7 %	3,9 %	**3,8 %**
Immersion 6 mois	4,9 %	4,7 %	4,6 %	**4,7 %**
Immersion 12 mois	2,4 %	2,1 %	2,5 %	**2,3 %**
Hydrocyls 6 % sédiments				
	Essai n°1	Essai n°2	Essai n°3	Moyenne
Immersion 3 mois	0,9 %	1,1 %	0,8 %	**0,9 %**
Immersion 6 mois	0,9 %	1,2 %	0,8 %	**0,9 %**
Immersion 12 mois	1,4 %	1,3 %	1,4 %	**1,4 %**

Tableau 30 : Résultats de l'essai gel / dégel

Porosité accessible à l'eau

Témoin						
	Essai n°1	Essai n°2	Essai n°3	Essai n°4	**Moyenne**	Ecart type
Masse sèche						
Immersion 3 mois	645,41	685,32	692,11		**674,28**	19,25
Immersion 6 mois	677,56	716,69	682,05		**692,10**	16,39
Immersion 12 mois	707,98	702,39	692,66	685,02	**697,01**	5,57
Masse humide saturée						
Immersion 3 mois	699,56	709,8	715,79		**708,38**	5,88
Immersion 6 mois	720,95	737,8	720,29		**726,35**	7,64
Immersion 12 mois	736,68	718,57	722,79	697,23	**718,82**	7,11
Masse immergée						
Immersion 3 mois	403,84	395,88	410,39		**403,37**	4,99
Immersion 6 mois	414,44	432,36	416,03		**420,94**	7,61
Immersion 12 mois	428,57	419,39	406,23	396,94	**412,78**	
Porosité (%)						
Immersion 3 mois	18%	8%	8%		**11,18**	5%
Immersion 6 mois	14%	7%	13%		**11,21**	3%
Immersion 12 mois	9%	5%	10%	4%	**6,77**	2%
Hydrocyls 5 % sédiments						
	Essai n°1	Essai n°2	Essai n°3	Essai n°4	**Moyenne**	Ecart type
Masse sèche						
Immersion 3 mois	618,49	592,85	625,75		**612,36**	13,01
Immersion 6 mois	633,56	613,15	638,85		**628,52**	10,25
Immersion 12 mois	649,48	636,96	640,5	636,38	**640,83**	4,78
Masse humide saturée						
Immersion 3 mois	663,05	636,32	667,71		**655,69**	12,92
Immersion 6 mois	665,87	644,96	673,1		**661,31**	10,90
Immersion 12 mois	675,66	676,78	679,07	664,36	**673,97**	1,27
Masse immergée						
Immersion 3 mois	374,83	357,18	378,85		**370,29**	8,74
Immersion 6 mois	381,17	367,67	400,13		**382,99**	11,43
Immersion 12 mois	385,64	379,4	378,66	371,14	**378,71**	
Porosité (%)						
Immersion 3 mois	15%	16%	15%		**15,18**	11,18
Immersion 6 mois	11%	11%	13%		**11,78**	1%
Immersion 12 mois	9%	13%	13%	10%	**10,94**	2%
Hydrocyls 6 % sédiments						
	Essai n°1	Essai n°2	Essai n°3	Essai n°4	**Moyenne**	Ecart type
Masse sèche						

Immersion 3 mois	645,43	685,33	692,13		**674,30**	19,24
Immersion 6 mois	681,29	663,24	677,2		**673,91**	7,11
Immersion 12 mois	638,23	682,94	681,1	669,89	**668,04**	19,46
Masse humide saturée						
Immersion 3 mois	713,08	713,58	713,25		**713,30**	0,18
Immersion 6 mois	695,53	697,24	690,24		**694,34**	2,73
Immersion 12 mois	695,08	697,39	698,14	711,56	**700,54**	1,19
Masse immergée						
Immersion 3 mois	416,8	417,16	414,2		**416,05**	1,24
Immersion 6 mois	402,91	390,59	450,13		**414,54**	23,72
Immersion 12 mois	420,7	416,15	416,74	402,93	**414,13**	
Porosité (%)						
Immersion 3 mois	23%	10%	7%		**13,12**	6%
Immersion 6 mois	5%	11%	5%		**7,30**	3%
Immersion 12 mois	21%	5%	6%	14%	**10,92**	6%

Tableau 31 : Résultats de l'essai de porosité accessible à l'eau

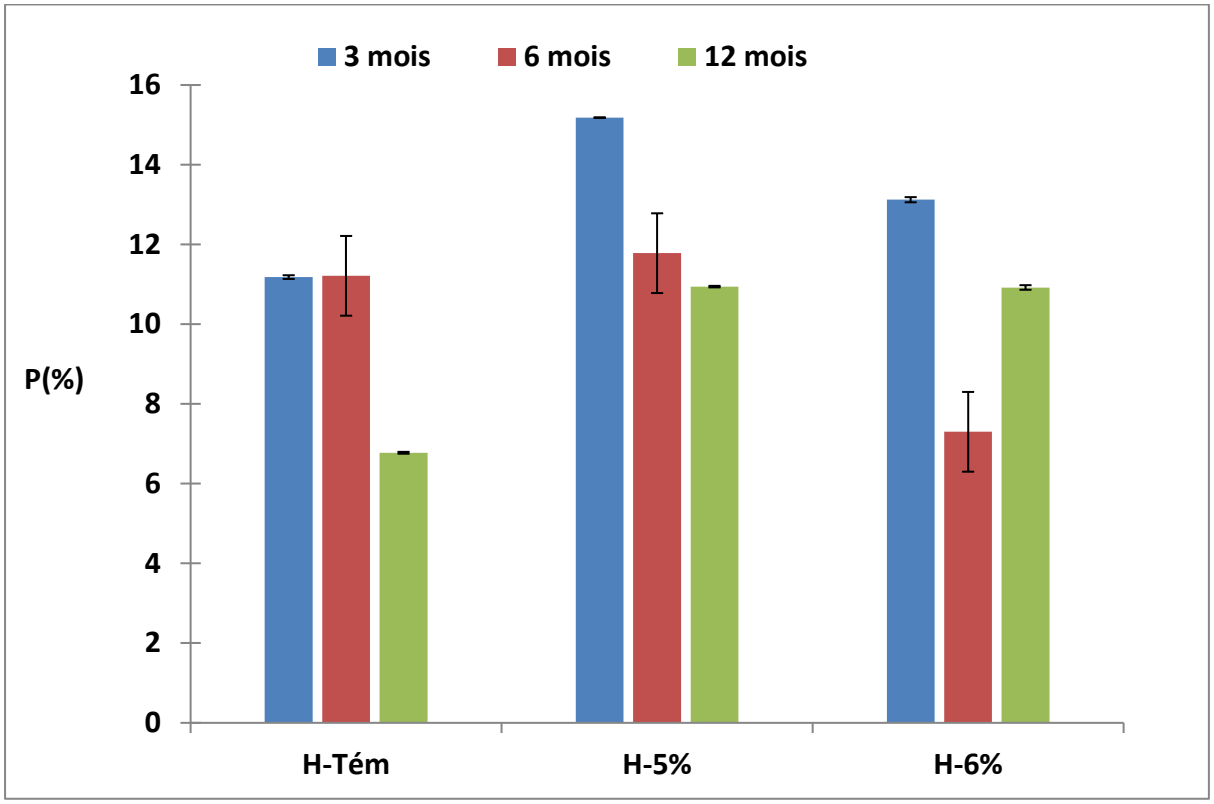


Figure 54 : Graphique montrant les résultats de la porosité accessible à l'eau

Porosité au mercure

	T	5%	6%
3 mois	4,04	7,37	6,75
6 mois	6,76	6,30	6,23
12 mois	6,72	6,48	5,51

Tableau 32 : Résultats de la porosité au mercure

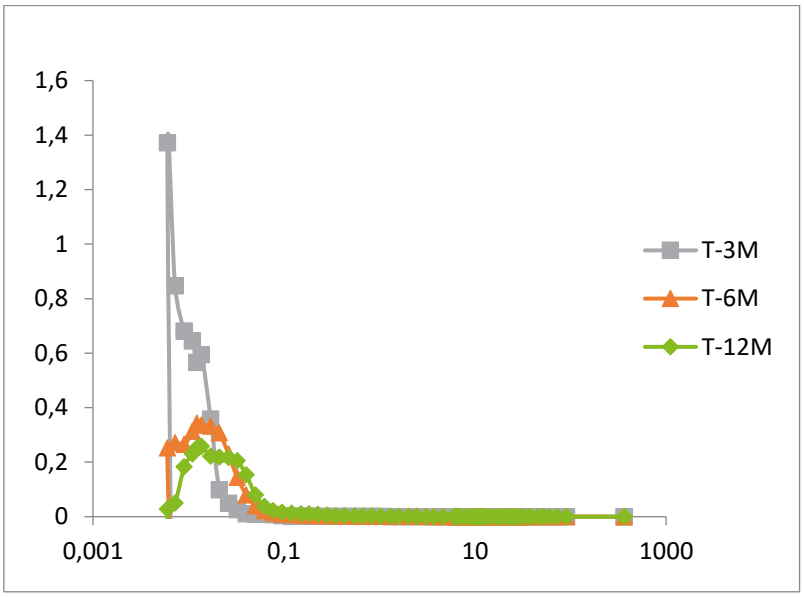


Figure 55 : Graphique montrant les résultats de la porosité au mercure - Témoin

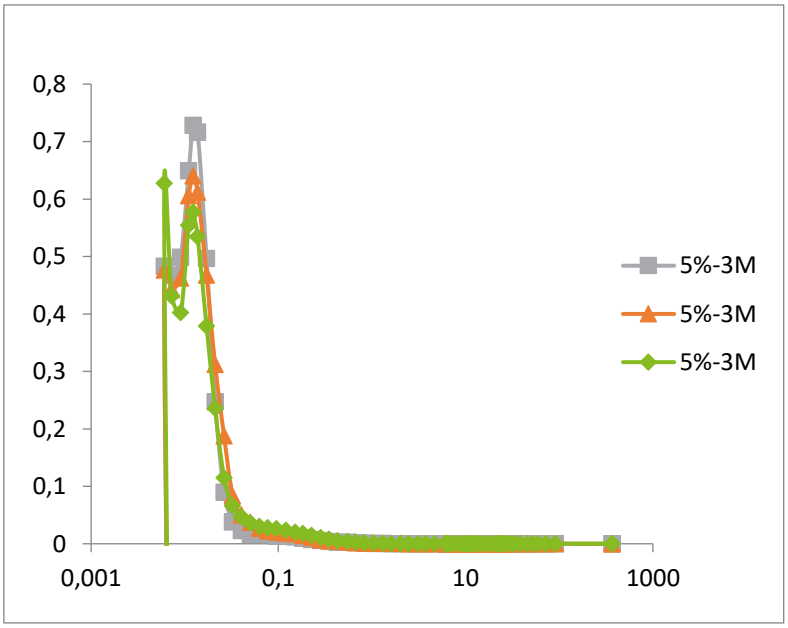


Figure 56 : Graphique montrant les résultats de la porosité au mercure – Sédiments 5 %

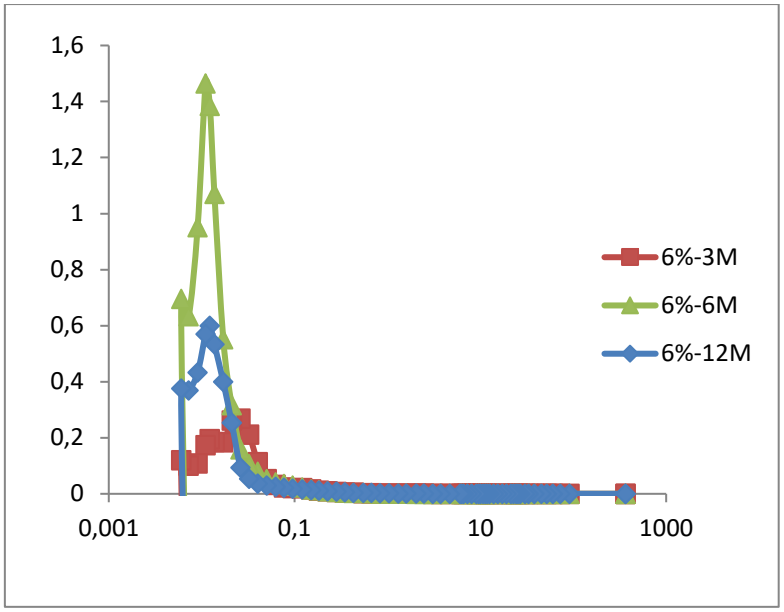


Figure 57 : Graphique montrant les résultats de la porosité au mercure – Sédiments 6 %

Réaction sulfatique externe

Temps (Jours)	1	8	15	22	29	36	43	50	57	64	71
Témoin Essai n°1	1,97	1,73	1,46	1,23	1,11	1,11	1,11	0,85	0,76	0,64	0,40
Témoin Essai n°2	2,17	1,67	1,39	0,96	0,77	0,77	0,77	0,54	0,40	1,16	0,06
Témoin Essai n°3	2,30	1,97	1,66	1,37	1,16	1,16	1,16	0,86	0,70	-0,40	0,22
Séd 5 % Essai n°1	2,49	2,30	2,07	1,90	1,59	1,58	1,58	1,31	1,29	1,05	0,79
Séd 5 % Essai n°2	2,40	2,11	1,91	1,69	1,59	1,59	1,59	3,75	1,32	1,15	0,95
Séd 5 % Essai n°3	2,32	2,04	1,83	1,62	1,50	1,50	1,50	-1,22	1,23	1,06	0,90
Séd 6 % Essai n°1	2,21	1,96	1,72	1,42	1,18	1,18	1,18	0,81	0,68	0,50	0,28
Séd 6 % Essai n°2	2,15	1,93	1,65	1,26	0,99	0,99	0,99	0,67	0,53	0,35	0,15
Séd 6 % Essai n°3	2,18	2,00	1,76	1,37	1,04	1,04	1,04	0,67	0,52	0,40	0,17
Témoin moy	2,14	1,79	1,50	1,18	1,02	1,02	1,02	0,75	0,62	0,47	0,23
Séd 5% moy	2,40	2,15	1,93	1,74	1,56	1,56	1,56	1,28	1,28	1,08	0,88
Séd 6% moy	2,18	1,96	1,71	1,35	1,07	1,07	1,07	0,72	0,58	0,42	0,20

Tableau 33 : Résultats de l'essai de la réaction sulfatique externe

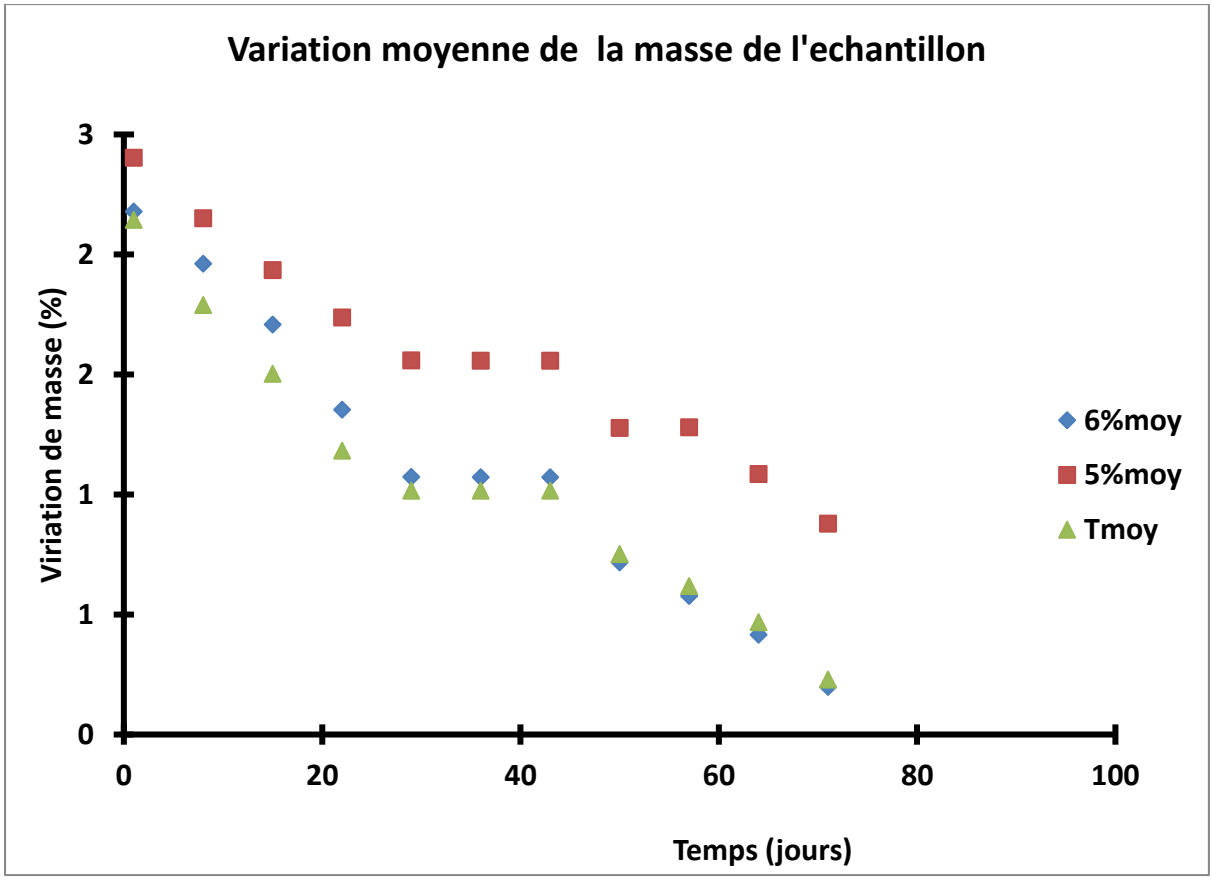


Figure 58 : Graphique montrant les résultats de l'attaque sulfatique externe

Résistance à la compression

Témoin						
	Essai n°1	Essai n°2	Essai n°3	Essai n°4	**Moyenne**	Ecart type
Immersion 3 mois	31,06	32,31	25,06	39,67	**32,03**	3,97
Immersion 6 mois	30,56	29,91	25,06	39,67	**31,30**	4,19
Immersion 12 mois	13,99	22,55	35,72	32,82	**26,27**	8,00
Hydrocyls 5 % sédiments						
	Essai n°1	Essai n°2	Essai n°3	Essai n°4	**Moyenne**	Ecart type
Immersion 3 mois	21,87	28,12	21,57	21,9	**23,37**	2,38
Immersion 6 mois	20,88	17,78	25,93	21,9	**21,62**	2,29
Immersion 12 mois	30,1	27,13	20,84	23,3	**25,34**	3,27
Hydrocyls 6 % sédiments						
	Essai n°1	Essai n°2	Essai n°3	Essai n°4	**Moyenne**	Ecart type
Immersion 3 mois	26,56	23,53	21,9	21,43	**23,36**	1,69
Immersion 6 mois	21,43	39,8	28,87	28,87	**29,74**	5,03
Immersion 12 mois	39,8	32,17	24,7	34,7	**32,84**	4,41

Tableau 34 : Résultats de l'essai de compression (en MPa)

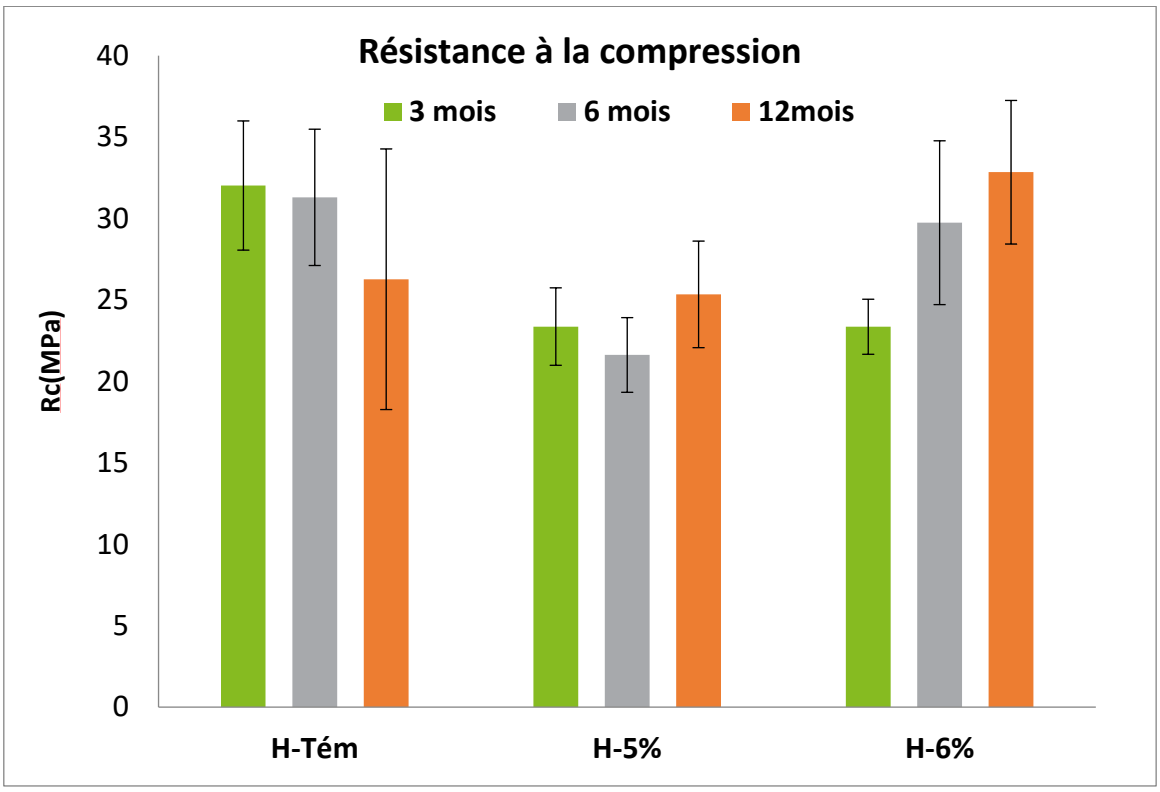


Figure 59 : Graphique montrant les résultats des résistances mécaniques

Lixiviation sur monolithe

	Ba	Cr	Cu	Zn	Cl^-	F^-	$SO4^-$
T	0.01	0.01	0.02	<0,01	16	1.0	19
5%	0.05	0.01	0.05	0.04	11	1.0	13
6%	0.1	0	0.08	0.03	11	< 1,0	21
T	0.02	0.01	0.03	<0,01	20	1.6	30
5%	0.03	0.01	0.06	0.07	12	1.0	18
6%	0.04	0.01	0.04	0.05	11	1.0	14
T	0.02	0.01	0.04	0.05	21	1.4	39
5%	0.02	0.01	0.07	<0,01	13	1.1	22
6%	0.10	0.01	0.08	0.02	12	1.6	19
T	0.02	0.02	0.04	0.03	23	1.6	47
5%	0.02	0.02	0.07	<0,01	14	1.3	27
6%	0.04	0.02	0.03	<0,01	14	1.3	24
T	0.02	0.02	0.03	<0,01	28	1.7	54
5%	0.03	0.02	0.06	<0,01	16	1.8	35
6%	0.04	0.02	0.03	0.01	16	1.4	32
T	0.03	0.02	0.04	0.06	34	1.7	63
5%	0.03	0.03	0.05	0.03	17	1.5	40
6%	0.04	0.02	0.03	0.07	16	1.4	33
ISDI*	20	0.5	2	4	80	10	1000
ISDND*	100	10	50	50	15 000	150	20 000
ISDD*	300	70	100	200	25 000	500	50 000

Tableau 35 : Résultats de la lixiviation sur monolithe

8. PHASE 5 : ETUDE DU POTENTIEL DE RECYCLABILITE DES PRODUITS

Livrable	Rapport de l'étude du potentiel de recyclabilité des produits

Le cycle de vie d'un produit se décompose selon les étapes suivantes : extraction – fabrication – transport – usage – fin de vie. Dans le cadre de cette étude, c'est la fin de vie du produit qui nous intéresse. La fin de vie d'un produit correspond au moment où celui-ci cesse d'être utilisé ou arrête de fonctionner et ne peut être réparé ou mis à jour.

De manière générale, dans le cadre des modes actuels de production et de consommation, les produits en fin de vie sont jetés et éliminés. Ainsi, l'objectif est de repenser ces modes de production et de consommation à travers la mise en place d'une démarche d'économie circulaire. L'économie circulaire peut se décliner sous différents aspects : la consommation responsable, l'allongement de la durée d'usage, le recyclage, l'écoconception, etc.

Cette étude a donc pour objectif de définir le potentiel de recyclabilité des produits (hydrocyls et coulis autocompactant) en fin de vie. Cette phase consistera à étudier le maintien des performances environnementales et mécaniques des ouvrages mis en œuvre à l'échelle 1 à l'issue d'une année de suivi.

8.1 PLAN D'ACTION DE RECYCLABILITE

Lorsqu'un produit arrive en fin de vie, il devient un déchet. Dans un premier temps, afin de déterminer la typologie du déchet en question, des essais de lixiviation doivent être réalisés. Ces essais vont permettre de déterminer le caractère inerte ou non des matériaux analysés. Un déchet est considéré comme étant inerte lorsqu'il ne subit « aucune modification physique, chimique ou biologique importante, qu'il ne se décompose pas, ne brûle pas, ne produit aucune réaction physique ou chimique, n'est pas biodégradable et ne détériore pas les matières avec lesquelles il entre en contact d'une manière susceptible d'entrainer des atteintes à l'environnement ou à la santé humaine ».

Une fois la typologie des déchets identifiée, les matériaux devront être caractérisés en vue de proposer les filières adaptées pour intégrer les produits en fin de vie dans des boucles d'économie circulaire. Les filières du secteur du BTP seront privilégiées et plus spécifiquement les filières remblais et couche de forme.

8.2 MODE OPERATOIRE

8.2.1 PROTOCOLE DE PRELEVEMENT

Afin de réaliser cette étude du potentiel de recyclabilité des produits, des carottages seront effectués au sein de l'ouvrage témoin ainsi qu'au sein de l'ouvrage à base de sédiments du chantier « coulis autocompactant » situé à Bondues. La localisation des prélèvements sera déterminée selon l'emplacement de la canalisation en grès présente au sein de l'ouvrage afin

de ne pas l'endommager lors de la réalisation des carottages. Pour chaque ouvrage, 20 kg de coulis seront prélevés.

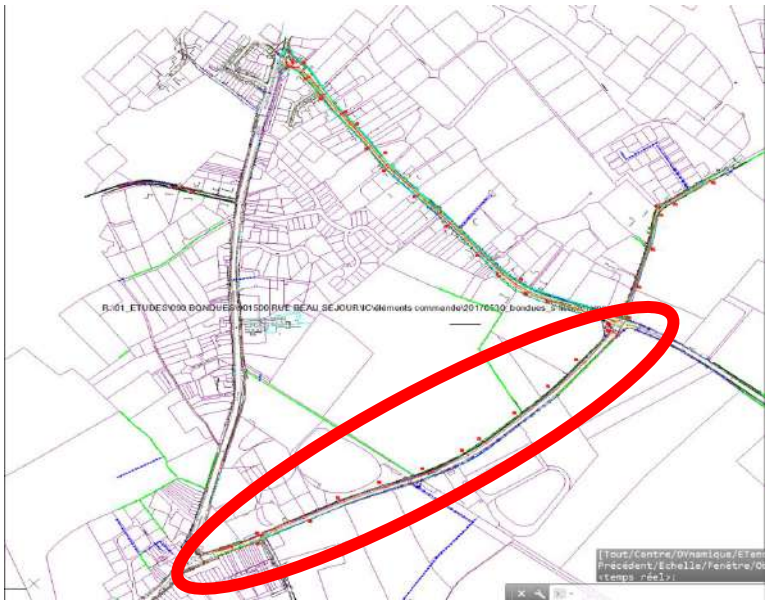


Figure 60 : Localisation du chantier expérimental de Bondues

En ce qui concerne les ouvrages « chaussée réservoir », les carottages ne pourront pas être réalisés. De ce fait, un traitement permettant le vieillissement des hydrocyls sera effectué sur des hydrocyls témoins et sur des hydrocyls à base de sédiments afin d'obtenir un état d'usure similaire à celui des hydrocyls présents dans les ouvrages expérimentaux.

Pour chaque formulation (témoin + sédiment), 150 kg d'hydrocyls devront être soumis à ce protocole de vieillissement. Cette quantité de matériaux est nécessaire à la fois pour la mise en œuvre du protocole de recyclabilité mais également pour la réalisation des essais de durabilité dans le cadre de l'étude du suivi environnemental et mécanique des ouvrages.

8.2.2 PROTOCOLE DE VIEILLISSEMENT

Afin d'aboutir à un vieillissement des hydrocyls, un cycle de mouillage / séchage sera mis en œuvre. Ce cycle correspondra à une alternance de :

- 2 semaines d'immersion des hydrocyls dans de l'eau de pluie ;
- 2 semaines de séchage des hydrocyls à l'air libre.

Figure 61 : Immersion / séchage à l'air libre des hydrocyls

Ce traitement va permettre d'entrainer un vieillissement des hydrocyls afin d'obtenir un état d'usure similaire à celui des hydrocyls présents dans les ouvrages expérimentaux. Le traitement sera réalisé en parallèle du suivi environnemental de l'ouvrage « coulis autocompactant » et pourra être interrompue dès les premiers signes de fragilisation des matériaux.

Les contraintes mécaniques auxquelles sont soumis les hydrocyls au sein des ouvrages ne seront pas reproduites dans le cadre de ce protocole. En effet, ce sont principalement les interactions entre l'eau et le béton qui vont engendrer la dégradation des matériaux lié à des phénomènes chimiques.

Ce protocole de vieillissement sera réalisé sur les hydrocyls témoin et les hydrocyls présentant un taux de substitution des sédiments de 5 % et 6 % de la composition globale des hydrocyls. Ce protocole débutera le 4 novembre 2019 pour une durée maximale de 12 mois.

8.2.3 ECHEANCES DE PRELEVEMENT

Les carottages sur les ouvrages expérimentaux de Bondues devront être réalisés à l'issue des 12 mois de suivi environnemental. Ce suivi a débuté le 8 octobre 2019. Les carottages pourront donc être réalisés à partir du 8 octobre 2020.

En ce qui concerne les hydrocyls, l'arrêt du protocole de vieillissement se fera au plus tard le 4 novembre 2020.

8.2.4 DETERMINATION DU CARACTERE INERTE DES MATERIAUX EN FIN DE VIE

PRINCIPE DE L'ESSAI

Une partie des échantillons prélevés pour chaque application (hydrocyls et coulis autocompactant) sera soumise à un test de lixiviation selon la norme « NF EN 12457-2 : Caractérisation des déchets – Lixiviation – Essai de conformité pour lixiviation des déchets

fragmentés et des boues – Essai en bâchée unique avec un rapport L/S de 10 L/kg et une granularité inférieure à 4 mm ».

Pour ce faire, une étape préalable de concassage des matériaux sera nécessaire afin d'obtenir des échantillons de granulométrie inférieure à 4 mm (les échantillons ne devront en aucun cas être finement broyés). Ces échantillons concassés et séchés (0,090 kg) seront ensuite placés dans des flacons et recouverts par un volume d'eau déminéralisée de telle sorte que le ratio L/S soit égal à 10 L/kg.

Ces flacons seront ensuite mis en agitation constante pendant 24h. A l'issue de ces 24h d'agitation, et suite à un temps de repos permettant la décantation des particules, un éluât sera récupéré par filtration à 0.45 µm. Cet éluât sera caractérisé du point de vue physique (température, conductivité, pH) et chimique selon des méthodes normalisées appropriées.

INTERPRETATION DES RESULTATS

Afin de déterminer le caractère inerte ou non des matériaux analysés, les seuils d'admission en Installation de Stockage de Déchets Inertes (ISDI) fixés par l'arrêté du 12 décembre 2014 seront utilisés et permettront d'interpréter les résultats des lixiviations réalisées.

Les seuils présentés dans le tableau ci-dessous correspondent aux seuils d'admission en installation de stockage de déchets inertes (ISDI), inertes + (ISDI+), non dangereux (ISDND) et dangereux (ISDD). Pour que les sous-produits puissent être considérés inertes, ils doivent respecter les seuils ISDI fixés par l'arrêté du 12 décembre 2014[1].

Paramètre	Unité	Classe 3 (Seuil ISDI)	Classe 3+ (SEUIL ISDI+)	Classe 2 (Seuil ISDND)	Classe 1 (Seuil ISDD)
Analyses sur brut					
COT	mg/kg	< 30 000 (1)	< 60 000	< 50 000 (2)	
HCT C10 - C40	mg/kg	< 500	< 500	< 5 000	
BTEX	mg/kg	< 6	< 6	< 30	
16 HAP	mg/kg	< 50	< 50	< 100	
PCB	mg/kg	< 1	< 1	< 50	
Analyses sur lixiviat					
Matière sèche	%	-	> 30	> 30	> 30
pH	-	-	> 4	-	Entre 4 et 13
Arsenic	mg/kg	< 0,5	< 1,5	< 2	< 25
Baryum	mg/kg	< 20	< 60	< 100	< 300
Cadmium	mg/kg	< 0,04	< 0,12	< 1	< 5

[1] *Arrêté du 12 décembre 2014 NOR : DEVP1412523A relatif aux conditions d'admission des déchets inertes dans les installations de transit et de stockage de déchets inertes.*

Paramètre	Unité	Classe 3 (Seuil ISDI)	Classe 3+ (SEUIL ISDI+)	Classe 2 (Seuil ISDND)	Classe 1 (Seuil ISDD)
Chrome total	mg/kg	< 0,5	< 1,5	< 10	< 70
Cuivre	mg/kg	< 2	< 6	< 50	< 100
Mercure	mg/kg	< 0,01	< 0,03	< 0,2	< 2
Molybdène	mg/kg	< 0,5	< 1,5	< 10	< 30
Nickel	mg/kg	< 0,4	< 1,2	< 10	< 40
Plomb	mg/kg	< 0,5	< 1,5	< 10	< 50
Antimoine	mg/kg	< 0,06	< 0,18	< 0,7	< 5
Sélénium	mg/kg	< 0,1	< 0,3	< 0,5	< 7
Zinc	mg/kg	< 4	< 12	< 50	< 200
Cyanures	mg/kg	-	< 6	-	
Fluorures	mg/kg	< 10	< 30	< 150	< 500
Sulfates	mg/kg	< 1 000 (3) *	< 3 000	< 20 000	
Chlorures	mg/kg	< 800 *	< 2 400	< 15 000	
Fraction soluble	mg/kg	< 4 000 (4) *	< 12 000	< 60 000 (5)	
Ind. Phénols	mg/kg	< 1	< 3	< 10	
COT sur éluat	mg/kg	< 500 (6)	< 500	< 800 (7)	< 1000 (8)

Tableau 36 : Seuils d'acceptabilité en installation de stockage

Ces seuils sont relatifs à des lixiviations faites sur matériaux bruts.

Les résultats de la lixiviation sur brut des éco-produits hydrocyls 5% et 6% ainsi que des témoins hydrocyl et coulis sont présentés sur le tableau ci-dessous.

Paramètre	Unité	Seuils inertes (ISDI)	Hydrocyl Témoin	Hydrocyl 5%	Hydrocyl 6%	Coulis témoin
Analyses sur brut						
Matière sèche sur brut	% massique	> 30	98,2	97,5	96,4	98,3
COT sur brut	mg/kg MS	< 30 000	11 000	3 800	7 900	70 000
pH (KCl)	-	-	12.7	12.7	12.7	10.0
Température pour mes. pH	°C	-	19.2	19.4	19.3	19.3
Composés aromatiques volatils						
BTEX totaux	mg/kg MS	< 6	<0.25	<0.25	<0.25	0.31
Hydrocarbures aromatiques polycycliques						
Somme des HAP (10) VROM	mg/kg MS	< 50	<0.20	0.87	0.29	2.8
Somme des HAP (16) - EPA	mg/kg MS	< 50	<0.32	1.3	0.42	4.6
Polychlorobiphényls (PCB)						
PCB totaux (7)	µg/kg MS	< 1 000	<14	<14	<14	79
Hydrocarbures totaux (HCT)						

Paramètre	Unité	Seuils inertes (ISDI)	Hydrocyl Témoin	Hydrocyl 5%	Hydrocyl 6%	Coulis témoin
Hydrocarbures totaux C10-C40	mg/kg MS	< 500	560	70	250	55
Lixiviation						
L/S	ml/g	-	10.03	10.13	10.03	9.99
pH final ap. lix.	-	-	12.00	12.00	13.00	9.90
Température pour mes. pH	°C	-	19.1	18.8	18.6	18.5
Conductivité (25°C) ap. lix.	µS/cm	-	4430	4220	7160	627
Eluat COT						
COD, COT sur éluat	mg/kg MS	< 500	24	110	72	230
Eluat métaux						
Antimoine	mg/kg MS	< 0,06	<0.039	<0.039	<0.039	0.11
Arsenic	mg/kg MS	< 0,5	<0.05	<0.05	<0.05	0.17
Baryum	mg/kg MS	< 20	1.9	1.5	3.6	0.23
Cadmium	mg/kg MS	< 0,04	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004
Chrome	mg/kg MS	< 0,5	0.21	0.075	0.059	0.37
Cuivre	mg/kg MS	< 2	0.063	0.55	0.19	0.84
Mercure	mg/kg MS	< 0,01	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
Plomb	mg/kg MS	< 0,5	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Molybdène	mg/kg MS	< 0,5	0.054	0.052	<0.05	0.43
Nickel	mg/kg MS	< 0,4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Sélénium	mg/kg MS	< 0,1	<0.039	<0.039	<0.039	0.10
Zinc	mg/kg MS	< 4	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
Eluat composés inorganiques						
Fraction soluble	mg/kg MS	< 4 000	13900	12000	17900	5570
Eluat phénols						
Indice phénol	mg/kg MS	< 1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Eluat diverses analyses chimiques						
Fluorures	mg/kg MS	< 10	3.7	4.1	2.8	14
Chlorures	mg/kg MS	< 800	220	320	340	60
Sulfates	mg/kg MS	< 1 000	99.3	78.4	18.5	2510

Tableau 37 : Résultats de la lixiviation réalisée sur les hydrocyls témoin, les éco-produits hydrocyls 5% et hydrocyls 6% et le coulis témoin

Les résultats de la lixiviation menée sur les produits, indiquent que les formulations possèdent plusieurs critères déclassants et ne peuvent donc être accepté en ISDI (Installation de Stockage de Déchets Inertes). En effet, les résultats de la fraction soluble pour l'ensemble

des échantillons est strictement supérieure 4000 mg/kg MS. De ce fait, l'ensemble des échantillons sont classés en ISDND (Installation de Stockage de Déchets Non-Dangereux).

8.2.5 DETERMINATION DU POTENTIEL DE RECYCLABILITE DES MATERIAUX EN FIN DE VIE

CAHIER DES CHARGES DE CARACTERISATION – FILIERE REMBLAIS ET COUCHE DE FORME

Une fois le caractère inerte ou non des matériaux déterminés, les échantillons seront préparés via un concassage selon une granulométrie 0/80 mm pour la réalisation d'une caractérisation selon le cahier des charges des filières remblais et couche de forme.

Les essais à réaliser sont les suivants :

Essais	Normes
Fraction 0/80 mm	
Granularité	NF P 94-056
Sulfates solubles dans l'eau	NF EN 1744-1, art. 10.2
Teneur pondérale en eau	NF EN 1097-5
Propreté VBS	NF P 94-068
Los Angeles	NF EN 1097-2
Micro-Deval	NF EN 1097-1
Lixiviation	NF EN 1744-3

Tableau 38 : Cahier des charges de la caractérisation pour les filières remblais et couche de forme

Une fois le caractère inerte ou non des matériaux déterminés, les échantillons de coulis autocompactant seront préparés via un concassage selon une granulométrie 0/150 mm pour la réalisation d'une caractérisation selon le cahier des charges de la filière remblais.

Les essais à réaliser sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Essais	Normes
Fraction 0/150 mm	
Granularité	NF P 94-056
Sulfates solubles dans l'eau	NF EN 1744-1, art. 10.2
Teneur pondérale en eau	NF EN 1097-5
Lixiviation	NF EN 1744-3

Tableau 39 : Cahier des charges de la caractérisation pour la filière remblais

En ce qui concerne l'application hydrocyls, les échantillons seront préparés via un concassage selon une granulométrie 0/80 mm pour la réalisation d'une caractérisation selon le cahier des charges des filières remblais et couche de forme.

Les essais à réaliser sont les suivants :

Essais	Normes
Fraction 0/80 mm	
Granularité	NF P 94-056
Sulfates solubles dans l'eau	NF EN 1744-1, art. 10.2
Teneur pondérale en eau	NF EN 1097-5
Propreté VBS	NF P 94-068
Los Angeles	NF EN 1097-2
Micro-Deval	NF EN 1097-1
Lixiviation	NF EN 1744-3

Tableau 40 : Cahier des charges de la caractérisation pour les filières remblais et couche de forme

RESULTATS DE L'ETUDE DE RECYCLABILITE

Pour les hydrocyls

L'étude de recyclabilité s'est portée sur les formulations à base de sédiments (5 % et 6 %) et la formulation témoin. Les résultats sont présentés ci-dessous.

Essais	Résultats		
	Témoin	5 % sédiments	6 % sédiments
	Fraction 0/80 mm		
Granularité	Dmax = 80 mm Passant à 80 µm = 0,3 % Passant à 2 mm = 3 %	Dmax = 80 mm Passant à 80 µm = 0,1 % Passant à 2 mm = 1,5 %	Dmax = 80 mm Passant à 80 µm = 0,4 % Passant à 2 mm = 7 %
Sulfates solubles dans l'eau	0,22 %	0,25 %	0,23 %
Teneur pondérale en eau	2,9 %	3,42 %	3,19 %
Propreté VBS	0,01	0,00	0,01
Los Angeles	30	34	30
Micro-Deval	24	26	24
Lixiviation	Non conforme*	Conforme pour un usage de type 1*	Conforme pour un usage de type 1*
Les résultats sont montrés en *Annexe 12 : Résultats environnementaux (Guide Cerema – Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière).*			

Tableau 41 : Résultats de la caractérisation pour les filières remblais et couche de forme

Pour les coulis autocompactants

L'étude de recyclabilité s'est portée sur la formulation à base de sédiment. Les résultats sont présentés ci-dessous.

Essais	Résultats
Fraction 0/150 mm sédiments	
Granularité	Dmax = 14 mm Passant à 80 µm = 61,4 %
Propreté VBS	0,08
Sulfates solubles dans l'eau	0,44 %
Teneur pondérale en eau	2,86 %
Lixiviation	Non conforme *
Les résultats sont montrés en *Annexe 12 : Résultats environnementaux (Guide Cerema – Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière).*	

Tableau 42 : Résultats de la caractérisation pour la filière remblais

INTERPRETATION DES RESULTATS

Afin d'interpréter les résultats de cette caractérisation, le guide technique « Réalisation des remblais et des couches de forme » réalisé par le SETRA ainsi que le guide « Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière » réalisé par le CEREMA fixent des exigences à respecter pour les graves recyclées.

Pour les hydrocyls

Les résultats pour les trois formulations sont similaires. Selon le guide technique « Réalisation des remblais et des couches de forme » réalisé par le SETRA, les matériaux sont classés D31 (cf. tableau ci-dessous). Ils sont donc conformes pour une utilisation en remblai ou couche de forme.

D'autre part, la lixiviation montre des résultats environnementaux prometteurs pour un usage de type 1 soit un usage de type remblai sous ouvrage, couche de forme, couche de fondation, couche de base et couche de liaison.

Pour les coulis autocompactants

Selon le guide technique « Réalisation des remblais et des couches de forme » réalisé par le SETRA, les matériaux sont classés D31 (cf. tableau ci-dessous). Ils sont donc conformes pour une utilisation en remblai ou couche de forme.

D'autre part, la lixiviation montre des résultats environnementaux non prometteurs avec des dépassements de seuils. Il serait donc nécessaire de pousser davantage les études sur cette application.

← NIVEAU DE CLASSIFICATION NECESSAIRE POUR L'EMPLOI EN REMBLAI →

← NIVEAU DE CLASSIFICATION NECESSAIRE POUR L'EMPLOI EN COUCHE DE FORME →

Classement selon nature					Classement selon le comportement		
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous-classe fonction de la nature	Caractères principaux	Valeurs seuils retenues		Sous-classe
VBS ≤ 0,1 et Tamisat à 80 µm ≤ 12%	D Sols insensibles à l'eau	Dmax ≤ 50 mm et tamisat à 2 mm > 70%	D_1 Sables alluvionnaires propres, sables de dune...	Ces sols sont sans cohésion et perméables. Leur granulométrie, souvent mal graduée et de petit calibre, les rend très érodables et d'une "traficabilité" difficile.	Leur emploi en couche de forme sans traitement aux LH nécessite, par ailleurs, la mesure de leur résistance mécanique (Los Angeles, LA, et/ou micro Deval en présence d'eau, MDE) ou friabilité des sables (FS).	FS ≤ 60	D_{11}
						FS > 60	D_{12}
		Dmax ≤ 50 mm et tamisat à 2 mm ≤ 70%	D_2 Graves alluvionnaires propres, sables...	Ces sols sont sans cohésion et perméables. Après compactage ils sont d'autant moins érodables et d'autant plus aptes à supporter le trafic qu'ils sont bien gradués.		LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	D_{21}
						LA > 45 ou MDE > 45	D_{22}
		Dmax > 50 mm	D_3 Graves alluvionnaires propres...	Matériaux sans cohésion et perméables, inadaptés au malaxage en vue d'un traitement répondant à une qualité "couche de forme". En partie supérieure des terrassements ils peuvent poser des problèmes de réglage, de traficabilité et d'exécution de tranchées diverses.		LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	D_{31}
						LA > 45 ou MDE > 45	D_{32}

Figure 62 : Extrait du guide Réalisation des remblais et des couches de forme » réalisé par le SETRA

8.3 CONCLUSION

A l'issue de cette étude, les résultats de la caractérisation réalisée sur les produits « hydrocyls » et « coulis autocompactant » permettent de valider le potentiel de recyclabilité selon les filières de valorisation étudiées. Ces résultats permettent également de valider la pertinence de la création d'écoproduits à base de sédiments dans le cadre d'une démarche d'économie circulaire.

9. PHASE 6 : ANALYSE DES CONDITIONS DE MISE SUR LE MARCHE

Livrable	Rapport de l'analyse des conditions de mise sur le marché

Un avis du ministère de l'Ecologie, publié le 13 janvier 2016 au Journal Officiel, vient préciser le statut juridique de ce qui est produit par une installation dont les intrants sont en tout ou partie des déchets. Il envisage deux cas, selon si l'on a affaire à une installation de traitement de déchets ou selon s'il s'agit d'une installation de production utilisant des déchets en substitution des matières premières.

Dans les deux cas, une sortie du statut de déchet est possible, permettant l'application de la législation liée aux produits, plus souple que celle applicable aux déchets, notamment en termes de circulation et de contraintes administratives. Mais, dans un cas, il s'agit d'une procédure de sortie lourde, répondant à un formalisme certain. Dans l'autre, d'une procédure implicite, qui devrait permettre de favoriser grandement le recyclage.

L'objectif de cette phase est de réaliser une étude pour l'évaluation de la conformité aux exigences normatives des 3 applications visées pour la valorisation des sédiments : hydrocyls, coulis autocompactant et grave traitée.

Ces 3 applications regroupent 2 familles d'usages :

- La technique routière (coulis autocompactant et grave traitée) qui intègre déjà des matières premières secondaires (cendres, laitiers, etc.) et dont les exigences sont relatives à l'usage final ;
- Les produits préfabriqués en béton (hydrocyls) qui nécessitent une sortie du statut de déchet.

Il s'agit donc d'étudier et d'établir les conditions de mise sur le marché du produit fini incluant des sédiments. Cette étude sera spécifique à la fois aux applications visées et au process industriel pour la construction de ces applications.

9.1 SORTIE DU STATUT DE DECHET

Lorsque les sédiments sont extraits de la voie d'eau, ils acquièrent le statut de déchet selon la Directive Cadre sur les déchets 2008/98/CE du 19 novembre 2008 et doivent être gérés comme tel en fonction de leur caractère dangereux – non dangereux et inerte – non inerte.

Afin de pouvoir industrialiser les filières de valorisation des sédiments, une sortie du statut de déchet est nécessaire. La sortie du statut de déchet est une des dispositions prévues par la Directive Cadre Déchet.

9.1.1 SORTIE EXPLICITE DU STATUT DE DECHET

La sortie explicite du statut de déchet est possible lorsque celle-ci est prévue dans un règlement européen ou un arrêté ministériel et lorsque l'intégralité des critères fixés dans ces règlements et arrêtés sont respectés. La ferraille, le verre et le cuivre par exemple, en bénéficient.

Concernant les sédiments, une réflexion est menée autour de la possibilité d'une sortie explicite du statut de déchet. En effet, le Ministère de la Transition Ecologique et solidaire a ouvert, le 27 mai 2019, une consultation publique sur le projet d'arrêté fixant les critères de sortie du statut de déchet pour les sédiments ayant fait l'objet d'une préparation en vue d'une utilisation en génie civil ou en aménagement. Ce projet d'arrêté fixe donc les critères à respecter pour permettre une sortie du statut de déchet des sédiments, en s'appuyant sur des opérations de contrôle et si nécessaire, de traitement. Néanmoins, cette sortie du statut de déchet est au stade de projet. Cette possibilité n'est donc pas opérationnelle pour le moment.

9.1.2 SORTIE IMPLICITE DU STATUT DE DECHET

La possibilité d'une sortie implicite du statut de déchet, c'est-à-dire sans qu'aucun règlement ou arrêté ne la prévoit, a été rapidement consacrée par la jurisprudence européenne (CJUE, Affaire C-444/00, *Mayer Parry Recycling Ltd*).

L'avis ministériel du 13 janvier 2016 est ainsi venu expliciter cette possibilité s'agissant des matériaux produits par une installation de production utilisant des déchets en substitution de matières premières.

Pour permettre cette sortie implicite du statut de déchet, les conditions suivantes doivent être démontrées :

- Déchets utilisés en substitution de matières premières d'origine extractive ;
- Les substances, mélanges, articles ou assemblages d'articles produits par l'installation doivent **respecter les dispositions des règlements REACH et CLP** ;
- S'il s'agit de substances et de mélanges, ils doivent **être similaires** à la substance ou au mélange qui aurait été produit sans avoir recours à des déchets ;

- Les substances, mélanges, articles ou assemblages d'articles doivent avoir été produits dans une « **installations de production** », et plus précisément dans une installation inscrite à la nomenclature des ICPE (qu'elles soient soumises à un régime d'autorisation, d'enregistrement ou de déclaration ou non) et dont l'intitulé de la rubrique comprend les termes exacts « production de… », « fabrication de… », « préparation de… », « élaboration de… » ou « transformation de… »[2].

Cette sortie implicite du statut de déchet rend ainsi possible la valorisation des sédiments dans les installations de production utilisant les déchets en substitution des matières premières d'origine extractive.

Dans ce cadre, un registre doit être tenu par les installations à présenter à l'administration en cas de contrôle. Ce registre doit répertorier :

- Identification des lots de déchets (quantité, origine, caractérisation),
- Identification des lots de produits fabriqués à partir des déchets (quantité, traçabilité).

9.1.3 REGLEMENTS REACH ET CLP

La sortie du statut de déchet permet :

- Une rupture de la responsabilité du producteur des déchets ;
- Un allègement des obligations en termes de traçabilité (registres, BSDD, TTD) ;
- De ne plus être soumis à la réglementation déchet en ce qui concerne le stockage des matières valorisées.

Cependant, cette sortie du statut de déchet entraine également le respect de la réglementation relative aux produits telles que les réglementations REACH et CLP notamment.

Afin de mieux comprendre les obligations liées à ces règlements, le cabinet Skov Avocat a été missionné par Néo-Eco afin de réaliser une note d'analyse en prenant l'exemple des hydrocyls.

---

[2] *Cette condition est issue d'une surtransposition de la Directive Déchets et n'est pas exigée par la jurisprudence européenne qui consacre la possibilité de SSD implicite. Elle a donc été supprimée de l'article L. 541-4-3 du code de l'environnement, par la loi n°2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire (dite AGEC). En principe, elle ne peut donc plus être exigée par l'administration. Néanmoins, l'avis ministériel du 13 janvier 2016 étant toujours en vigueur et n'ayant pas été abrogé ou révisé à la suite de la loi AGEC, les administrations peuvent continuer à s'y référer pour exiger le passage par une ICPE de production. A noter qu'en cas de litige avec l'administration sur ce point, les installations n'étant pas des ICPE de production pourront contester cette condition devant le juge administratif.*

Cette étude apporte les conclusions suivantes :

1) REACH n'est pas applicable aux sédiments (déchets) mais est applicable aux hydrocyls (produits). La MEL n'est ni producteur, ni importateur, ni fournisseur des hydrocyls, et à ce titre, n'est pas responsable de l'application de REACH et n'est tenue d'aucune obligation à ce titre. C'est le producteur et fournisseur des hydrocyls qui est responsable de l'application de REACH et susceptible d'être soumis à diverses obligations.

2) Afin de respecter REACH, le producteur et fournisseur devra identifier les substances contenues dans les différents constituants des hydrocyls. Dans ce cadre, la MEL est tenue de fournir une caractérisation des sédiments suffisamment précise vis-à-vis des substances présentes dans ces derniers.

Selon les substances identifiées, le producteur pourra être tenu des obligations suivantes :

- Obligation d'enregistrement des substances contenues dans les hydrocyls et susceptibles d'être rejetées dans des conditions normales ou raisonnablement prévisibles d'utilisation (si la quantité totale de substance présente dans tous les hydrocyls à partir de laquelle elle est destinée à être rejetée est supérieure à 1 tonne par an) ;

- Obligation de notification à l'ECHA des substances SVHC inscrites sur la liste des substances candidates contenues dans les hydrocyls (si la substance est présente dans chaque hydrocyl dans une concentration supérieure à 0.1 % masse/masse ET que la substance est présente dans les articles produits dans des quantités supérieures au total à 1 tonne par an) ;

- Obligation de communication d'informations à la MEL sur les substances SVHC inscrites sur la liste des substances candidates éventuellement contenues dans les hydrocyls afin de garantir leur utilisation en toute sécurité (si la substance est présente dans un hydrocyl dans une concentration supérieure à 0.1 % masse/masse).

Si le producteur et fournisseur est tenu d'une obligation d'enregistrement ou de notification pour des substances contenues dans les hydrocyls, il pourra également être tenu de certaines obligations au titre du CLP.

9.2 APPLICATION « HYDROCYLS »

9.2.1 PRESENTATION DE LA FILIERE

Les hydrocyls sont des cylindres creux en béton préfabriqué de dimensions 80 mm de hauteur, 80 mm de section et 20 mm d'épaisseur. Il s'agit d'un matériau non gélif, inerte à la nature chimique des eaux de ruissellement, insensible aux rongeurs et sans risque de colmatage, compte tenu de la valeur élevée de l'indice de vide.

Dans un contexte d'imperméabilisation croissante des sols et de sous-dimensionnement des réseaux, la structure réservoir « Hydrocyls » a été conçue afin d'assurer trois fonctions

hydrauliques fondamentales : l'absorption des eaux précipitées, le stockage temporaire et la restitution du volume stocké à faible débit contrôlé. Ce système permet à la fois d'assurer les fonctions « route » et « assainissement » et ainsi d'optimiser l'espace urbain. Les possibles applications de ce type de système sont : parkings et zones de stationnement, voies faiblement circulées (zones 30), places et rues piétonnes, etc.

Il s'agit d'un système breveté par le CERIB (Centre d'Etude et de Recherches de l'Industrie du Béton). Les produits « hydrocyls » sont des produits qui ont été testés notamment avec des essais de perméabilité réalisés par le LNEC de Lisbonne sur un tronçon de structure reconstitué en laboratoire. Ces essais ont permis de déterminer un niveau de perméabilité des hydrocyls de 1 m/s, pour une capacité d'absorption de 600 litres par m^3 (soit une porosité de 60 %).

En ce qui concerne la mise en œuvre de ce type de système, les produits sont transportés en vrac et mis en place par couches successives (40 à 50 cm) nivelées au moyen d'engins de chantier traditionnels (pelle mécanique, rouleau vibrant). L'épaisseur minimale d'un système hydrocyls est de 40 cm. Le terrassement et la mise en œuvre des hydrocyls sont réalisés conformément au fascicule 70 et au fascicule 2 du CCTG-travaux. Les premiers chantiers de mise en œuvre de ce système ont été réalisés en 2001.

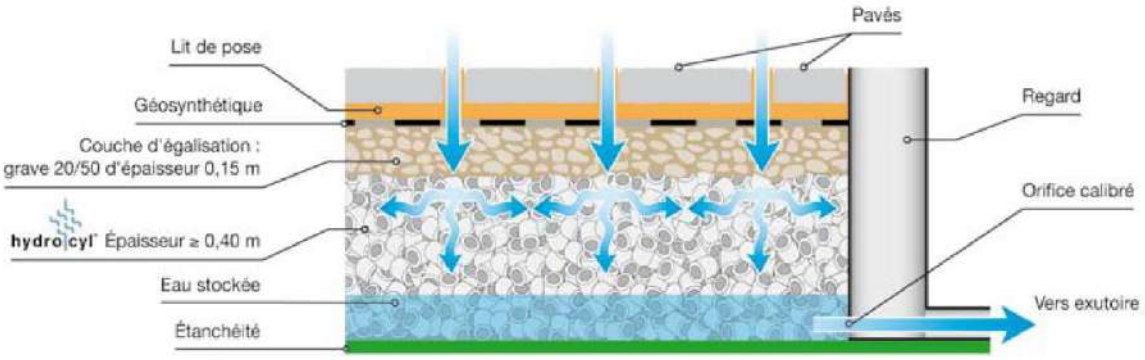


Figure 63 : Illustration d'une structure réservoir « Hydrocyls »

Dans le cadre du projet SEDIMEL, un ouvrage témoin et un ouvrage à base de sédiments ont été mis en œuvre Rue du Rhin à Tourcoing dans le cadre de la création d'un parking. L'ouvrage à base de sédiments présente un taux de substitution des sédiments de 6 % de la composition globale des hydrocyls.

Un autre chantier expérimental a été mis en œuvre dans le centre-ville de Leers avec la mise en place d'un ouvrage témoin et un ouvrage à base de sédiments. L'ouvrage à base de sédiments présente un taux de substitution des sédiments de 5 % de la composition globale des hydrocyls.

Dans les deux cas, la matière première substituée par des sédiments correspond à la fraction sableuse.

Figure 64 : Mise en œuvre du chantier de Leers

9.2.2 CADRES REGLEMENTAIRE ET NORMATIF

La norme « NF EN 13369 – règles communes pour les produits préfabriqués en béton » spécifie les prescriptions, les critères relatifs aux performances de base et l'évaluation de la conformité des produits préfabriqués non armés, armés et précontraints en béton léger, normal et lourd conformément à l'EN 206-1, sans quantité notable d'air occlus autre que l'air entraîné. Cette norme encadre un certain nombre de produits tels que les dalles, les pieux, ou encore le mobilier urbain en béton préfabriqué. Cependant, les hydrocyls et plus spécifiquement les produits en béton préfabriqué pour l'infiltration et le stockage des eaux pluviales ne sont pas couverts par cette norme. Des référentiels allemands (DIN 18507) et belges (BENOR PTV 122) existent pour ce type d'éléments (pavés drainants / poreux). **Néanmoins, à ce jour, aucune norme française équivalente n'est applicable.**

En dehors de l'aspect normatif, le système Hydrocyls s'inscrit dans le cadre réglementaire relatif à la gestion des eaux pluviales (de la Directive Européenne, loi sur l'eau, titre II du fascicule 70 du CCTG-travaux). Le titre II du fascicule 70 du CCTG-travaux s'applique à l'exécution des ouvrages de recueil, de stockage et de restitution des eaux pluviales dont notamment les chaussées à structure réservoir.

Dans ce document, il y est indiqué la typologie de matériaux et produits utilisables dans ce type d'ouvrage : produits faisant l'objet d'une norme et produits nouveaux bénéficiant d'un avis technique. Lorsque les matériaux et produits utilisés ne sont pas couverts par une norme et ne font pas l'objet d'un avis technique, ces derniers doivent être agréés par le maitre d'œuvre qui établira les conditions de réception à appliquer.

Le CERIB a produit plusieurs documents de référence relatifs à la réalisation d'une chaussée à structure réservoir constituée d'éléments hydrocyls :

- Rapport 89.E (2008) : « Chaussées à structure réservoir à base de produits creux de petites dimensions préfabriqués en béton – CCTP Type Travaux » ;
- Rapport 168.E (2008) : « Structure réservoir en béton – Cahier des charges de mise en œuvre des petits produits préfabriqués creux en béton » ;

- Rapport 220.E (2010) : « Chaussée à structure réservoir en béton : tenue au trafic » ;
- Rapport 222.E (2010) : « Chaussée à structure réservoir en béton : capacité de rétention hydraulique ».

Ces documents donnent des spécifications techniques pour la réalisation des chaussées à structure réservoir à base d'hydrocyls. Il y est notamment spécifié les normes ou caractéristiques que doivent respecter les produits et matériaux composant la structure réservoir. En ce qui concerne les produits creux préfabriqués en béton (hydrocyls), les caractéristiques à respecter sont : capacité de stockage du matériau de 600 l d'eau par m³ apparent, masse d'1t/m³, produit de forme tubulaire de diamètre extérieur et de longueur 80 mm et de diamètre intérieur 40 mm et résistance en compression minimum de 50 MPa.

Ainsi, les hydrocyls ne relèvent d'aucune norme produit et ne font pas l'objet d'un avis technique. Il n'y a donc aucune exigence vis-à-vis des matières premières employées pour la fabrication de ces matériaux, tant que les exigences liées au produit final sont respectées (masse / forme / performance mécanique). D'après le fascicule 70 du CCTG-travaux, titre II, l'emploi et les conditions de réception des hydrocyls relèvent de la responsabilité du MOE.

9.2.3 CONDITIONS DE SORTIE DU STATUT DE DECHET

Dans le cadre du projet SEDIMEL, les conditions nécessaires à une sortie implicite du statut de déchet ont été démontrées pour l'application « hydrocyls » :

Condition	Conformité
Déchet utilisé en substitution de matières premières d'origine extractive	Substitution de la fraction sableuse par des sédiments à hauteur de 5 à 6 % de la composition globale des hydrocyls
Respect des dispositions des règlements REACH et CLP	• C'est au producteur des produits finis de s'en assurer • MEL : fournisseur de déchets, soumis à la règlementation déchet (REACH non applicable aux déchets)
Produit à base de déchets similaire à un produit classique	• Innocuité environnementale validée à l'échelle laboratoire et à l'échelle terrain • Produits formulés répondant aux exigences minimales requises en termes de performances techniques
Fabrication en installation ICPE éligible	2522. Installation de fabrication de produits en béton par procédé mécanique

Tableau 43 : Sortie implicite du statut de déchet - application hydrocyls

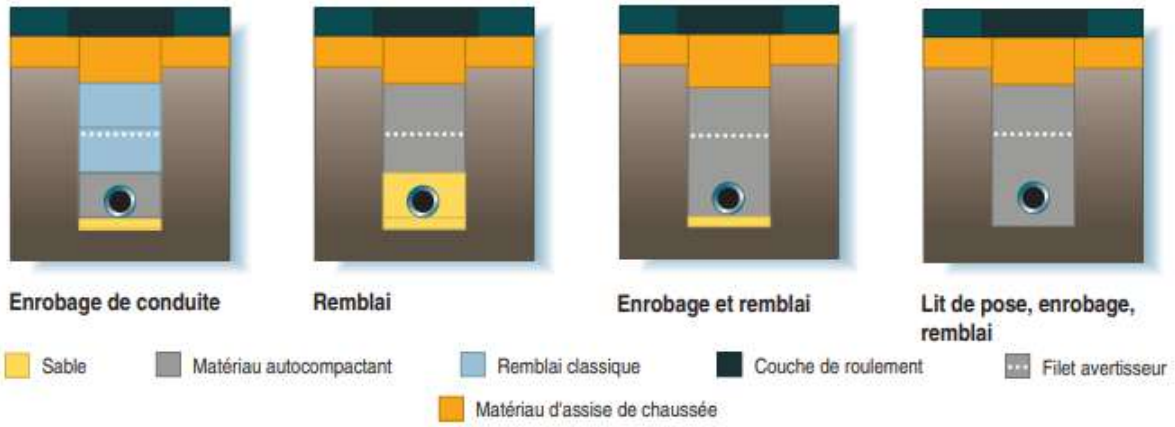
9.3 APPLICATION « COULIS AUTOCOMPACTANT »

9.3.1 PRESENTATION DE LA FILIERE

Le coulis autocompactant ou béton autoplaçant (BAP) est un béton très fluide, homogène et stable, qui se met en place sans vibration. Les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais et leur capacité de moulage, d'enrobage et de compaction par le seul effet de la gravité.

Ce sont des mélanges de matériaux divers (sables, gravillons, cendres volantes, fillers, etc.), de ciment ou d'un liant hydraulique en faible quantité (moins de 100 kg/m^3 dans la majeure partie des cas), d'eau et d'adjuvants. Cette faible proportion de liant leur donne leur caractère ré-excavable (nécessaire en cas d'intervention ultérieure pour la maintenance des réseaux).

L'un des domaines d'application privilégié des matériaux autocompactants est les tranchées étroites et encombrées. On distingue deux familles de produits : les produits essorables[3] et les produits non essorables[4]. Dans les deux cas, ces produits peuvent être utilisés à différents niveaux lors du remblayage des tranchées, en tant que matériau d'enrobage, de remblai et/ou de lit de pose. Le domaine d'emploi peut être étendu aux couches d'assises de chaussées destinées à supporter un trafic de classe inférieure ou égale à T3 pour les produits présentant des caractéristiques mécaniques légèrement supérieures.



[3] **Produits essorables** : La fluidité nécessaire à leur mise en œuvre est due à leur teneur en eau élevée. Leur capacité portante est obtenue essentiellement par l'évacuation d'une forte partie de cette eau dans les matériaux encaissants et par la prise et le durcissement du liant. Les produits essorables ne sont pas utilisables dans des roches massives non fissurées, dans des argiles ou des limons et sables argileux.

[4] **Produits non essorables** : Produits dont la fluidité est obtenue par l'utilisation d'adjuvants et la capacité portante par la prise et le durcissement du liant.

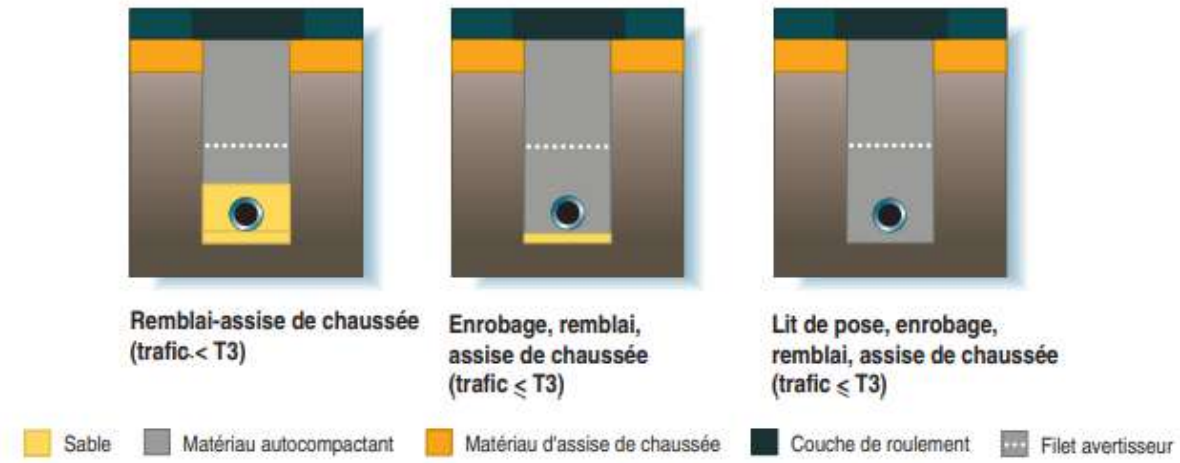


Figure 65 : Domaines d'application des matériaux autocompactants

Concernant la fabrication et la mise en œuvre de ces matériaux, ces derniers sont le plus souvent fabriqués en centrale BPE, transportés en camion malaxeur et déversés directement dans la tranchée.

Dans le cadre du projet SEDIMEL, un chantier expérimental a été réalisé Rue Anne et Albert Prouvost à Bondues avec la mise en œuvre d'un béton témoin et d'un béton à base de sédiments utilisés en tant que matériaux d'enrobage sur un linéaire d'environ 800 m de canalisation. Les formulations étudiées correspondent à un mélange de cendres volantes, de liant et de fibres. En ce qui concerne l'ouvrage à base de sédiments, 20 % de cendres volantes ont été substituées par des sédiments.

Figure 66 : Mise en œuvre du coulis autocompactant

9.3.2 CADRES REGLEMENTAIRE ET NORMATIF

De manière générale, plusieurs documents et normes encadrent les bétons autoplaçants :

- Norme NF EN 206/CN (2014) : Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206 ;
- Norme NF EN 206+A1 (2016) : Béton - Spécification, performances, production et conformité ;
- « Recommandations pour l'emploi des Bétons Autoplaçants » édité par l'Association Française de Génie Civil (AFGC) en janvier 2008.

Les normes NF EN 206/CN et NF EN 206+A1 définissent des spécifications sur les bétons à l'état frais et à l'état durci, la production, la livraison et le contrôle de conformité des bétons, et prennent en compte la durabilité en s'appuyant sur la notion de classes d'exposition. Dans leur article 4.2, elles définissent notamment les classes de propriétés des BAP à l'état frais et précisent, dans l'annexe G, les lignes directrices pour les exigences relatives au béton autoplaçant à l'état frais.

Néanmoins, ces normes concernent les bétons prêts à l'emploi, les bétons fabriqués sur chantier et les produits préfabriqués en béton, destinés aux bâtiments et aux ouvrages de génie civil. Elles n'encadrent pas les bétons non structuraux et les bétons particuliers tels que les bétons de tranchée, de remplissage, de calage ou de propreté.

En ce qui concerne le document de l'AFGC produit en 2008, celui-ci présente des recommandations ayant pour but de dresser un cadre d'emploi des BAP. Ces recommandations sont fondées sur des données bibliographiques existantes en France et à l'étranger ainsi que sur les travaux réalisés par le Projet National B@P. Elles concernent la gamme des BAP utilisés en bâtiment comme en génie civil pour des classes de résistance comprises entre C25/30 et C90/105 et couvrent les domaines du béton coulé en place et des produits préfabriqués de structure. Les remblais autocompactants sont exclus du cadre de ces recommandations.

Pour conclure sur ces trois références, le béton ou coulis pour remblai de tranchée n'est pas soumis aux exigences des normes NF EN 206/CN et NF EN 206+A1 et aux recommandations du document de l'AFGC. Ce paramètre est notamment précisé dans certaines fiches techniques de produits (ex : LB Tranchées Essorable et Non Essorable – Lafarge ou Defiperf Remblai – VICAT).

Cependant, des documents et normes spécifiques au remblayage de tranchées existent, dont notamment :

- Guide SETRA (1994) : Remblayage des tranchées et réfection de chaussées accompagné d'une note d'information en date de 2007 ;
- Norme NF P98-331 (2020) : Chaussées et dépendances – Tranchées : ouverture, remblayage, réfection ;

- Dossier CERTU N°78 (1998) : Remblayage des tranchées – utilisation de matériaux autocompactants.

Initialement, le guide SETRA (1994) et la norme NF P98-331 portaient uniquement sur les tranchées remblayées classiquement à l'aide de remblais granulaires et nécessitant une étape de compactage. Ces documents ont fait l'objet de mises à jour en vue de tenir compte de l'utilisation des nouveaux matériaux de remblayage, dont les matériaux autocompactants. La norme NF P98-331 est notamment citée dans le cadre du titre I du fascicule 70 du CCTG-travaux s'appliquant à l'exécution de réseaux. Dans cette norme, il est indiqué que les matériaux et la fiche produit du fabricant doivent être conformes aux prescriptions du dossier CERTU n°78.

Ce dernier est spécifique aux matériaux autocompactants utilisés pour le remblayage des tranchées. Celui-ci définit notamment le domaine d'application de ces matériaux, décrit les différents types de produits existants et la manière de les caractériser, de les fabriquer, de les transporter et de les mettre en œuvre.

Ce document donne également des indications quant aux informations devant apparaitre dans la fiche produit fournie par le producteur :

Données générales du produit	• Type de matériau : essorable ou non essorable. • Usage : enrobage, remblai, lit de pose, assise de chaussée. • Caractéristiques de perméabilité nécessaires pour le sol encaissant.
Description du produit	• Constituants du matériau et intervalles de variation admissibles de leur dosage. • Pour l'usage assise de chaussée, les caractéristiques des granulats doivent être précisées et conformes à une utilisation routière.
Caractéristiques du produit à l'état frais	Résultats d'essais réalisés lors des études en laboratoire : fluidité, restitution à la circulation piétonne, stabilité (non essorables) et masse volumique apparente humide (non essorables).
Caractéristiques du matériau durci après 28 jours	Résultats des essais : Masse volumique apparente à 28 jours, résistance en compression à 28 jours, module d'élasticité en compression à 28 jours, porosité ouverte, résistance en compression à 90 jours, perméabilité à l'eau, perméabilité à l'air (spécifique pour les réseaux gaz), résistivité thermique (spécifique pour les réseaux électriques).
Caractéristiques en place	• Délais de restitution à la circulation. • Comportement à long terme : essais de plaque (module Ev2 à 28 jours) et déflexion à 28 jours.
Mise en œuvre	Conseils de mise en œuvre à respecter : épaisseur et nature du lit de pose, perméabilité de l'encaissant, température extérieure, délai tolérable entre fabrication et mise en œuvre, temps de malaxage en toupie avant déversement, pente longitudinale

	maximale, protection superficielle, préparation de la surface avant mise en œuvre de la couche de revêtement.

Tableau 44 : Eléments devant apparaitre dans la fiche produit fournie par le producteur de matériaux autocompactants - Dossier CERTU n°78

Ainsi, le coulis autocompactant ne relève pas d'une norme produit. Néanmoins, les matériaux et la fiche produit du fabricant doivent être conformes aux prescriptions du dossier CERTU. Cette exigence est mentionnée dans la norme NF P98-331, norme elle-même mentionnée pour le choix des matériaux utilisables pour la réalisation de remblai dans le fascicule 70 du CCTG-travaux titre I. Dans le document du CERTU, aucune exigence n'est faite vis-à-vis des matières premières employées pour la fabrication des matériaux autocompactants, seules des exigences vis-à-vis du produit à l'état frais et à l'état durci après 28 jours sont mentionnées.

9.3.3 CONDITIONS DE SORTIE DU STATUT DE DECHET

Dans le cadre du projet SEDIMEL, les conditions nécessaires à une sortie implicite du statut de déchet ont été démontrées pour l'application « coulis autocompactant » :

Condition	Conformité
Déchet utilisé en substitution de matières premières d'origine extractive	Substitution de la fraction sableuse par des sédiments à hauteur de 20 %
Respect des dispositions des règlements REACH et CLP	• C'est au producteur des produits finis de s'en assurer • MEL : fournisseur de déchets, soumis à la règlementation déchet (REACH non applicable aux déchets)
Produit à base de déchets similaire à un produit classique	• Innocuité environnementale validée à l'échelle laboratoire et à l'échelle terrain • Produits formulés répondant aux exigences minimales requises en termes de performances techniques
Fabrication en installation ICPE éligible	2518. Installation de production de béton prêt à l'emploi équipée d'un dispositif mécanisé d'alimentation en liants hydrauliques, à l'exclusion des installations visées par la rubrique 2522.

Tableau 45 : Sortie implicite du statut de déchet - application coulis autocompactant

9.4 APPLICATION « GRAVES TRAITEES »

9.4.1 PRESENTATION DE LA FILIERE

Une grave est un matériau composé d'un mélange de sable et de gravillon. Celui-ci est utilisé principalement dans l'exécution des corps de chaussées ou de plateformes. Dans toutes ces réalisations, ce sont quelques décimètres d'épaisseur de graves qui sont utilisées sous la couche de finition (enrobé bitumineux de couverture, dallage béton, enduit superficiel d'usure…).

Les graves traitées sont des matériaux obtenus par ajout d'un liant. Ce dernier peut être :

- Liant hydraulique ;
- Liant hydrocarboné ;
- Chaux.

Ces produits sont généralement fabriqués en centrale ou en place pour les sols traités et les chaussées retraitées. Ils sont mis en œuvre rapidement, dans la limite du délai de maniabilité, selon des étapes de répandage, réglage et compactage.

Dans le cadre du projet SEDIMEL, un pilote témoin et un pilote à base de sédiments ont été mis en œuvre à Houplines. Les formulations étudiées correspondent à un mélange de sable et gravier traité au liant hydraulique routier et à la chaux. En ce qui concerne l'ouvrage à base de sédiments, 9,6 % de la fraction sableuse a été substituée par des sédiments.

La figure ci-dessous illustre une coupe transversale de structure routière. Dans le cadre de la réalisation du pilote, la couche concernée par la formulation à base de sédiment correspond à la couche d'assise.

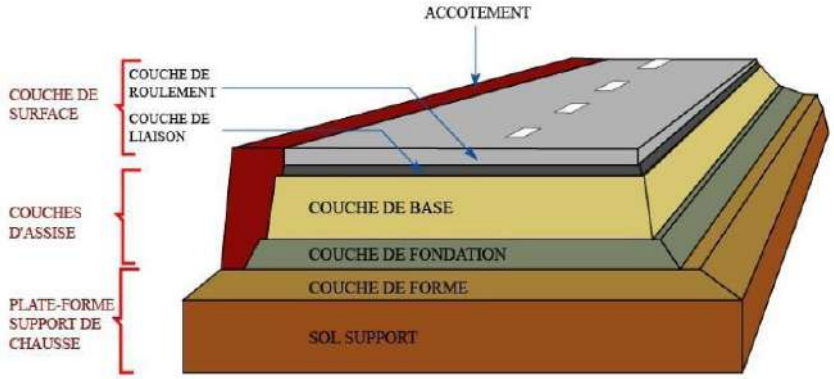


Figure 67 : Coupe transversale d'une structure routière.

9.4.2 CADRE REGLEMENTAIRE

De nombreuses normes encadrent et s'appliquent aux mélanges traités aux liants hydrauliques pour assise de chaussée dont notamment :

- NF EN 14227-1 : Mélanges traités aux liants hydrauliques – Spécifications – Partie 1 : Mélanges granulaires traités au ciment ;
- NF EN 14227-2 : Mélanges traités aux liants hydrauliques – Spécifications – Partie 2 : Mélanges granulaires traités au laitier ;
- NF EN 14227-3 : Mélanges traités aux liants hydrauliques – Spécifications – Partie 3 : Mélanges granulaires traités à la cendre volante ;
- NF EN 14227-5 : Mélanges traités aux liants hydrauliques – Spécifications – Partie 5 : Mélanges granulaires traités aux liants hydrauliques routiers ;

- NF P 98-114-1 : Assises de chaussées – Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques – Partie 1 : Graves traitées aux liants hydrauliques ;
- NF P 98-115 : Exécution des corps de chaussées – Constituants – Composition des mélanges et formulation – Exécution et contrôle.
- NF EN 13242+A1 : Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil et pour la construction des chaussées.
- NF P18-545 : Granulats – Eléments de définition, conformité et codification.

Ces normes donnent des spécifications vis-à-vis des constituants, des formulations et de la mise en œuvre des mélanges traités aux liants hydrauliques. D'après celles-ci, les granulats entrant dans la composition des mélanges granulaires traités aux liants hydrauliques doivent être définis par les normes NF EN 13242+A1 et NF P18-545. L'utilisation de matériaux alternatifs tels que des sédiments dans la fabrication de graves traitées n'entre donc pas dans le champ d'application de ces normes.

Néanmoins, l'utilisation de matériaux hors champs d'application des normes est possible si le produit final respecte les performances mécaniques attendues. Ce paramètre doit être déterminé par des essais laboratoires. Cette pratique semble relativement courante pour ce type de travaux et est généralement proposée sous forme de variante dans les réponses aux appels d'offre.

9.4.3 CONDITIONS DE SORTIE DU STATUT DE DECHET

Dans le cadre du projet SEDIMEL, les conditions nécessaires à une sortie implicite du statut de déchet ont été étudiées pour l'application « graves traitées » :

Condition	Conformité
Déchet utilisé en substitution de matières premières d'origine extractive	Substitution de la fraction sableuse par des sédiments à hauteur de 10 %
Respect des dispositions des règlements REACH et CLP	• C'est au producteur des produits finis de s'en assurer • MEL : fournisseur de déchets, soumis à la règlementation déchet (REACH non applicable aux déchets)
Produit à base de déchets similaire à un produit classique	Formulation à optimiser vis-à-vis du critère environnemental
Fabrication en installation ICPE éligible	2515. Installation de broyage, concassage, criblage, ensachage, pulvérisation, nettoyage, tamisage, mélange de pierres, cailloux, minerais et autres produits minéraux naturels ou artificiels ou de déchets non dangereux inertes.

Tableau 46 : Sortie implicite du statut de déchet - application grave traitée

L'ensemble des conditions n'est pas rempli. En effet, l'innocuité environnementale des pilotes expérimentaux n'a pas été validée (échelle terrain). Une optimisation des formulations est nécessaire.

10. PHASE 7 : COMMUNICATION

Livrable	Présentation des résultats pour les actions de communication

La stratégie de communication est effectuée par l'ensemble des acteurs sous forme de présentation synthétique des phases et des résultats au travers de la :

- la promotion du projet dans le cadre de la démarche Sédimatériaux et de l'aide financière apportée par le FEDER sur les différents supports de communication de la Métropole Européenne de Lille, de Neo Eco, de l'IMT Lille Douai ;
- la large diffusion des résultats du projet dans le cadre de :
  - de la démarche Sédimatériaux,
  - dans les congrès nationaux et internationaux ainsi que les salons professionnels,
  - d'une diffusion sur le site internet en libre accès (Centre ressources SEDILAB, Neo Eco, IMT Lille Douai, …).

PANNEAU / AFFICHE

Figure 68 : Réalisation d'un panneau sur le site de Bondues

Figure 69 : Réalisation d'une plaque sur le site de Bondues

Figure 70 : Réalisation d'une plaque sur le site de Leers

Figure 71 : Réalisation d'une plaque sur le site de Tourcoing

FICHES SEDIMENTS

Les fiches sédiments sont présentées en *Annexe 2 : Fiche technique des sédiments.*

FICHES PILOTES EXPERIMENTAUX

Les fiches pilotes expérimentaux sont présentées en *Annexe 3 : Fiche technique des pilotes expérimentaux.*

FICHES OUVRAGES EXPERIMENTAUX

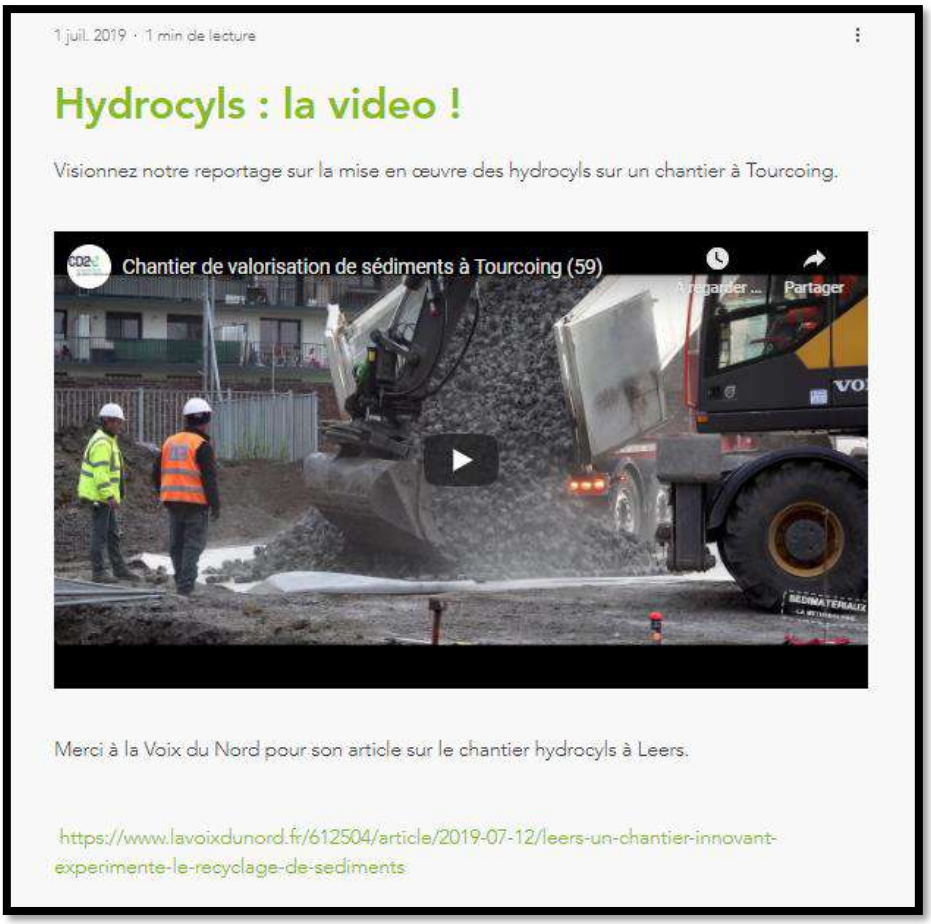
Les fiches chantiers expérimentaux sont présentées en *Annexe 4 : Fiche technique des chantiers expérimentaux.*

DIFFUSION SUR LE SITE INTERNET DE NEO-ECO

- Publication le 16 avril 2019 : https://www.neo-eco.fr/post/2019/04/16/neo-eco-con%C3%A7oit-des-hydrocyls-%C3%A0-partir-de-s%C3%A9diments

- Publication le 15 octobre 2019 : https://www.neo-eco.fr/post/2019/10/07/neo-eco-d%C3%A9veloppe-un-coulis-autocompactant-int%C3%A9grant-des-s%C3%A9diments

- Publication le 1 juillet 2019 : https://www.neo-eco.fr/post/2019/07/01/hydrocyls-la-video



1 juil. 2019 · 1 min de lecture

Hydrocyls : la video !

Visionnez notre reportage sur la mise en œuvre des hydrocyls sur un chantier à Tourcoing.

Merci à la Voix du Nord pour son article sur le chantier hydrocyls à Leers.

https://www.lavoixdunord.fr/612504/article/2019-07-12/leers-un-chantier-innovant-experimente-le-recyclage-de-sediments

Figure 72 : Publication sur le site internet de Neo-Eco

DIFFUSION SUR LA PLATEFORME SEDILAB

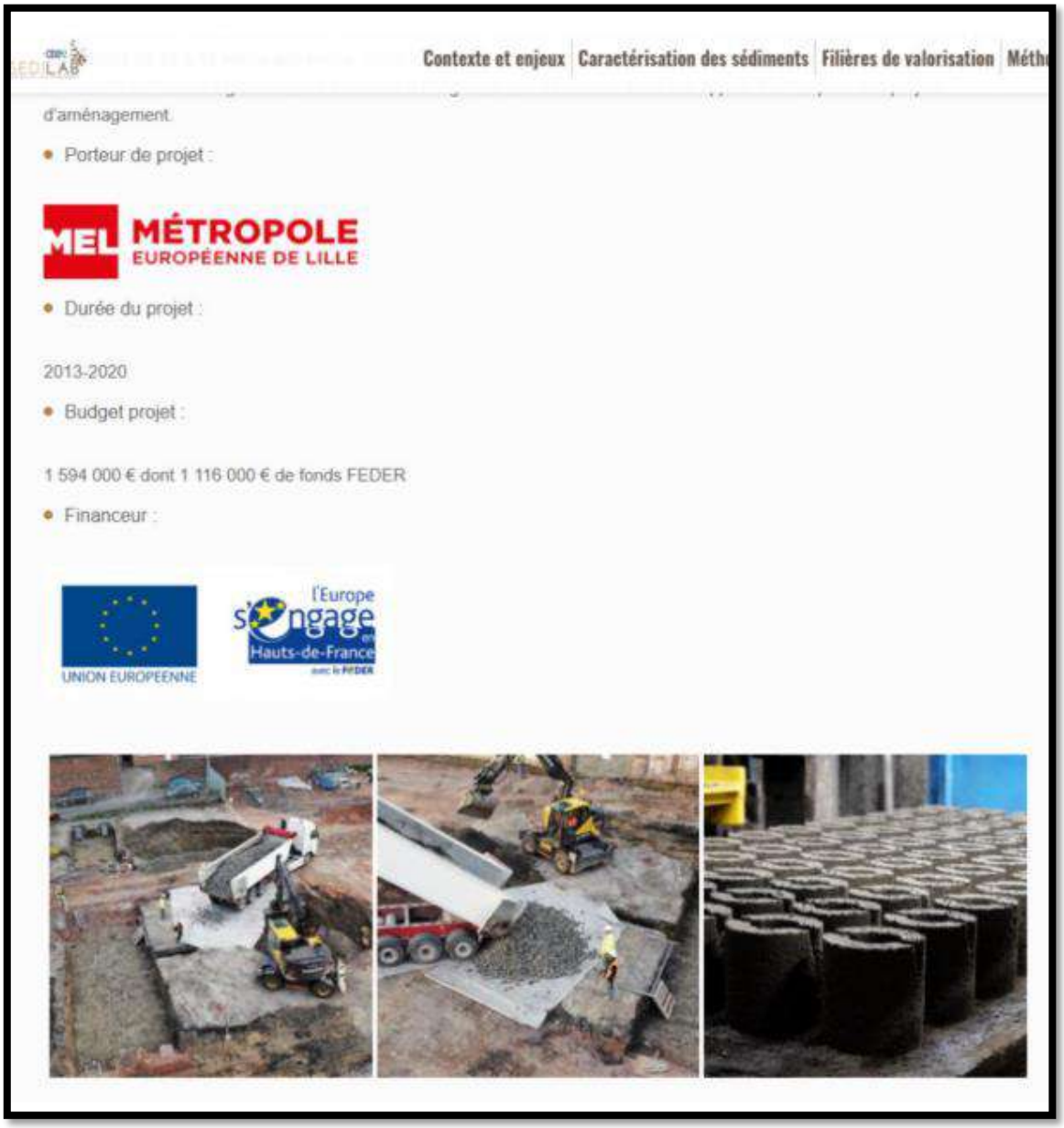


Figure 73 : Extrait de la plateforme Sedilab

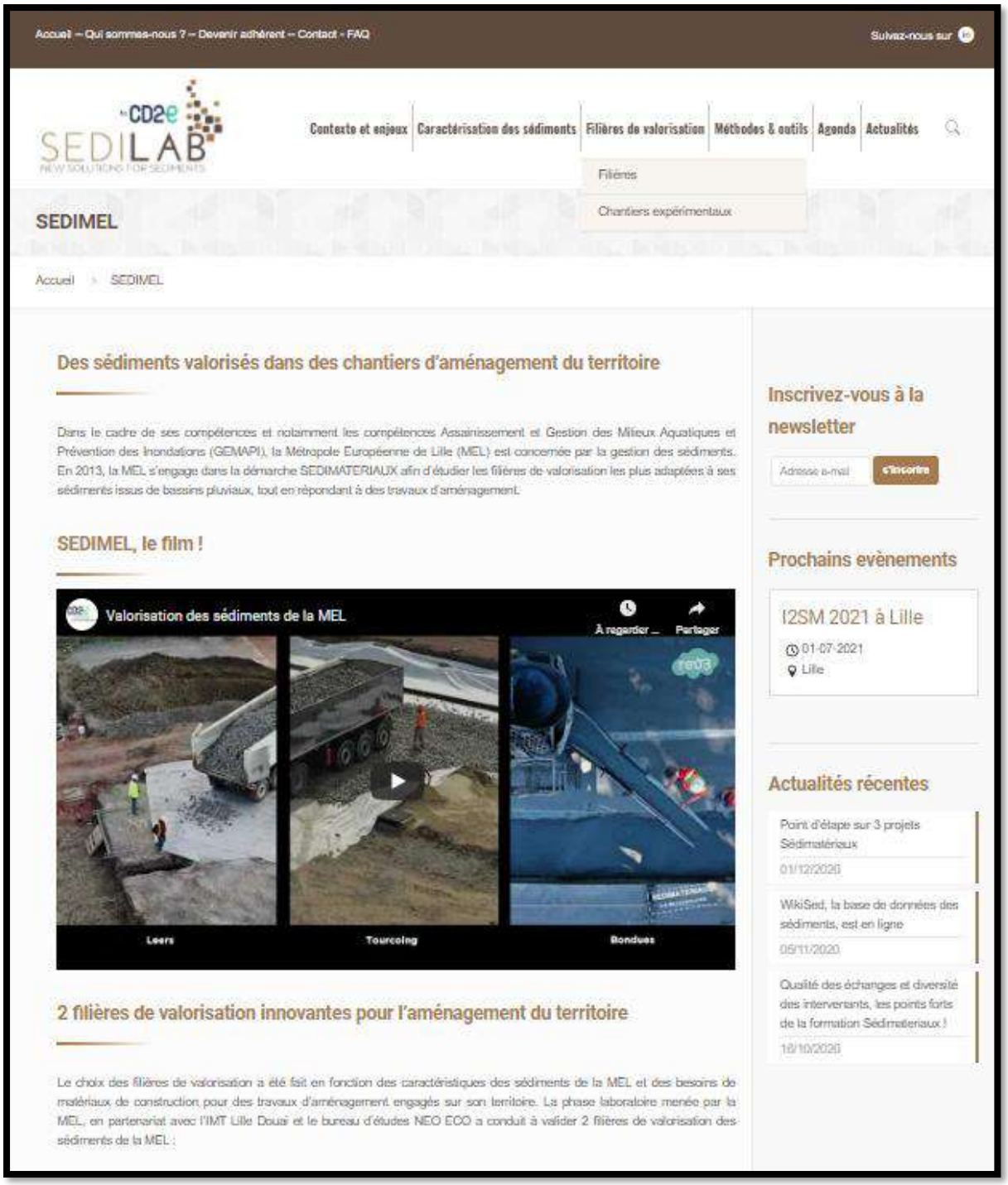


Figure 74 : Extrait d'une publication sur la plateforme Sedilab

DIFFUSION SUR LE SITE INTERNET DE LA MEL

Lien du site internet : https://www/lillemetropole.fr/les-projets-europeens-la-mel/.

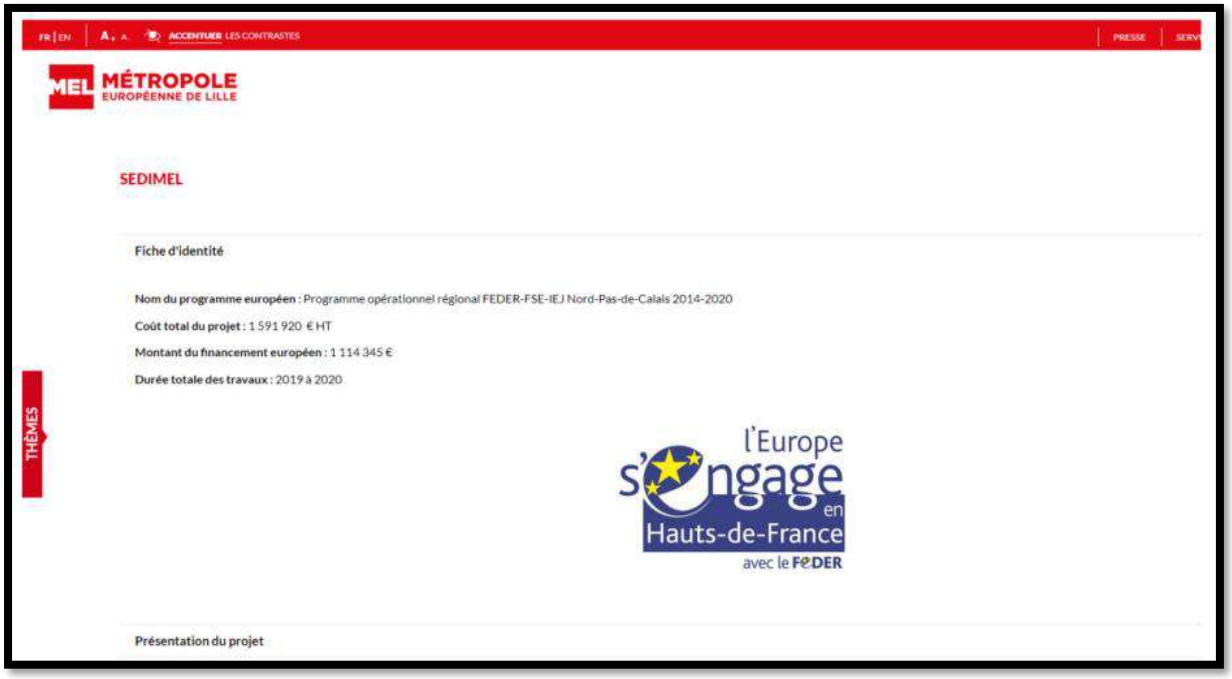


Figure 75 : Extrait d'une page internet de la MEL

DIFFUSION SUR D'AUTRES PLATEFORMES

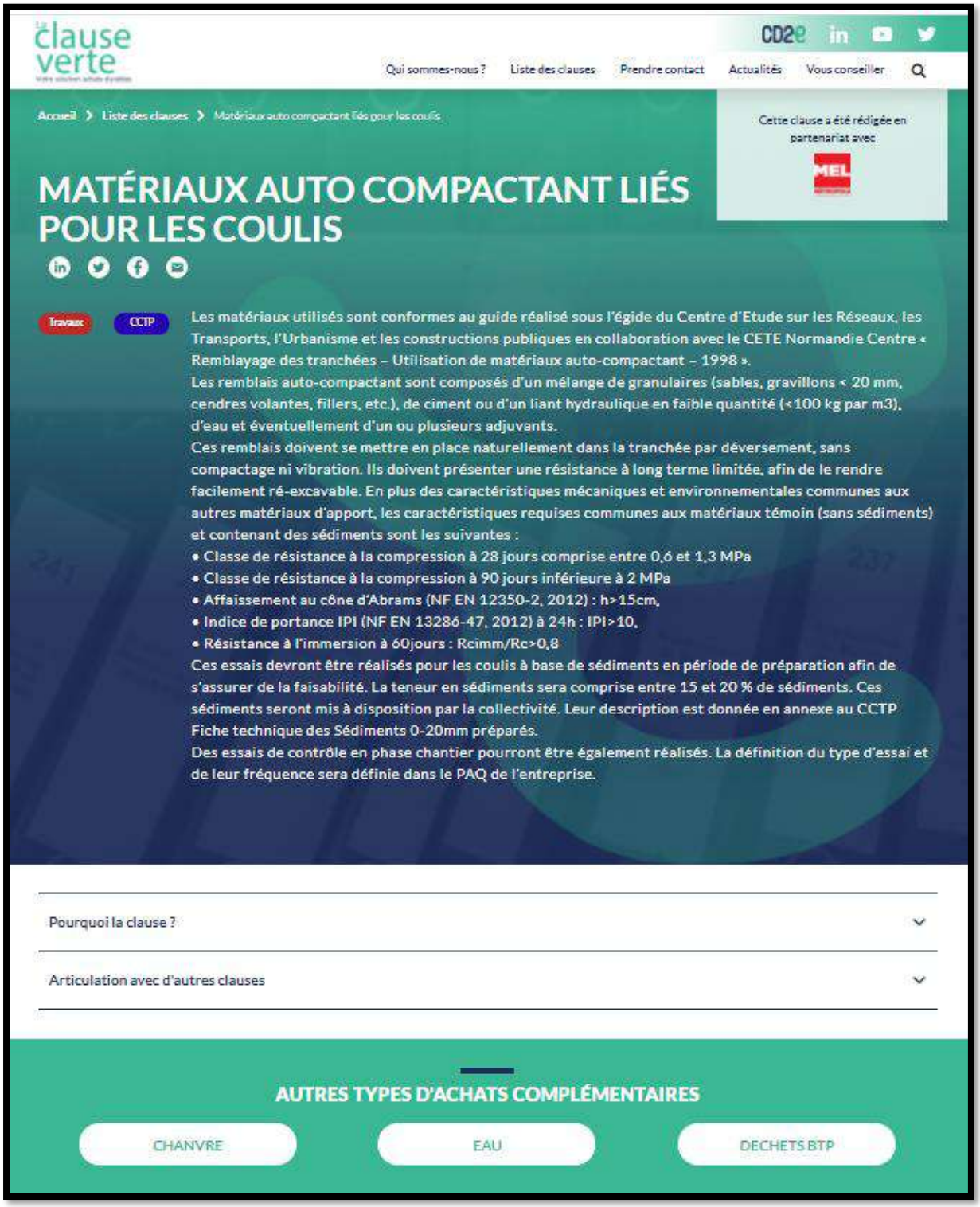


Figure 76 : Diffusion sur La Clause Verte

AUTRES PUBLICATIONS

- La Gazette des communes

https://www.lagazettedescommunes.com/663626/un-engagement-fort-pour-la-valorisation-des-sediments/?abo=1

la gazette

PARTAGER Facebook Twitter

ENVIRONNEMENT

Un engagement fort pour la valorisation des sédiments

Publié le 28/02/2020 • Par Alexandra Delmolino • dans : Innovations et Territoires, Régions

Dans le cadre d'une démarche initiée par la région, la métropole européenne de Lille a testé deux filières de traitement des déchets.

Figure 77 : Extrait de la Gazette

- Actu-environnement

https://www.actu-environnement.com/ae/news/sediments-vnf-valorisation-cimentier-sedimateriaux-34199.php4

Les débouchés des sédiments marins et fluviaux se dessinent

Les filières de valorisation se révèlent prometteuses aujourd'hui. Les chantiers tests sur le terrain ont rassuré les industriels et les collectivités, qui seront les premiers utilisateurs de ces nouveaux produits contenant des sédiments recyclés.

Déchets | 10 octobre 2019 | Florence Roussel | Actu-Environnement.com A- A+

Hydrocyl testé à la métropole de Lille © www.airscanner-drone.com

Figure 78 : Extrait d'Actu-Environnement

FILMS

La réalisation de plusieurs vidéos explicatives de la démarche Sedimel et des différents chantiers que l'on peut retrouver sur le site internet de SEDILAB, centre de ressources et animateur de réseau des acteurs de la démarche Sédimatériaux, ou encore sur des plateformes de visionnage. Les liens des vidéos se trouvent ci-dessous.

- Chantier de valorisation de sédiments (application coulis) à Bondues (59) : https://www.youtube.com/watch?v=TPhEFPkEcbE

- Chantier de valorisation de sédiments (application chaussée réservoir) à Leers (59) : https://www.youtube.com/watch?v=5RvXGW8qsAA

- Chantier de valorisation de sédiments (application chaussée réservoir) à Tourcoing (59) : https://www.youtube.com/watch?v=004v2_Wcuqg

- Du béton pré-fabriqué à base de sédiments : https://www.youtube.com/watch?v=mrBkihdBxeo

- Valorisation de sédiments de la MEL – Economie Circulaire : https://www.youtube.com/watch?v=IT6gcR2rpXU

Figure 79 : Extraits des vidéos

CONFERENCE, SALON, EVENEMENTS PROFESSIONNELS

- Rencontres nationales des ingénieurs territoriaux à Dunkerque – 13 juin 2019
  - Organisé par le CNFPT
  - Organisation d'atelier sur les mâchefers et les sédiments de dragage pour une utilisation en technique routière et espaces publics
  - Intervention de Nicolas Prud'homme (MEL)

- Journée expertise construction 5ième édition à Epernon – 4 juillet 2019
  - Organisé par le CERIB
  - Organisation d'atelier sur l'économie circulaire et son impact environnemental
  - Intervention de Nicolas Prud'homme (MEL) concernant les hydrocyls

- Les Assisses Nationales des sédiments – 1 octobre 2019
  - Organisé par le CD2E / SEDILAB
  - Intervention de Nicolas Prud'homme (MEL) autour d'une table ronde

Figure 80 : Diffusion du projet lors des Assises Nationales 2019

Figure 81 : Réalisation d'une affiche exposée lors des assises nationales des sédiments par le CD2E

- Les rencontres régionales de la Recherche & de l'Innovation en Hauts-de-France – 29 novembre 2019
    - Intervention de Julien Raynal (Neo-Eco) autour d'une table ronde dédiée à l'innovation dans les travaux publics.

- Formation Sédimatériaux – 9 octobre 2020
    - Organisé par le CD2E
    - Intervention de Nicolas Prud'homme (MEL)

COMMUNIQUE DE PRESSE

Communiqué de presse
Lille, 3 juin 2019

VALORISATION DES SEDIMENTS :
La Métropole Européenne de Lille s'engage dans une démarche d'innovation pour intégrer matériaux recyclés et sédiments sur ses chantiers d'aménagement du territoire !

Dans le cadre de ses compétences et notamment les compétences Assainissement et Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations (GEMAPI), la Métropole Européenne de Lille (MEL) est concernée par la gestion des sédiments. Considérés comme déchets dès lors qu'ils sont curés des fonds de bassins ou canaux et sortis de l'eau, leur élimination peut entrainer des coûts importants... De récents travaux de recherche ayant démontré l'existence de filières de valorisation des sédiments, la MEL s'engage dans la démarche SEDIMATERIAUX, créée en collaboration avec le CD2E qui porte SEDILAB, le centre de ressources dédié aux sédiments, afin d'étudier les filières de valorisation les plus adaptées à ses sédiments, tout en répondant à des travaux d'aménagement.

Qu'est-ce que la démarche SEDIMATERIAUX ?

SEDIMATERIAUX est une démarche collective, initiée par La Région Hauts-de-France, l'Institut Mines-Telecom Lille Douai, le CD2E et soutenue par Le Ministère de la Transition écologique et solidaire et la Préfecture Hauts-de-France. L'objectif de cette démarche est la recherche de filières de valorisation, à terre, des sédiments de dragage portuaires et fluviaux. Elle comporte 3 phases majeures : caractérisation des sédiments, étude en laboratoire (recherche de formulations) et étude sur terrain. Cette démarche vise à **valider la faisabilité géotechnique et environnementale de la valorisation des sédiments** dans les usages visés.

2 filières de valorisation innovantes pour l'aménagement du territoire

Le choix des filières de valorisation a été fait en fonction des caractéristiques des sédiments de la MEL et des besoins de matériaux de construction pour des travaux d'aménagement engagés sur son territoire. La phase laboratoire menée par la MEL, en partenariat avec l'IMT Lille Douai et le bureau d'études NEO ECO a conduit à valider 2 filières de valorisation des sédiments de la MEL :

- La **fabrication d'un coulis auto-compactant pour du remblayage de tranchée** : Ces matériaux ont une fluidité et une viscosité élevées, qui leur permettent de se placer dans des formes géométriques complexes, idéal pour recouvrir des canalisations. Leur caractère réexcavable facilitera l'intervention pour la maintenance des réseaux. Les sédiments viennent en substitution à des granulats, dans une proportion jusqu'à 20% dans la formule.

- **La fabrication de cylindres creux en béton préfabriqués pour réaliser des chaussées-réservoir** qui permettent d'absorber les eaux pluviales, de les stocker temporairement et ainsi éviter les inondations. Les sédiments remplacent le sable naturel jusqu'à 15% dans la formule du béton. L'atout majeur de ce matériau est sa forte porosité. La capacité de stockage est presque **2 fois plus importante qu'une structure réservoir en ballast**

Contacts presse

CD2E - SEDILAB : Charlotte Destombes
07 57 41 04 13 / c.destombes@cd2e.com

MEL : Emilie Green-Leduc
eleduc@lillemetropole.fr / 03 20 21 26 60

Communiqué de presse
Lille, 3 juin 2019

MEL MÉTROPOLE EUROPÉENNE DE LILLE — CD2E SEDILAB

3 chantiers test sur la Métropole utilisant 500 tonnes de sédiments.

A partir de ces études concluantes, le projet, appelé SEDIMEL, a conduit à la réalisation de 3 ouvrages test dont les chantiers démarrent au second trimestre 2019. Ce sont 500 tonnes de sédiments qui seront utlisés pour ces 3 chantiers :

- A **Bondues**, remblais de tranchée d'assainissement en coulis auto-compactant à base de sédiments, rue Anne-et-Albert-Prouvost. La canalisation concernée par l'ouvrage est de 600 m environ. 700 m³ de coulis recyclés seront ainsi coulés autour d'une canalisation pour la mise en œuvre de cet ouvrage.

- A **Tourcoing –** Ouvrage de création de parking sur la rue de Rhin
Création d'un bassin de tamponnement en modules de béton creux à base de sédiments sous le parking véhicules légers.

- A **Leers –** Ouvrage d'aménagement du centre-ville
Création d'un bassin de tamponnement en modules de béton creux à base de sédiments sous la gare de bus et parking de 152 places pour véhicules légers.

Des bassins d'eau de pluie à des travaux d'aménagement, les sédiments sont **valorisés en circuit-courts sur le territoire de la MEL.**

Vers la création de boucles d'économie circulaire…

Afin de **mesurer l'impact mécanique en environnemental** de ces ouvrages à base de sédiments, des témoins avec des matériaux naturels classiquement utilisés seront réalisés pour établir une **étude comparative entre les 2 matériaux**. Un suivi sera effectué pendant 12 mois pour étudier le potentiel de *recyclabilité* du produit.

Par ces expérimentations, l'enjeu est de permettre une **sortie du statut de déchet** au travers de l'application de la législation liée aux produits utilisant des déchets en substitution des matières premières, et ainsi faciliter la création de **boucles d'économie circulaire**.

D'autres projets de valorisation sont en cours d'études en vue de diversifier les filières et répondre aux besoins d'évacuation des gestionnaires de sédiments, qu'ils soient marins ou fluviaux.

Au service des 90 communes qui la composent, la Métropole Européenne de Lille agit au quotidien pour 1,2 million d'habitants. Elle est compétente dans les domaines essentiels suivants : transport, logement, économie, énergie, espace public et voirie, aménagement et urbanisme, politique de la ville, eau, assainissement, déchets ménagers, accessibilité handicap, nature et cadre de vie, culture, sport, tourisme, crématoriums. Le Conseil de la Métropole, présidé par Damien Castelain depuis le 18 avril 2014, est composé de 184 membres élus au suffrage universel direct pour 6 ans.

***

SEDILAB by CD2E est le centre de ressources dédié à la gestion et à la valorisation des sédiments marins et fluviaux. Il met à disposition des outils pour accompagner les projets de valorisation, accompagne le porteur de projet dans le suivi de la méthodologie, anime des ateliers d'information et de formation, relaie les innovations en développement et anime le réseau d'acteurs. Il est porté par le CD2E, pôle d'excellence régional qui accompagne et développe l'expertise des acteurs régionaux (entreprises et territoires) sur 3 activités : bâtiment durable, énergies renouvelables et économie circulaire.

Contacts presse

CD2E - SEDILAB : Charlotte Destombes
07 57 41 04 13 / c.destombes@cd2e.com

MEL : Emilie Green-Leduc
eleduc@lillemetropole.fr / **03 20 21 26 60**

Figure 82 : Communiqué de presse (3 juin 2019)

PROJET MENTIONNE DANS DES ARTICLES

La Chronique du BTP
L'hebdo régional de référence de la construction
Nord-Pas de Calais / Picardie

INNOVATION

Leers

Les sédiments s'invitent sous le parking

La MEL expérimente la valorisation des sédiments sur trois chantiers-tests. À Leers, ils sont intégrés dans la formulation du béton pour la réalisation d'une chaussée-réservoir sous une gare de bus et un parking. Visite. **Par Chloé Levray**

Ce sont de petits cylindres creux en béton – des hydrocyls dans le jargon – capables d'absorber l'eau de pluie, de la stocker entre les éléments de la chaussée, puis de la restituer. Dans les nappes phréatiques, solution privilégiée par la MEL, ou dans le réseau d'assainissement. Gris clair pour les uns, gris foncé pour les seconds conçus sans sédiments. Car il s'agit bien d'un chantier d'expérimentation qui démarre à Leers après des résultats concluants en laboratoire. La démarche suit l'initiative Sédimatériaux lancée par l'Etat, l'IMT Lille Douai, le Cd2e. Le principe : rechercher des filières de valorisation des sédiments de dragage portuaires et fluviaux. Ici, pour la première fois, les sédiments entrent dans la composition des matériaux de construction des chaussées-réservoirs. Ils remplacent le sable naturel dans la formule du béton à hauteur de 15% et permettent une meilleure absorption que le ballast habituellement utilisé. Grâce à un taux de vide de 60%, les hydrocyls avec sédiments ont une capacité de stockage deux fois plus importante que ceux avec du ballast.

TEST GRANDEUR NATURE

Sur le chantier, alors que les 460 tonnes d'hydrocyls avec et sans sédiments, tous deux fabriqués par le Groupe Lib à Wimille (62) viennent d'être livrés, deux compartiments distincts vont être creusés. Pour quelle visée ? Comparer les résultats d'absorption entre ces deux types de cylindres et vérifier sur le terrain que la formulation avec sédiments ne relâche pas de polluants. Pour cela, des prélèvements seront régulièrement réalisés durant une année. « Nous avons renforcé l'échelonnement des prélèvements sur cette période. Ils seront de plus en plus espacés ensuite », précise Nicolas Prud'homme, chef de projet pour le service assainissement de la MEL et responsable de l'expérimentation. Pour l'heure, les deux bassins de tamponnement seront revêtus d'une membrane d'étanchéité. À terme, elle sera retirée, une fois que les hydrocyls en sédiment auront démontré leur efficacité. En ce qui concerne les risques d'affaissement, les cylindres en sédiment se démarquent par un gain de portance et de solidité.

Le chantier de Leers coûtera 600 000 euros HT, mais le projet de la MEL englobe deux autres terrains d'expérimentation. À Bondues, des canalisations seront recouvertes, via l'intégration de sédiments dans le coulis auto-compactant.

À Tourcoing, un autre bassin de tamponnement, sur le même principe qu'à Leers sera réalisé. Le montant total de ces trois projets s'élève à 1,6 million d'euros dont 70% pris en charge par le FEDER. Un moyen d'encourager l'intégration des sédiments dans les matériaux de voirie et de poser une première pierre avant de passer à la phase industrielle. ■

460 tonnes d'hydrocyl seront enfouies pour composer la future chaussée-réservoir.

3 projets d'expérimentation

Bondues
remblais de tranchées d'assainissement en coulis auto-compactant

Tourcoing
création d'un bassin de tamponnement sous un parking

Leers
création d'un bassin de tamponnement sous un parking - gare de bus

Figure 83 : Article paru dans La Chronique du BTP (2 juillet 2019)

LA VOIX DU NORD

15/07/2019

- Réservé aux **Abonnés**

À Leers, un chantier innovant expérimente le recyclage de sédiments

Rue Salengro à Leers, le chantier test d'un parking se concentre sur l'absorption des eaux de pluie grâce à une démarche innovante intégrant les sédiments, autrement considérés comme déchets. Une démarche reprise sur deux chantiers, à Tourcoing et Bondues.

Par Julie Vayssière | *Publié le* 12/07/2019

Le chantier innovant de Leers s'inscrit dans un projet durable, comprenant également un chantier à Tourcoing, et un à Bondues. Photo THIERRY THOREL - PHOTOPQR/VOIX DU NORD/MAXPPP

Si vous passez rue Salengro à Leers, vous remarquerez que la rue est en travaux. En cette période estivale propice aux ouvrages, rien d'anormal. Approchez-vous un peu, et **la présence d'amas de petits cylindres creux attisera peut-être votre curiosité**. Ces derniers constituent l'hydrocyl, une structure réservoir qui permet de recueillir les eaux de pluie, brevetée il y a une vingtaine d'années. Sur ce **chantier de création d'une gare de bus et d'un parking de 152 places (https://www.lavoixdunord.fr/591852/article/2019-06-12/ce-lundi-enfin-le-lancement-du-chantier-du-parking-rouge)**, la fabrication de cette chaussée-réservoir, constituée des petits cylindres préfabriqués, va « *permettre d'absorber les eaux de pluie, de les stocker temporairement au plus proche de là où elles tombent, et ainsi d'éviter les inondations* », explique Nicolas Prud'homme, ingénieur expert génie civil à la Métropole européenne de Lille (MEL).

Développer des filières de valorisation

L'innovation se situe dans ces petits cylindres. **Ces derniers, fabriqués en béton, intègrent des sédiments** qui remplacent le sable jusqu'à 15 % dans la formule du matériau. Leur

https://www.lavoixdunord.fr/612504/article/2019-07-12/leers-un-chantier-innovant-experimente-le-recyclage-de-sediments 1/6

Figure 84 : Article paru dans La Voix du Nord (12 juillet 2019)

7500 habitants en moins en 2018 en Normandie (3 319 000 habitants, soit le 10e rang des régions françaises). Insee

2,5 M€ investis pour transformer les 3 000 m² de l'école Paul-Bert à Lens en cluster dédié aux start-up de la culture.

700 000 € de travaux de maintenance et de rénovation réalisés par la Somme sur ses collèges durant la pause estivale.

Nord

AISNE • CALVADOS • EURE • MANCHE • NORD • OISE • ORNE • PAS-DE-CALAIS • SEINE-MARITIME • SOMME

Responsable régionale : **Emmanuelle Lesquel** • 98, rue des Stations, 59000 Lille
Tél. : 06.64.45.08.98 • emmanuelle.lesquel@lemoniteur.fr • @Elesquel

Métropole de Lille
Le recyclage des sédiments déployé grandeur nature

C'est un premier pas significatif. La Métropole européenne de Lille (MEL) teste en conditions réelles ce qui a déjà été éprouvé en laboratoire à petite échelle dans le cadre de la démarche Sédimatériaux (1). Il s'agit d'utiliser des sédiments pour remplacer une partie des granulats utilisés habituellement dans la fabrication du béton ou du coulis autocompactant. Ce test s'accompagne d'un suivi dans le temps des performances mécaniques et du non-impact sur l'environnement de ces matériaux recyclant les sédiments.

A Leers (Nord), la MEL a ainsi profité de la création d'un parking de 150 places pour réaliser, sous la chaussée, deux bassins de rétention des eaux pluviales, garnis, sur une épaisseur d'environ 50 cm, d'hydrocyls (cylindres creux). En béton, ils assurent la stabilité de la chaussée, tout en permettant le stockage des eaux pluviales. Un des bassins est rempli d'hydrocyls, dont le sable naturel du béton a été remplacé à hauteur de 15 % maximum par du sédiment. Au total 460 t de béton à environ 6 % de sédiments sont utilisés, soit plus de 27 t de sédiments issus du curage de bassins de la collectivité, préalablement séchés et criblés. « C'est une première en Europe ! », se félicite Nicolas Prud'homme, conducteur d'opération à la MEL. Deux regards permettront de suivre pendant un an la composition des eaux rejetées.

Fonds européens. « Le coût de l'expérience se monte à 315 000 euros, qui permettent de financer notre assistant à maîtrise d'ouvrage, Neo-Eco, qui se charge du process. Ce montant est largement couvert par les fonds européens perçus pour ce projet », précise Nicolas Prud'homme, qui ajoute que ces innovations seront aussi testées sur un autre bassin de tamponnement à Tourcoing (Nord).

A Bondues (Nord), c'est un coulis autocompactant qui a incorporé les sédiments, et cette fois à hauteur de 20 %. Ainsi 700 m³ de coulis ont été versés dans un remblai de tranchée sur environ 600 m de canalisations. « La généralisation de cette incorporation pourrait représenter un gros exutoire pour nos sédiments. Nous utilisons jusqu'à 15 000 m³ par an de coulis autocompactant, ce qui ferait 3 000 t de sédiments par an », décrypte Nicolas Prud'homme. « Avec la loi qui nous confie la gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations (Gemapi), nous allons devoir gérer de plus en plus de sédiments. Ce type d'utilisation permet de créer des circuits courts et de faire des économies. La boucle est bouclée », se félicite Sébastien Leprêtre, vice-président de la MEL chargé, notamment, de la prévention des inondations. « La MEL veut modifier ses cahiers des charges pour les appels d'offres avec une composition *open source* des matériaux contenant du sédiment. C'est une mini-révolution qui se profile », met en avant Christophe Deboffe, directeur de Neo-Eco. ● Emmanuelle Lesquel

Les hydrocyls (cylindres composés ici en partie de sédiments) assurent à la fois la stabilité de la chaussée et le stockage des eaux.

(1) Démarche collective engagée par la région, Mines Télécom Lille-Douai et le CD2E, association spécialisée dans l'écotransition, afin de valoriser les sédiments de dragages fluviaux et portuaires.

Figure 85 : Article paru dans le Moniteur (20 septembre 2019)

RESEAUX SOCIAUX

- Publication sur LinkedIn

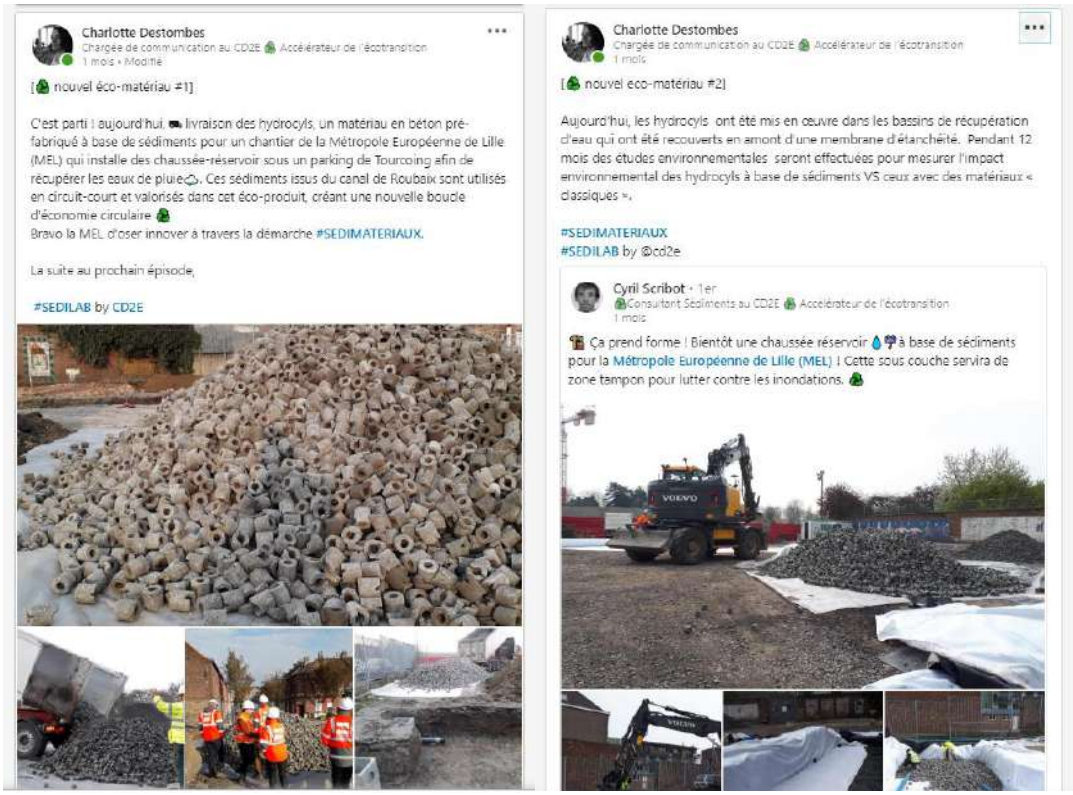


Figure 86 : Publication sur LinkedIn

DOCUMENTS DE PRESENTATION DE LA DEMARCHE SEDIMATERIAUX ET DU PROJET SEDIMEL

PROJET SEDIMEL
Pilotes expérimentaux pour l'application « grave traitée » et ouvrages expérimentaux pour les applications coulis et hydrocyls
Hauts-de-France
MEL
MÉTROPOLE
EUROPÉENNE DE LILLE
neo-eco
IMT Lille Douai
École Mines-Télécom
IMT-Université de Lille
cd2e
ACTEUR DE L'ÉCO-TRANSITION

SEDIMEL, utilisation de sédiments à forte teneur organique en technique routière
neo-eco
Un monde sans déchets
IMT Lille Douai
MEL
MÉTROPOLE
COLAS
EQIOM
GROUPE CRH
Hauts-de-France
l'Europe s'engage
Nord-Pas-de-Calais

SEDICOUL, coulis autocompactant à base de sédiments fluviaux
neo-eco
Un monde sans déchets
IMT Lille Douai
MEL
MÉTROPOLE
EcoSed
l'Europe s'engage
Nord-Pas-de-Calais
Hauts-de-France

COMITE DE PILOTAGE

Des comités de pilotage ont été réalisés (un par semestre). Ces derniers, au nombre de quatre, ont été organisés sur la base d'une présentation PowerPoint avec comptes-rendus. Ces comptes-rendus sont présentés en :

- *Annexe 12 : Résultats environnementaux (Guide Cerema* – Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière)

Paramètre	Unite	Usages de type 1	Usages de type 2	Usages de type 3	H-TEM	H-5%	H-6%	Coulis
broyage	-	-	-	-	Ja	Ja	Ja	
matière sèche	% massique	-	-	-	98.2	97.5	96.4	98.3
COT	mg/kg MS	30000	30000	30000	11000	3800	7900	70000
pH (KCl)		-	-	-	12.7	12.7	12.7	10.0
température pour mes. pH	°C	-	-	-	19.2	19.4	19.3	19.3
LIXIVIATION								
date de lancement		-	-	-	23-03-2021 00:00:00	23-03-2021 00:00:00	23-03-2021 00:00:00	23-03-2021 00:00:00
Lixiviation 24h - NF-EN-12457-2		-	-	-	#	#	#	#
COMPOSES AROMATIQUES VOLATILS								
benzène	mg/kg MS	-	-	-	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
toluène	mg/kg MS	-	-	-	<0.05	<0.05	<0.05	0.19
éthylbenzène	mg/kg MS	-	-	-	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
orthoxylène	mg/kg MS	-	-	-	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
para- et métaxylène	mg/kg MS	-	-	-	<0.05	<0.05	<0.05	0.12
xylènes	mg/kg MS	-	-	-	<0.10	<0.10	<0.10	0.12
BTEX totaux	mg/kg MS	6	6	6	<0.25	<0.25	<0.25	0.31
HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES								
naphtalène	mg/kg MS	-	-	-	<0.02	<0.02	<0.02	0.16
acénaphtylène	mg/kg MS	-	-	-	<0.02	<0.02	<0.02	0.06
acénaphtène	mg/kg MS	-	-	-	<0.02	<0.02	<0.02	0.11
fluorène	mg/kg MS	-	-	-	<0.02	<0.02	<0.02	0.04
phénanthrène	mg/kg MS	-	-	-	0.05	0.04	0.04	0.42

anthracène	mg/kg MS	-	-	-	<0.02	<0.02	<0.02	0.11
fluoranthène	mg/kg MS	-	-	-	0.06	0.18	0.06	1.4
pyrène	mg/kg MS	-	-	-	0.09	0.18	0.07	1.2
benzo(a)anthracène	mg/kg MS	-	-	-	0.02	0.10	0.03	0.25
chrysène	mg/kg MS	-	-	-	<0.02	0.10	0.04	0.22
benzo(b)fluoranthène	mg/kg MS	-	-	-	0.03	0.21	0.06	0.32
benzo(k)fluoranthène	mg/kg MS	-	-	-	<0.02	0.09	0.03	0.14
benzo(a)pyrène	mg/kg MS	-	-	-	<0.02	0.12	0.03	0.07
dibenzo(ah)anthracène	mg/kg MS	-	-	-	<0.02	0.02	<0.02	<0.02
benzo(ghi)pérylène	mg/kg MS	-	-	-	<0.02	0.12	0.03	0.03
indéno(1,2,3-cd)pyrène	mg/kg MS	-	-	-	<0.02	0.12	0.03	0.03
Somme des HAP (10) VROM	mg/kg MS	-	-	-	<0.20	0.87	0.29	2.8
Somme des HAP (16) - EPA	mg/kg MS	50	50	50	<0.32	1.3	0.42	4.6
POLYCHLOROBIPHENYLS (PCB)								
PCB 28	µg/kg MS	-	-	-	<2	<2	<2	9.8
PCB 52	µg/kg MS	-	-	-	<2	<2	<2	15
PCB 101	µg/kg MS	-	-	-	<2	<2	<2	14
PCB 118	µg/kg MS	-	-	-	<2	<2	<2	7.7
PCB 138	µg/kg MS	-	-	-	<2	<2	<2	9.9
PCB 153	µg/kg MS	-	-	-	<2	<2	<2	13
PCB 180	µg/kg MS	-	-	-	<2	<2	<2	9.4
PCB totaux (7)	µg/kg MS	1000	1000	1000	<14	<14	<14	79
HYDROCARBURES TOTAUX								
fraction C10-C12	mg/kg MS	-	-	-	<5	<5	<5	<5
fraction C12-C16	mg/kg MS	-	-	-	26	<5	7.0	<5
fraction C16-C21	mg/kg MS	-	-	-	280	25	89	10
fraction C21-C40	mg/kg MS	-	-	-	250	47	150	43
hydrocarbures totaux C10-C40	mg/kg MS	300	300	300	560	70	250	55
LIXIVIATION								

L/S	ml/g	-	-	-	10.03	10.13	10.03	9.99
pH final ap. lix.	-	-	-	-	12.00	12.00	13.00	9.90
température pour mes. pH	°C	-	-	-	19.1	18.8	18.6	18.5
conductivité (25°C) ap. lix.	µS/cm	-	-	-	4430	4220	7160	627
ELUAT COT								
COD, COT sur éluat	mg/kg MS	-	-	-	24	110	72	230
ELUAT METAUX								
antimoine	mg/kg MS	0.6	0.3	0.08	<0.039	<0.039	<0.039	0.11
arsenic	mg/kg MS	0.6	0.6	0.6	<0.05	<0.05	<0.05	0.17
baryum	mg/kg MS	36	25	25	1.9	1.5	3.6	0.23
cadmium	mg/kg MS	0.05	0.05	0.05	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004
chrome	mg/kg MS	4	2	0.6	0.21	0.075	0.059	0.37
cuivre	mg/kg MS	10	5	3	0.063	0.55	0.19	0.84
mercure	mg/kg MS	0.01	0.01	0.01	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
plomb	mg/kg MS	0.6	0.6	0.6	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
molybdène	mg/kg MS	5.6	2.8	0.6	0.054	0.052	<0.05	0.43
nickel	mg/kg MS	0.5	0.5	0.5	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
sélénium	mg/kg MS	0.5	0.4	0.1	<0.039	<0.039	<0.039	0.10
zinc	mg/kg MS	5	5	5	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
ELUAT COMPOSES INORGANIQUES								
fraction soluble	mg/kg MS	-	-	-	13900	12000	17900	5570
ELUAT PHENOLS								
Indice phénol	mg/kg MS	-	-	-	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
ELUAT DIVERSES ANALYSES CHIMIQUES								
fluorures	mg/kg MS	60	30	13	3.7	4.1	2.8	14
chlorures	mg/kg MS	10000	5000	1000	220	320	340	60
sulfate	mg/kg MS	10000	5000	1300	99.3	78.4	18.5	2510

- Annexe 13 : Compte-rendu du Copil n°1 *;*
- *Annexe 14 : Compte-rendu du Copil n°2 ;*
- *Annexe 15 : Compte-rendu du Copil n°3 ;*
- *Annexe 16 : Compte-rendu du Copil n°4.*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

LES SÉDIMENTS POLLUÉS DANS LES CANAUX- Synthèse du rapport de la mission d'information et d'évaluation, 2014, Collection expertise, Lille Métropole,

HUSSEIN A. I., AHMED S. A, OSAMA T.A., 1998, Effects of organic matter on the physical and the physiochemical properties of an illitic soil, Applied Clay science 14, pp.257-278.

Rekik B., 2007, Propriétés géotechniques des sédiments de dragage traités au ciment, Thèse de Doctorat, Université de Caen, France.

Colin D., 2003, Valorisation des sédiments fins de dragage en technique routière, Thèse de Doctorat, Université de Caen, France.

MAHERZI W. 2013, Valorisation des sédiments de dragage marins bruts et/ou traites aux liants hydrauliques en technique routière, Thèse de doctorat, Université de Caen, France.

LCPC-SETRA, 1992, Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR) Guide technique. Fascicules I et II, 200 p.

LCPC-SETRA, 2000, Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (GTS) Application à la réalisation des remblais et des couches de forme Guide technique, 240 p.

SETRA-LCPC., 1992, Réalisation des remblais et des couches de forme, Guide technique, Fascicule II, Annexes techniques.

Dubois V., 2006, Etude du comportement physico-mécanique et caractérisation environnementale des sédiments marins, Thèse de Doctorat, Université d'Artois, France.

Thanh, N.T., 2009, Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière, Thèse de Doctorat, Ecole des mines de Douai, France.

Boutouil M., 1998, Traitement de vases de dragage par solidification/ stabilisation à base de ciment et additifs, Thèse de Doctorat, Université du Havre, France.

ANNEXES

Annexe 1 : Cahier des clauses techniques particulières – fourniture de modules de béton creux pour chaussée réservoir de type hydrocyl 148
Annexe 2 : Fiche technique des sédiments 157
Annexe 3 : Fiche technique des pilotes expérimentaux 166
Annexe 4 : Fiche technique des chantiers expérimentaux 170
Annexe 5 : Cahier des clauses techniques particulières – chantier chaussée réservoir 182
Annexe 6 : Cahier des clauses techniques particulière - chantier coulis 190
Annexe 7 : Comptes-rendus des réunions de suivi de chantier 201
Annexe 8 : Résultats du suivi environnemental des pilotes expérimentaux "graves traitées" à Houplines 208
Annexe 9 : Résultats du suivi environnemental des chantiers expérimentaux "hydrocyls" à Tourcoing 209
Annexe 10 : Résultats du suivi environnemental des chantiers expérimentaux "hydrocyls" à Leers 210
Annexe 11 : Résultats du suivi environnemental des chantiers expérimentaux "coulis" à Bondues 211
Annexe 12 : Résultats environnementaux (Guide Cerema – Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière) 212
Annexe 13 : Compte-rendu du Copil n°1 215
Annexe 14 : Compte-rendu du Copil n°2 225
Annexe 15 : Compte-rendu du Copil n°3 238
Annexe 16 : Compte-rendu du Copil n°4 248

Annexe 1 : Cahier des clauses techniques particulières – fourniture de modules de béton creux pour chaussée réservoir de type hydrocyl

RESEAUX SERVICES ET MOBILITE TRANSPORTS
/EAU ET ASSAINISSEMENT

CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIERES

(C.C.T.P.)

Fourniture de modules de béton creux pour chaussée réservoir de type hydrocyl

Maître d'ouvrage :
Métropole Européenne de Lille
Direction de l'Eau et Assainissement
1 rue du Ballon
CS 50 749
59034 LILLE CEDEX

Pièce n° ..

Cahier des Clauses Techniques Particulières

SOMMAIRE

1. EXPERIMENTATION SEDIMATERIAUX : 3

1.1. CONTEXTE DE L'EXPERIMENTATION : 3
1.2. DEMARCHE SEDIMATERIAUX : 4

2. OBJET DU MARCHE : 6

3. MODULES DE BETON CREUX « TEMOIN » 6

4. MODULES DE BETON CREUX « SEDIMENTS » : 6

4.1. FORMULATION DES MODULES DE BETON CREUX A BASE DE SEDIMENT ET ADAPTATION DU PROCESS : 6
4.2. ESSAIS DE COMPORTEMENT ROUTIER 6
4.3. CARACTERISTIQUES DES HYDROCYLS : 7

5. MODALITES DE LIVRAISON SUR CHANTIER 7

6. ASSISTANCE A MAITRISE D'OUVRAGE SPECIFIQUE A L'EXPERIMENTATION : 7

6.1. PRESENTATION DE NEOECO : 8
6.2. MISSIONS DE NEOECO LORS DE LA MISE EN ŒUVRE DE L'EXPERIMENTATION : 8

ANNEXE : FICHE TECHNIQUE DES SEDIMENTS 0-20MM PREPARES 10

1. Expérimentation SEDIMATERIAUX :

1.1. Contexte de l'expérimentation :

Le plan bleu métropolitain :

En partenariat avec la région Nord Pas de calais, la MEL s'engage vers une prise de compétence en matière de gestion de certaines voies d'eau dans le cadre du plan bleu métropolitain. En effet, il apparaît que ces voies répondent à des objectifs déjà identifiés dans le cadre des politiques communautaires en constituant :

- Une armature de développement des espaces naturels de la métropole et un corridor écologique remarquable
- Un élément fonctionnel de l'alimentation en eau, de l'assainissement urbain et de la prévention des inondations
- Un potentiel d'amélioration de la qualité de vie par le développement d'animations touristiques
- Une dynamisation économique par le rayonnement provoqué
- Un élément clef d'une politique plus large d'aménagement, déjà éprouvé au travers des exemples de réhabilitation des canaux anglais et hollandais et au travers des mécanismes amorcés de retournement des villes vers l'eau.

Le maillage bleu est constitué des cours d'eau principaux du réseau domanial, accueillant le transport fluvial de marchandises, tels que la Deûle ou la Lys, mais irrigue également l'ensemble du territoire métropolitain au travers des voies d'eau secondaires, connectées ou non au réseau principal et de l'ensemble du réseau des rivières et becques. Aujourd'hui, l'État et Voies Navigables de France se recentrent très fortement sur la vocation marchande de la voie d'eau au détriment des autres éléments constitutifs du maillage bleu. La mise en place du Plan Bleu Métropolitain passe donc en premier lieu par la sauvegarde et la valorisation des voies d'eau décentralisables, aujourd'hui délaissées.

Dans cette logique, l'article 56 de la loi du 30 juillet 2003 sur les Risques Naturels et Technologiques révisé par la loi du 13 août 2004 et désormais codifié à l'article L 3113-1 et suivant du Code Général de la Propriété des Personnes Publiques permet la décentralisation optionnelle des rivières et canaux. Cette loi permet désormais aux groupements de collectivités, dès lors qu'elles se dotent de la compétence requise, de solliciter le transfert en pleine propriété et à titre gratuit des rivières et canaux ne relevant pas de la catégorie des voies navigables d'intérêt national (réseau magistral) dont la consistance a été précisée par le décret du 16 août 2005. En région Nord - Pas de Calais, plusieurs voies d'eau régionales sont décentralisables (Sambre, Scarpe, etc...). La Région Nord-Pas de Calais est aujourd'hui favorable à une implication et a décidé par délibération du 25 juin 2009 de l'élaboration d'un programme d'actions ayant pour optique la préservation et la valorisation du réseau fluvial secondaire en synergie avec les projets des agglomérations et des territoires concernés.
Au sein du périmètre communautaire, plusieurs voies d'eau sont concernées par cette problématique :

- Les boucles des Prés du Hem à ARMENTIERES et NIEPPE, les boucles d'ERQUINGHEM à NIEPPE/ERQUINGHEM et délaissés de HOUPLINES
- Le Canal de SECLIN
- Les bras et délaissés de la Deûle et la Lys

- Le canal de Roubaix et la Marque Urbaine et ses bras de CROIX et TOURCOING.

Parmi ces différentes voies, certaines ont déjà fait l'objet de démarches et des études sont en cours.

Ainsi dans le cadre de la délibération 12C0701 du 14 décembre 2012 impliquant la sa prise de compétence expérimentale sur le bras de la basse Deûle, la MEL souhaite requalifier et valoriser ce cours d'eau.

1.2. Démarche SEDIMATERIAUX :

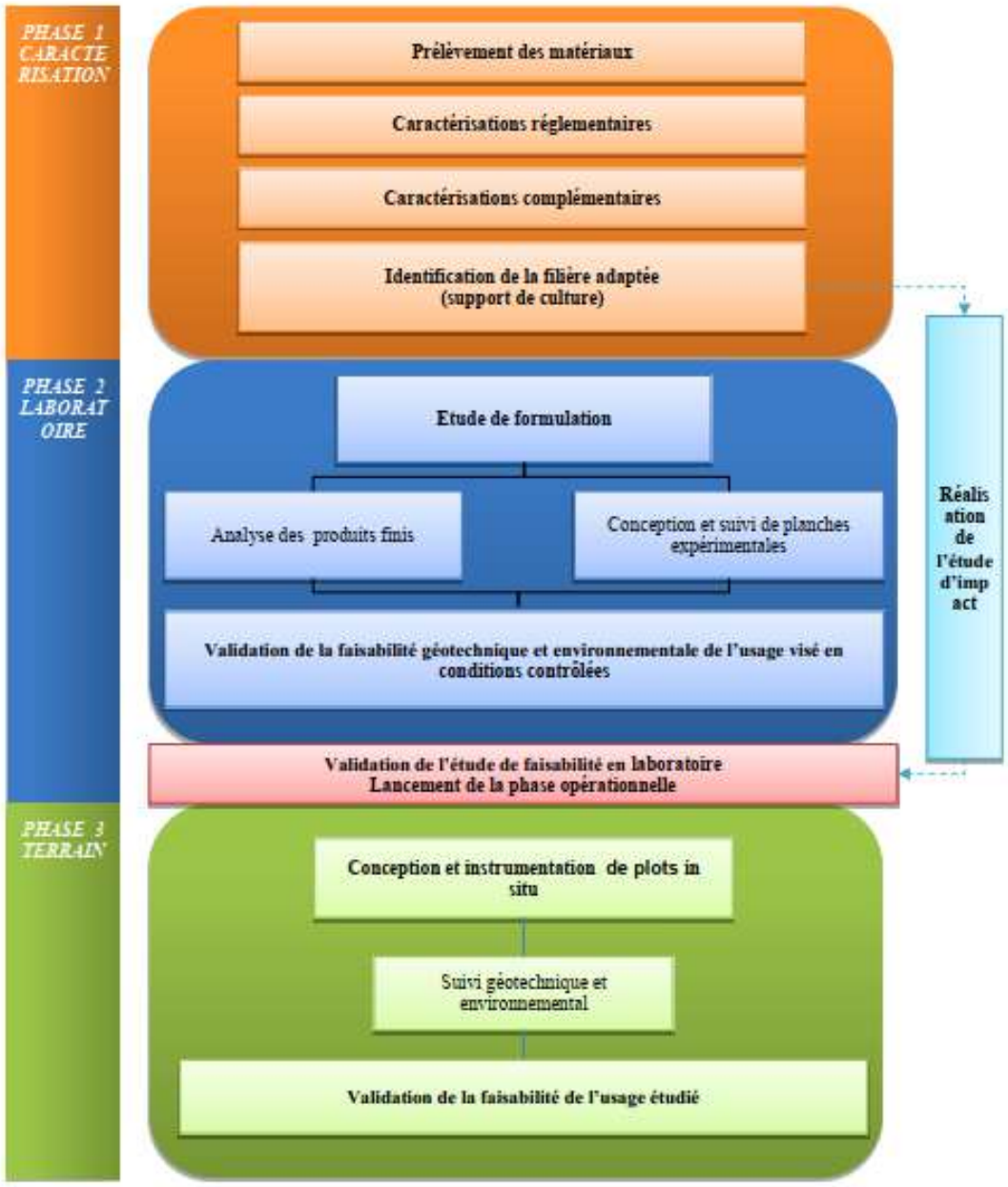
Pour la valorisation de ce cours d'eau, la MEL s'est engagée avec l'Institut Mines Télécom Lille-Douai, la DREAL, le CD2E et la Région Nord Pas de Calais dans la démarche Sédimatériaux.
La démarche SEDIMATERIAUX a pour ambition d'apporter une réponse adaptée et dimensionnée à la problématique de la gestion et de valorisation terrestre des sédiments de dragage portuaires et fluviaux. Elle se veut une démarche collective à l'échelle nationale, qui fédère les volontés locales dans la recherche de solutions opérationnelles et innovantes.
Comme illustré dans la figure ci-dessous, cette démarche passe par une validation à échelle laboratoire de la faisabilité géotechnique et environnementale de la valorisation des sédiments dans les usages visés.
Cette phase laboratoire a été réalisée par la MEL entre 2013 et 2015 en partenariat avec NEOECO et l'IMT Lille-Douai.
L'objectif de cette phase du projet était de substituer des matières granulaires « nobles » utilisées dans les coulis et les bétons de chaussée réservoir (hydrocyl) tout en maintenant des caractéristiques mécaniques fonctionnelles et environnementales acceptables.
La conclusion de cette étude laboratoire était que les sédiments peuvent être utilisés en proportion non négligeable dans les filières de type coulis autocompactant et béton en modules de chaussée réservoir.

En effet, à la fois les essais mécaniques et environnementaux ont permis de démontrer l'acceptabilité des matériaux dans les conditions suivantes :

- Utilisation jusqu'à 20 % de sédiments dans la formule de coulis ;
- Utilisation de jusqu'à 15 % de sédiments en substitution du sable dans la formule de béton en modules de chaussée réservoir ;
- Criblage et séchage préalable des sédiments nécessaire ;

Suite à ces résultats très concluants de cette étude laboratoire la MEL souhaite donc passer à la phase expérimentation à échelle réelle (phase 3 de la figure ci-dessous) en réalisant des chantiers expérimentaux à base de sédiments.

C'est donc dans cette optique que s'inscrit l'expérimentation SEDIMATERIAUX de mettre en œuvre des modules de béton creux (type hydrocyl) dont la fourniture fait l'objet du présent marché.


PHASE 1 CARACTE RISATION
Prélèvement des matériaux
Caractérisations réglementaires
Caractérisations complémentaires
Identification de la filière adaptée (support de culture)
PHASE 2 LABORAT OIRE
Etude de formulation
Analyse des produits finis
Conception et suivi de planches expérimentales
Validation de la faisabilité géotechnique et environnementale de l'usage visé en conditions contrôlées
Réalis ation de l'étude d'imp act
Validation de l'étude de faisabilité en laboratoire
Lancement de la phase opérationnelle
PHASE 3 TERRAIN
Conception et instrumentation de plots in situ
Suivi géotechnique et environnemental
Validation de la faisabilité de l'usage étudié

2. Objet du marché :

L'objet du marché est de fournir (fabrication et livraison à pied d'œuvre sur chantier) pour des chantiers de la MEL des modules de béton creux (de type hydrocyl) pour chaussée réservoir intégrant ou non des sédiments.
Les sédiments préparés 0/20 sont actuellement disponibles sur le site de la MEL situé rue de Rotterdam à Bondues et pourront être livrés sur le site de fabrication du titulaire du marché sur simple demande.

3. Modules de béton creux « témoin »

Les modules de béton creux sans sédiment serviront de témoin (dans la phase de suivi mécanique et environnemental des différents chantiers tests).
Ils auront les caractéristiques suivantes :

- Hauteur 80 mm
- Diamètre extérieur 80 mm
- Diamètre intérieur 40 mm
- Densité apparente 1 t/m3
- Porosité 60 % (équivalent à 600 l de capacité de stockage par m3)
- Résistance à la compression 50 MPa
- absorption des eaux précipitées : 1m/s
- comportement assimilable à celui d'une grave non traitée de module de 200 MPa

4. Modules de béton creux « sédiments » :

4.1. Formulation des modules de béton creux à base de sédiment et adaptation du process :

Le béton constitutif des modules de béton creux devra contenir entre 4 et 6 % de sédiments. Cela correspond à un taux de substitution de l'ordre de 10 à 15 % du sable présent dans la formule témoin (sans sédiments).

Le titulaire du marché devra réaliser l'ensemble des essais de formulation (essais de résistance à la compression, densité, ...) nécessaires afin de vérifier que l'intégration de 4 à 6 % de sédiments dans la formule permet d'atteindre les objectifs souhaités.

Le titulaire du marché a à sa charge l'éventuelle adaptation de son process de fabrication afin de pouvoir incorporer les sédiments aux produits à fabriquer.

4.2. Essais de comportement routier

Pour chaque formule de modules de béton creux « sédiment » qui sera utilisée, le titulaire du marché devra faire réaliser un essai dit de comportement routier « type CERIB ».

Cet essai est un essai comparatif entre les modules de béton creux et une structure de type grave.
Il comprend :

- La réalisation des corps d'épreuve suivant sur 1,5 m2 environ :
  - Structure type « modules de béton creux » : 40 cm de modules de béton creux + 15 cm de grave d'égalisation 20/40 compactée +géotextile + 3 cm de sable de lit de pose +pavés épaisseur 8 cm
  - Structure type « grave » : 40 cm de grave GNT (D = 80 mm) + 15 cm de grave d'égalisation 20/40 compactée +géotextile + 3 cm de sable de lit de pose +pavés épaisseur 8 cm
- L'instrumentation (mesure des efforts et des déflexions sous charge) et l'essai de chargement sur les structures types « modules de béton creux » et « grave »

4.3. Caractéristiques des hydrocyls :

Les modules de béton creux à base de sédiments auront les caractéristiques suivantes :
Pour les hydrocyls témoins, les exigences techniques minimales sont les suivantes :

- Hauteur 80 mm
- Diamètre extérieur 80 mm
- Diamètre intérieur 40 mm
- Densité apparente 1 t/m3
- Porosité 60 % (équivalent à 600 l de capacité de stockage par m3)
- Résistance à la compression 30 MPa
- absorption des eaux précipitées : 1m/s
- comportement assimilable à celui d'une grave non traitée de module de 200 MPa

5. Modalités de livraison sur chantier

Deux chantiers test ont été identifiés à savoir

A- Chantier Tourcoing :

Descriptif du chantier	Adresse de livraison	Quantité prévisionnelle d'hydrocyl à livrer	Date de livraison
Parking VL	Rue du Rhin à Tourcoing	100 Tonnes	A définir

B- Chantier Leers centre-ville :

Descriptif du chantier	Adresse de livraison	Quantité d'hydrocyl à livrer	Date de livraison
Parking VL et gare bus	Rue Roger Salengro à Leers	550 Tonnes	A définir

D'autres chantiers pourraient être susceptibles d'être livrés en hydrocyls. Ces derniers

se situent sur le territoire de la Métropole Européenne de Lille (90 communes).

Le principe général consiste à livrer les différents chantiers en matériaux à pieds d'œuvre par semi-remorque (25 Tonnes de charge utile environ) pleinement chargée. Il néanmoins possible de devoir commander de manière marginale des quantités moindre (SAV, survolumes, …) sans être inférieures à 10 Tonnes.

Le délai de livraison sera précisé dans le bon de commande sans toutefois être inférieur à 8 semaines. Les dates précises d'approvisionnement seront fixées conjointement avec l'encadrement de l'entreprise réalisant les travaux 2 à 5 jours ouvrés à l'avance.

6. Assistance à maitrise d'ouvrage spécifique à l'expérimentation :

Une assistance à maitrise d'ouvrage spécifique à l'expérimentation a été prévue par la MEL. Cette mission a été confiée à NEOECO.

6.1. Présentation de NEOECO :

Neo-Eco est un bureau d'études en ingénierie qui installe des lignes de tri de déchets et réalise de nombreux programmes de R&D dans le domaine de la valorisation de déchets. Les déchets sont de différents types : déchets organiques (plastiques, déchets verts), déchets minéraux (sédiments, mâchefers, laitiers, sable de fonderie, gravats, matériaux de déconstruction, déchets du BTP), déchets industriels,... Cette entreprise s'est spécialisée dans la création de boucles d'économie circulaire, c'est-à-dire qu'elle cherche à redonner une seconde vie aux déchets afin de remplacer des matières premières vierges par des matières premières secondaires pour créer des éco-produits.
Cela passe par la caractérisation des déchets, la formulation, des propositions de solutions innovantes de séparation et de valorisation, et la conception de nouvelles machines de tri. Cette structure apporte à ses clients des solutions complètes clefs en main.
Nous participons à de nombreux programmes collaboratifs où nous réalisons des études de Recherche et Développement, ou concevons, fabriquons et mettons en service des démonstrateurs pilotes ou industriels.
Nous voulons axer nos travaux de R&D sur des sujets à forts potentiels économiques et environnementaux. L'entreprise est très axée sur la R&D car l'innovation fait partie de ses priorités. Un ingénieriste se doit de proposer en permanence des process innovants. De nombreux programmes dans l'entreprise permettent d'inventer les process de« demain » en partenariat avec nos clients. Nous avons donc noué des partenariats avec des écoles d'ingénieurs, des universités et des centres de Recherches pour transférer des programmes de recherches vers les entreprises. Ses programmes de R&D sont orientés vers les nouveaux matériaux : sédiments, mâchefers, amiante, pneumatiques, bétons chargés, textiles, composites,...

6.2. Missions de NEOECO lors de la mise en œuvre de l'expérimentation :

NEOECO assistera le titulaire du marché en vue d'assurer la prise en compte des spécificités techniques liées à l'expérimentation SEDIMATERIAUX.

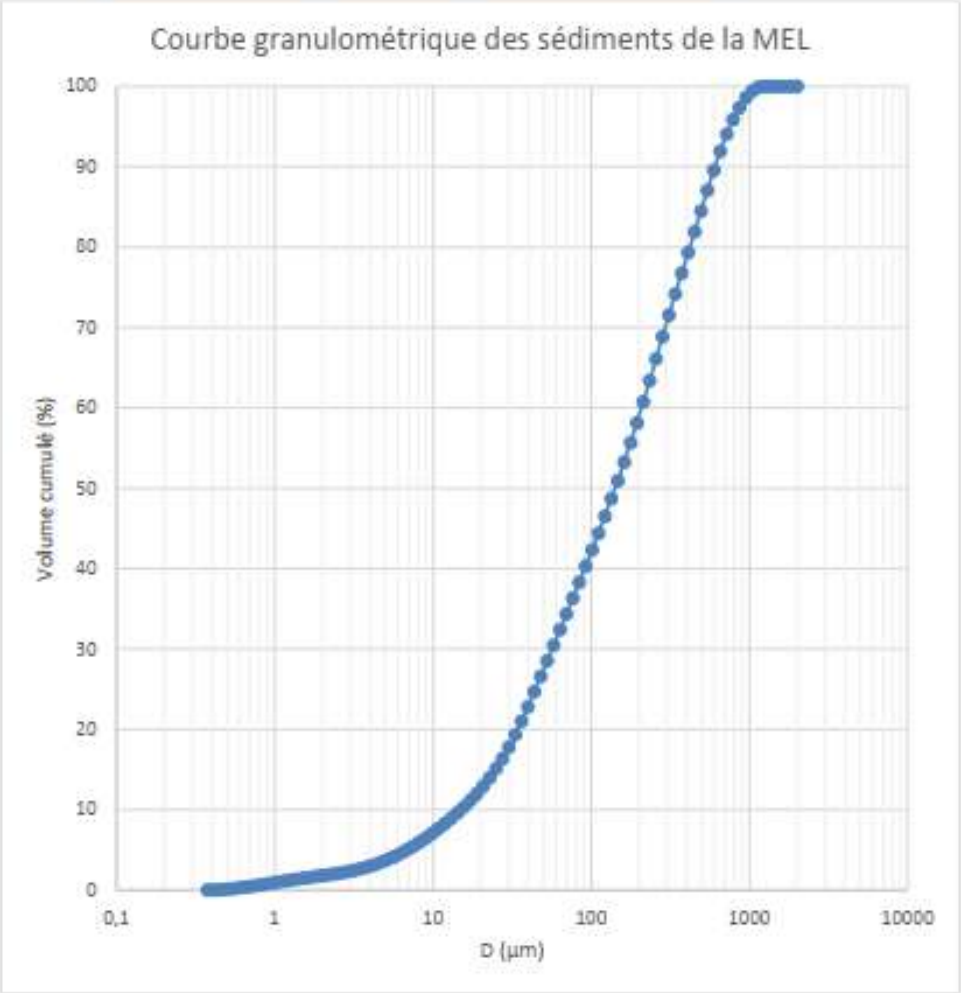
NEOECO sera donc en charge d'organiser une réunion en amont du début de la fabrication en vue d'expliquer d'une façon théorique les spécificités liées à l'expérimentation.
NEOECO assistera aussi lors de la fabrication des hydrocyls.
Des points d'arrêts seront organisés en vue de permettre à NEOECO de vérifier la conformité de la mise en œuvre par rapport aux spécificités de l'expérimentation SEDIMATERIAUX.
Les principales missions de NEOECO sont les suivantes :

- Vérifier le procédé de mise en œuvre sur site,
- vérifier l'incorporation des bons taux de sédiments
- vérifier la bonne application de formulations développées au laboratoire
- vérifier la qualité des sédiments avant utilisation
- définir des points de contrôle et de vigilance à mettre en place,
- Echantillonner des modules de béton creux pour la réalisation d'essais laboratoire en vue de la vérification des caractéristiques
- d'évaluer un temps de réalisation et un coût de matériaux et de réalisation. Cela permettra notamment de mettre à disposition des éléments clés pour l'aspect économique.
- Prendre des photographies et vidéos pour les actions de communication

Annexe : Fiche technique des Sédiments 0-20mm préparés

1) Courbe granulométrique :

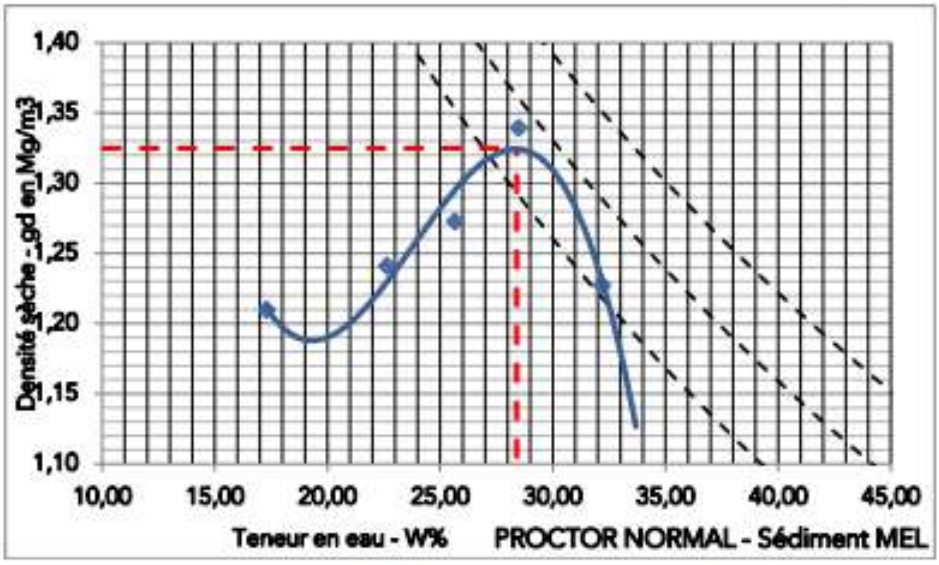
Echantillon 1	
Tamisat cumulé (%)	Diamètre maximal des granulats D (µm)
10	15,0152
25	44,4031
50	141,355
75	350,62
90	605,355



2) Courbe Proctor :

		Teneur en eau au compactage					PROCTOR MODIFIE - Moule CBR					
N° point	W% visée	Mtare	Mth	Mts	W%	W%moy	Mmoule (g)	Mth (g)	Mh (g)	Vmoule (cm3)	gh	gd
1	17	3,50	131,74	113,14	16,96	**17,29**	8474	11422	2948	2077	1,42	**1,21**
		3,54	120,44	102,93	17,62							
2	22	3,25	115,48	94,61	22,84	**22,63**	8078	11240	3162	2077	1,52	**1,24**
		3,34	123,78	101,72	22,42							
3	25	3,04	113,03	90,59	25,63	**25,65**	11099	14421	3322	2077	1,60	**1,27**
		2,97	123,99	99,27	25,67							
4	33	27,33	117,64	95,95	31,61	**32,19**	8473	11843	3370	2077	1,62	**1,23**
		26,02	139,21	111,27	32,77							
5	29	27,69	137,37	113,26	28,18	**28,48**	8078	11653	3575	2077	1,72	**1,34**
		28,11	142,62	117,02	28,79							

Résultats de l'essai Proctor Normal (IMT de Douai)



Essai Proctor normal – Densité sèche en fonction de la teneur en eau (IMT de Douai)

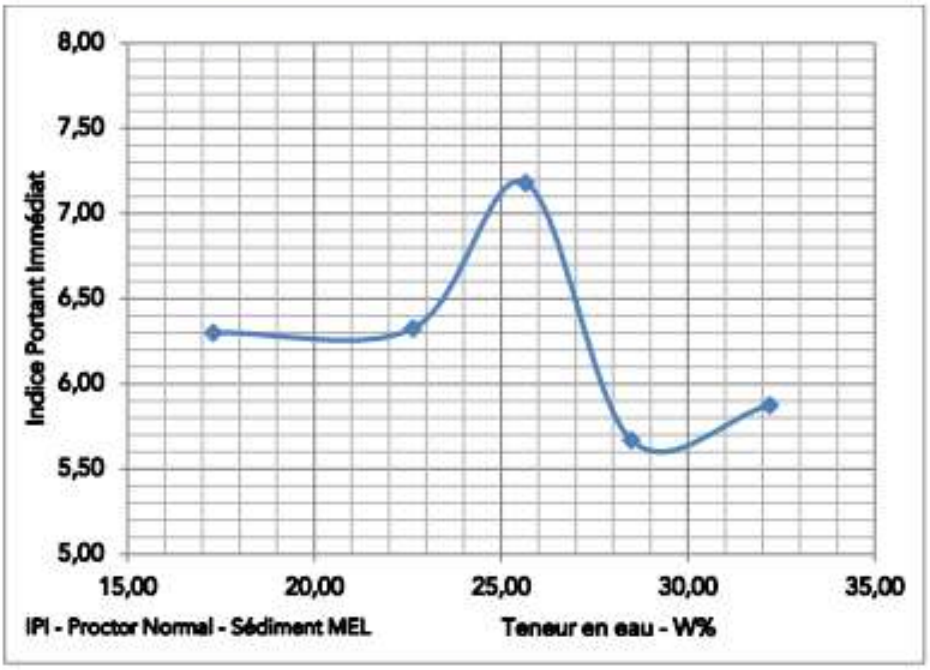
W_{OPM}	28,4 %
$\square_{d\ OPM}$	1,33 Mg/m³

3) *Indice de portant immédiat :*

Indice IPI						
Numéro de point	Teneur en eau moyenne au compactage	Charge à 2,5mm	Charge à 5mm	Indice à 2,5mm	Indice à 5mm	IPI
1	17,29	587	1260	4,40	6,30	6,30
2	22,63	632	1265	4,73	6,33	6,33
3	25,65	763	1436	5,72	7,18	7,18
4	32,19	564	1175	4,22	5,88	5,88
5	28,48	592	1134	4,43	5,67	5,67

Résultats de l'essai Indice Portant Immédiat (IMT de Douai)

IPI	**5,8**	**%**



Essai Indice Portant Immédiat (IMT de Douai)

4) Composition chimique des sédiments :

Formule du composé	Concentrations
O	51,4
Si	24,8
Ca	8,9
Al	5,9
Fe	3,7
K	1,9
Mg	1,0
Na	0,6
S	0,5
P	0,4
Ti	0,4
Zn	0,1
C	présent
Cl	traces
Cr	traces
Mn	traces
Cu	traces
Rb	traces
Sr	traces
Zr	traces
Ba	traces
Pb	traces

Tableau récapitulatif des éléments présents dans les sédiments

Nous retrouvons majoritairement de l'oxygène (O) et du silicium (Si).
En quantité plus faible, nous retrouvons du calcium (Ca), de l'aluminium (Al) et du fer (Fe).
Les autres éléments présents existent en très faibles quantités, ou considérés comme éléments traces.

5) Composition minéralogique des sédiments :

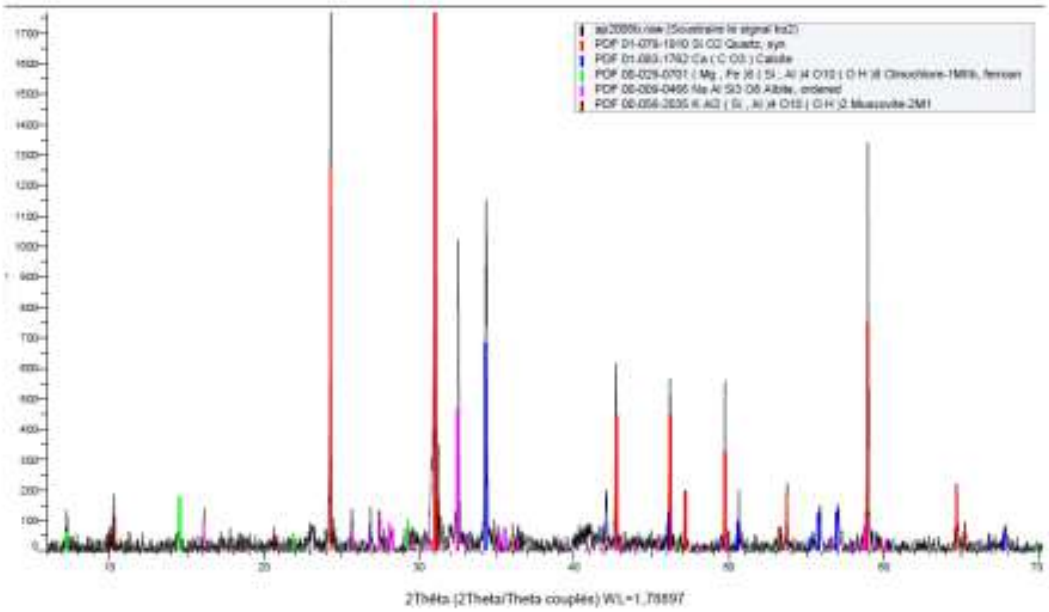


Diagramme montrant l'intensité en fonction de l'angle de déviation 2θ

Les sédiments de la MEL présentent en grande quantité :

- **du quartz (SiO_2),**
- **de la calcite ($CaCO_3$).**

Et en plus faible quantité, du clinochlore et de l'albite ($NaAlSi_3O_8$). En effet, la hauteur des pics renseigne sur les quantités présentent dans le sédiment. Plus le pic est grand, plus sa quantité est importante.

6) *Caractéristique géotechnique :*

Caractéristique	Résultats	Interprétation
Teneur en Matières organiques	• 13,15 %, pour une température de 450°C°C pendant 3 heures, • 13,82 %, pour une température de 550 °C pendant 3 heures.	–
Masse volumique	2,38 g/cm3	–
Valeur au bleu	1,3	les sédiments correspondent à un sol limoneux
Indice de plasticité	14,4	**sol moyennement plastique**

7) *Classification GTR*

Paramètres	Résultats	Classes	Interprétations
Paramètre de nature			
Dmax	<50mm	A	**Sols fins**
Le tamisat à 80 µm	>35%		
VBS	<2,5	A1	**sables limoneux**
Ip	> 12		
Paramètre d'état			
Wopn	28,4	A1h	Sable limoneux, **humide**
IPI	5,8		

Tableau 10 : Récapitulatif des résultats de la classification GTR des sédiments la MEL

Pour conclure, les sédiments de la MEL est un sol, **sable limoneux humide, classification GTR A1h.**

8) *Lixiviation pour une détermination de la nature du déchet :*

Paramètres	Unité	ISDI	Echantillon final 0-20mm
matière sèche	% massique	**<30**	66.1
COT	mg/kg MS	**30000**	**73000**
benzène	mg/kg MS		<0.05
toluène	mg/kg MS		0.05
éthylbenzène	mg/kg MS		<0.05
orthoxylène	mg/kg MS		<0.05
para- et métaxylène	mg/kg MS		<0.05
xylènes	mg/kg MS		<0.10
BTEX totaux	mg/kg MS	**6**	<0.25
naphtalène	mg/kg MS		<0.10
acénaphtylène	mg/kg MS		<0.10
acénaphtène	mg/kg MS		<0.10
fluorène	mg/kg MS		<0.10
phénanthrène	mg/kg MS		0.67
anthracène	mg/kg MS		0.13
fluoranthène	mg/kg MS		3.7
pyrène	mg/kg MS		3.7
benzo(a)anthracène	mg/kg MS		2.0
chrysène	mg/kg MS		2.7
benzo(b)fluoranthène	mg/kg MS		5.1
benzo(k)fluoranthène	mg/kg MS		2.2
benzo(a)pyrène	mg/kg MS		2.7
dibenzo(ah)anthracène	mg/kg MS		0.53
benzo(ghi)pérylène	mg/kg MS		2.9
indéno(1,2,3-cd)pyrène	mg/kg MS		2.8
Somme des HAP (10) VROM	mg/kg MS	**50**	20
Somme des HAP (16) - EPA	mg/kg MS	**50**	29
PCB 28	µg/kg MS		<2
PCB 52	µg/kg MS		2.8
PCB 101	µg/kg MS		4.6
PCB 118	µg/kg MS		4.2
PCB 138	µg/kg MS		10
PCB 153	µg/kg MS		12
PCB 180	µg/kg MS		12
PCB totaux (7)	µg/kg MS	**1000**	46
fraction C10-C12	mg/kg MS		<5
fraction C12-C16	mg/kg MS		6.0
fraction C16-C21	mg/kg MS		57
fraction C21-C40	mg/kg MS		690
hydrocarbures totaux C10-C40	mg/kg MS	**500**	**750**
COT	mg/kg MS	**500**	94
antimoine	mg/kg MS	**0.06**	**0.14**
arsenic	mg/kg MS	**0.5**	<0.05
baryum	mg/kg MS	**20**	0.35

cadmium	mg/kg MS	**0.04**	<0.004
chrome	mg/kg MS	**0.5**	0.012
cuivre	mg/kg MS	**2**	0.40
mercure	mg/kg MS	**0.01**	<0.0005
plomb	mg/kg MS	**0.5**	<0.1
molybdène	mg/kg MS	**0.5**	0.063
nickel	mg/kg MS	**0.4**	<0.1
sélénium	mg/kg MS	**0.1**	<0.039
zinc	mg/kg MS	**4**	0.21
fraction soluble	mg/kg MS	**4000**	2320
Indice phénol	mg/kg MS	**1**	<0.1
fluorures	mg/kg MS	**10**	2.8
chlorures	mg/kg MS	**800**	24
sulfate	mg/kg MS	**1000**	554

Les sédiments de la fraction 0-20mm sont des déchets non inertes. Les paramètres déclassants sont les suivants :

-Carbone organique total sur la fraction brut

-Hydrocarbure (HCT)

-Antimoine

9) Conclusion :

Essais	Résultats	Interprétation	Sous classe	Classification GTR
Caractérisation physique				
Perte au feu	13,15 pour T=450°C 13,82 pour T=550°C			
Masse volumique	2,38 g/ cm3			
Classification GTR				
Dmax	<50mm	Sol fin	A	A1h
Fraction inf. à 80µm	>35%			
Valeur de bleu de méthylène (VBS)	1,30	Sol limoneux	A1	
Indice de plasticité (Ip)	14,4	Sol moyennement plastique		
Proctor - Teneur en eau W_{OPM}	28,4%	Humide	A1h	
Indice Portant Immédiat (IPI)	5,8			
Caractérisation minéralogique				
Diffraction au rayon X (DRX)	quartz (SiO_2) – calcite ($CaCO_3$) clinochlore 1MIIb l'albite ($NaAlSi_3O_8$)			
Fluorescence des rayons X (FX)	oxygène (O) silicium (Si) calcium (Ca) l'aluminium (Al) fer (Fe).			
Caractérisation environnementale				
Ecotoxicité	NON TOXIQUE		Sédiment non inerte non dangereux	
Lixiviation	Le taux d'hydrocarbure et d'antimoine dépassent le seuil ISDI	Classe 2 : des déchets non dangereux		
Seuil S1 et seuil S2	Le taux de plomb dépasse le seuil S1 Le taux de cuivre et du zinc dépassent le seuil S2	Sédiments pollués		

Annexe 3 : Fiche technique des pilotes expérimentaux

FICHE SYNTHESE APPLICATION « GRAVE TRAITEE »

Projet : SEDIMEL

Numéro de projet : 9021

Fig. 1 : Localisation des pilotes expérimentaux

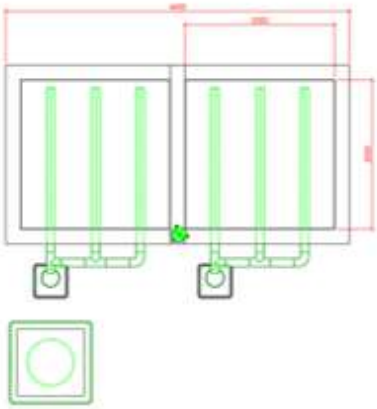


Fig. 2 : Plan des pilotes expérimentaux (du dessus)

Fig. 3 : Dimensions des pilotes expérimentaux

Pilote dit « Témoin »

CARACTERISTIQUES

Application

La grave traitée est un matériaux utilisé dans l'exécution des corps de chaussées ou de plateformes.

Formulation du matériau

Composition

Sable (%)	Gravier (%)	Liant (%)	Sédiment (%)	Chaux (%)
48	47	4	0	1

Formulation classique sans substitution avec des sédiments

EQUIPEMENT / DIMENSIONNEMENT

Diverses couches de matériaux sont effectuées afin d'obtenir une succession de couche proche de la structure routière habituelle (couche étudiée = couche d'assise).

Les équipements des pilotes expérimentaux sont les suivants :

Fonction	Equipement
Structure	Structure carrée en béton
Pente	Renformis donnant la pente à 2 %
Etanchéité	Protection anti-poinçonnement
Prélèvement	Tuyaux perforés en fond de pilote relié à un fût
Eau de process	Eau de pluie

Tab. 1 : Equipements des pilotes expérimentaux

	Dimensions	Remarques
Structure en béton	Longueur : 2400 mm Largeur : 2000 mm Hauteur : 700 mm	Déposé sur une surface horizontale et plane.
Rebord en béton	60 mm	Stockage de l'eau dans la structure (cas le + défavorable)
Fûts	30 L	Bac en PVC.
Renformis donnant la pente	2 %	Permet la récupération les eaux du suvi.
Couche de forme	Epaisseur : 10 cm	Couche drainante.
Couche d'assise	Epaisseur : 27 cm	Formulation classique de graves traitées aux liants hydrauliques.
Couche de roulement	Epaisseur : 6 cm	Pavés béton espacés.

Tab. 2 : Dimensions des pilotes expérimentaux

neo-eco

FICHE SYNTHESE APPLICATION « GRAVE TRAITEE »

Projet : SEDIMEL

Numéro de projet : 9021

Fig. 1 : Localisation des pilotes expérimentaux

Description du chantier

Les ouvrages sont soumis aux conditions d'exposition réelles d'extérieur (ensoleillement et pluviométrie)

Prélèvements selon la Norme **AFNOR EN ISO 5667**

Planification des échéances de prélèvement des échantillons

↓

Définition du mode opératoire de prélèvement des échantillons

↓

Identification des analyses à réaliser et des seuils réglementaires à respecter

↓

Installation du dispositif

Pilote dit « Témoin »

SUIVI ENVIRONNEMENTAL

Type de suivi	Début du suivi	Fin du suivi
Pilote expérimental	04/12/2019	24/11/2020

Paramètres	Unité	Seuils MEL
COT (sur éluat)	mg/l	70
Antimoine	µg/l	
Arsenic	µg/l	
Baryum	µg/l	
Cadmium	µg/l	
Chrome	µg/l	
Cuivre	µg/l	
Mercure	µg/l	
Plomb	µg/l	
Molybdène	µg/l	
Nickel	µg/l	
Sélénium	µg/l	
Etain	µg/l	
Zinc	µg/l	
Somme des métaux	µg/l	15 000
Azote kjeldahl	mgN/l	
Nitrites	mg/l	
Nitrites	mgN/l	
Nitrates	mg/l	
Nitrates	mgN/l	
Calcul de l'azote total	mgN/l	
HCT (C10-C40)	µg/l	
Somme des HAP (16) - EPA	µg/l	1
PCB totaux (7)	mg/kg	50
DBO (5 jours)	mg/l	100
DCO	mg/l	300
MES	mg/l	100

Tab. 3 : Résultats du suivi environnemental

Dépassement négligeable

Dépassement important

INNOCUITE ENVIRONNEMENTALE

VALIDEE | **NON VALIDEE**

neo-eco

FICHE SYNTHESE APPLICATION « GRAVE TRAITEE »

Projet : SEDIMEL

Numéro de projet : 9021

Fig. 1 : Localisation des pilotes expérimentaux

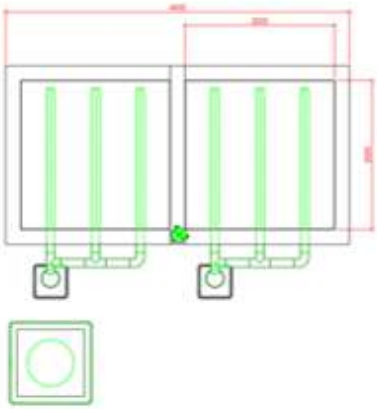


Fig. 2 : Plan des pilotes expérimentaux (du dessus)

Fig. 3 : Dimensions des pilotes expérimentaux

Pilote dit « Expérimental »

CARACTERISTIQUES

Application

La grave traitée est un matériaux utilisé dans l'exécution des corps de chaussées ou de plateformes.

Formulation du matériau

Composition

Sable (%)	Gravier (%)	Liant (%)	Sédiment (%)	Chaux (%)
38	47	4	10	1

Formulation avec substitution du sable par les sédiments (10%)

EQUIPEMENT / DIMENSIONNEMENT

Diverses couches de matériaux sont effectuées afin d'obtenir une succession de couche proche de la structure routière habituelle (couche étudiée = couche d'assise).

Les équipements des pilotes expérimentaux sont les suivants :

Fonction	Equipement
Structure	Structure carrée en béton
Pente	Renformis donnant la pente à 2 %
Etanchéité	Protection anti-poinçonnement
Prélèvement	Tuyaux perforés en fond de pilote relié à un fût
Eau de process	Eau de pluie

Tab. 1 : Equipements des pilotes expérimentaux

	Dimensions	Remarques
Structure en béton	Longueur : 2400 mm Largeur : 2000 mm Hauteur : 700 mm	Déposé sur une surface horizontale et plane.
Rebord en béton	60 mm	Stockage de l'eau dans la structure (cas le + défavorable)
Fûts	30 L	Bac en PVC.
Renformis donnant la pente	2 %	Permet la récupération les eaux du suivi.
Couche de forme	Epaisseur : 10 cm	Couche drainante.
Couche d'assise	Epaisseur : 27 cm	Formulation classique de graves traitées aux liants hydrauliques.
Couche de roulement	Epaisseur : 6 cm	Pavés béton espacés.

Tab. 2 : Dimensions des pilotes expérimentaux

neo-eco

FICHE SYNTHESE APPLICATION « GRAVE TRAITEE »

Projet : SEDIMEL

Numéro de projet : 9021

Fig. 1 : Localisation des pilotes expérimentaux

Description du chantier

Les ouvrages sont soumis aux conditions d'exposition réelles d'extérieur (ensoleillement et pluviométrie)

Prélèvements selon la Norme **AFNOR EN ISO 5667**

Planification des échéances de prélèvement des échantillons

↓

Définition du mode opératoire de prélèvement des échantillons

↓

Identification des analyses à réaliser et des seuils réglementaires à respecter

↓

Installation du dispositif

Pilote dit « Témoin »

SUIVI ENVIRONNEMENTAL

Type de suivi	Début du suivi	Fin du suivi
Pilote expérimental	04/12/2019	24/11/2020

Paramètres	Unité	Seuils MEL
COT (sur éluat)	mg/l	70
Antimoine	µg/l	
Arsenic	µg/l	
Baryum	µg/l	
Cadmium	µg/l	
Chrome	µg/l	
Cuivre	µg/l	
Mercure	µg/l	
Plomb	µg/l	
Molybdène	µg/l	
Nickel	µg/l	
Sélénium	µg/l	
Etain	µg/l	
Zinc	µg/l	
Somme des métaux	µg/l	15 000
Azote kjeldahl	mgN/l	
Nitrites	mg/l	
Nitrites	mgN/l	
Nitrates	mg/l	
Nitrates	mgN/l	
Calcul de l'azote total	mgN/l	
HCT (C10-C40)	µg/l	
Somme des HAP (16) - EPA	µg/l	1
PCB totaux (7)	mg/kg	50
DBO (5 jours)	mg/l	100
DCO	mg/l	300
MES	mg/l	100

Tab. 3 : Résultats du suivi environnemental

Dépassement négligeable

Dépassement important

INNOCUITE ENVIRONNEMENTALE

VALIDEE **NON VALIDEE**

neo-eco

Annexe 4 : Fiche technique des chantiers expérimentaux

FICHE SYNTHESE APPLICATION « HYDROCYLS » - Tourcoing

Projet : SEDIMEL

Numéro de projet : 9021

Fig. 1 : Les hydrocyls

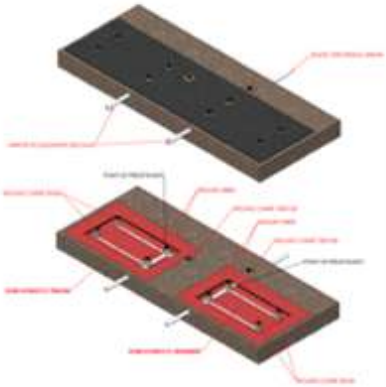


Fig. 2 : Modélisation 3D des chantiers test

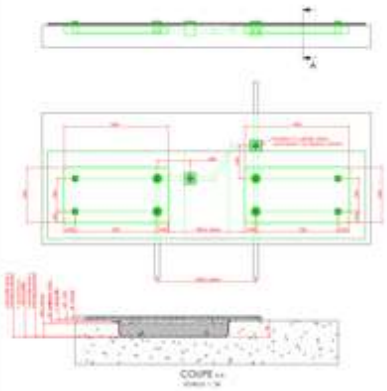


Fig. 3 : Dimensionnement des chantiers test

Chantier dit « Témoin »

CARACTERISTIQUES

Application

Une chaussée réservoir est une chaussée composée de matériaux granulaires ou préfabriqués (ex : cylindres creux en béton préfabriqués, hydrocyls) ayant une porosité importante assurant ainsi une capacité de stockage importante.

Formulation du matériau

Composition

Eau	Sable	Granulat	Sédiments	Ciment
10 %	30 %	45 %	0 %	15 %

Formulation classique sans substitution avec des sédiments

EMPLACEMENT

L'ouvrage est situé dans la ville de Tourcoing.

Le plan ci-dessous illustre l'emplacement des hydrocyls :

Fig. 4 : Localisation du chantier test à Tourcoing

EQUIPEMENT / DIMENSIONNEMENT

Equipement	Dimension / Informations
Longueur	19 mètres (sur 2 zones)
Largeur	10 mètres (sur 2 zones)
Epaisseur	0,9 mètres dont 0,6 mètres d'hydrocyl

Tab. 1 : Dimensions du chantier test à Tourcoing

neo-eco

FICHE SYNTHESE APPLICATION « HYDROCYLS » - Tourcoing

Projet : SEDIMEL

Numéro de projet : 9021

Chantier dit « Témoin »

Fig. 1 : Les hydrocyls

Description du chantier

Les ouvrages sont soumis aux conditions d'exposition réelles d'extérieur (ensoleillement et pluviométrie)

Prélèvements selon la Norme **AFNOR EN ISO 5667**

Planification des échéances de prélèvement des échantillons

↓

Définition du mode opératoire de prélèvement des échantillons

↓

Identification des analyses à réaliser et des seuils réglementaires à respecter

↓

Installation du dispositif

SUIVI ENVIRONNEMENTAL

Type de suivi	Début du suivi	Fin du suivi
Chantier	02/05/2019	28/04/2020

Paramètres	Unité	Seuils MEL
COT (sur éluat)	mg/l	70
Antimoine	µg/l	
Arsenic	µg/l	
Baryum	µg/l	
Cadmium	µg/l	
Chrome	µg/l	
Cuivre	µg/l	
Mercure	µg/l	
Plomb	µg/l	
Molybdène	µg/l	
Nickel	µg/l	
Sélénium	µg/l	
Etain	µg/l	
Zinc	µg/l	
Somme des métaux	µg/l	15 000
Azote kjeldahl	mgN/l	
Nitrites	mg/l	
Nitrites	mgN/l	
Nitrates	mg/l	
Nitrates	mgN/l	
Calcul de l'azote total	mgN/l	
HCT (C10-C40)	µg/l	
Somme des HAP (16) - EPA	µg/l	1
PCB totaux (7)	mg/kg	50
DBO (5 jours)	mg/l	100
DCO	mg/l	300
MES	mg/l	100

Tab. 2 : Résultats du suivi environnemental

Dépassement négligeable

Dépassement important

INNOCUITE ENVIRONNEMENTALE

VALIDEE | **NON VALIDEE**

neo-eco

FICHE SYNTHESE APPLICATION « HYDROCYLS » - Tourcoing

Projet : SEDIMEL

Numéro de projet : 9021

Chantier dit « Expérimental »

Fig. 1 : Les hydrocyls

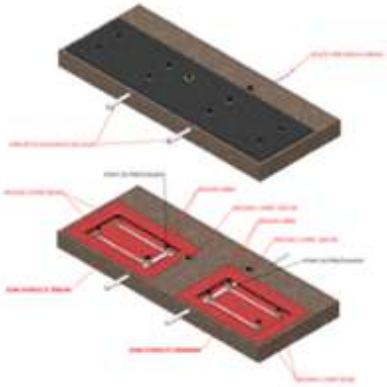


Fig. 2 : Modélisation 3D des chantiers test

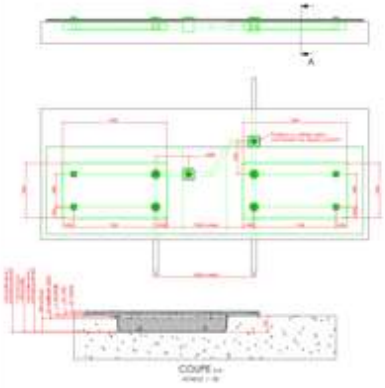


Fig. 3 : Dimensionnement des chantiers test

CARACTERISTIQUES

Application

Une chaussée réservoir est une chaussée composée de matériaux granulaires ou préfabriqués (ex : cylindres creux en béton préfabriqués, hydrocyls) ayant une porosité importante assurant ainsi une capacité de stockage importante.

Formulation du matériau

Composition

Eau	Sable	Granulat	Sédiments	Ciment
10 %	24 %	45 %	6 %	15 %

Formulation avec substitution du sable par les sédiments (6%)

EMPLACEMENT

L'ouvrage est situé dans la ville de Tourcoing.

Le plan ci-dessous illustre l'emplacement des hydrocyls :

Fig. 4 : Localisation du chantier test à Tourcoing

EQUIPEMENT / DIMENSIONNEMENT

Equipement	Dimension / Informations
Longueur	19 mètres (sur 2 zones)
Largeur	10 mètres (sur 2 zones)
Epaisseur	0,9 mètres dont 0,6 mètres d'hydrocyl

Tab. 1 : Dimensions du chantier test à Tourcoing

neo-eco

FICHE SYNTHESE APPLICATION « HYDROCYLS » - Tourcoing

Projet : SEDIMEL

Numéro de projet : 9021

Chantier dit « Expérimental »

Description du chantier

Les ouvrages sont soumis aux conditions d'exposition réelles d'extérieur (ensoleillement et pluviométrie)

Prélèvements selon la Norme **AFNOR EN ISO 5667**

Planification des échéances de prélèvement des échantillons

↓

Définition du mode opératoire de prélèvement des échantillons

↓

Identification des analyses à réaliser et des seuils réglementaires à respecter

↓

Installation du dispositif

Essai mécanique réalisé	Formulation 6 %
Tassement lors du 1er cycle de chargement sous 65 kN (mm)	5,4
Tassement cumulé lors du 10ème cycle de chargement à 65 kN (mm)	8,4
Tassement cumulé sous 65 kN lors de la dernière rampe de chargement (mm)	8,6

Fig. 5 : Comportement mécanique des hydrocyls

SUIVI ENVIRONNEMENTAL

Type de suivi	Début du suivi	Fin du suivi
Chantier	02/05/2019	28/04/2020

Paramètres	Unité	Seuils MEL
COT (sur éluat)	mg/l	70
Antimoine	µg/l	
Arsenic	µg/l	
Baryum	µg/l	
Cadmium	µg/l	
Chrome	µg/l	
Cuivre	µg/l	
Mercure	µg/l	
Plomb	µg/l	
Molybdène	µg/l	
Nickel	µg/l	
Sélénium	µg/l	
Etain	µg/l	
Zinc	µg/l	
Somme des métaux	µg/l	15 000
Azote kjeldahl	mgN/l	
Nitrites	mg/l	
Nitrites	mgN/l	
Nitrates	mg/l	
Nitrates	mgN/l	
Calcul de l'azote total	mgN/l	
HCT (C10-C40)	µg/l	
Somme des HAP (16) - EPA	µg/l	1
PCB totaux (7)	mg/kg	50
DBO (5 jours)	mg/l	100
DCO	mg/l	300
MES	mg/l	100

Tab. 2 : Résultats du suivi environnemental

Dépassement négligeable

Dépassement important

INNOCUITE ENVIRONNEMENTALE

VALIDEE **NON VALIDEE**

neo-eco

FICHE SYNTHESE APPLICATION « HYDROCYLS » - Leers

Projet : SEDIMEL

Numéro de projet : 9021

Chantier dit « Témoin »

Fig. 1 : Les hydrocyls

Fig. 2 : Modélisation 3D des chantiers test

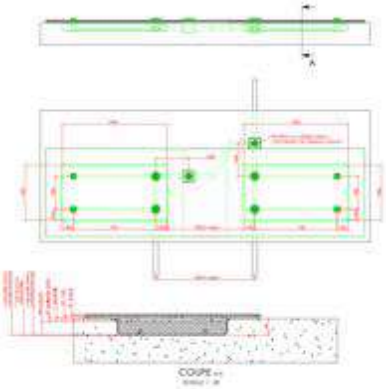


Fig. 3 : Dimensionnement des chantiers test

CARACTERISTIQUES

Application

Une chaussée réservoir est une chaussée composée de matériaux granulaires ou préfabriqués (ex : cylindres creux en béton préfabriqués, hydrocyls) ayant une porosité importante assurant ainsi une capacité de stockage importante.

Formulation du matériau

Composition

Eau	Sable	Granulat	Sédiments	Ciment
10 %	30 %	45 %	0 %	15 %

Formulation classique sans substitution avec des sédiments

EMPLACEMENT

L'ouvrage est situé dans la ville de Leers.

Le plan ci-dessous illustre l'emplacement des hydrocyls :

Fig. 4 : Localisation du chantier test à Leers

EQUIPEMENT / DIMENSIONNEMENT

Equipement	Dimension / Informations
Longueur	76 mètres
Largeur	10 mètres
Epaisseur	0,9 mètres dont 0,6 mètres d'hydrocyl

Tab. 1 : Dimensions du chantier test à Leers

neo-eco

FICHE SYNTHESE APPLICATION « HYDROCYLS » - Leers

Projet : SEDIMEL

Numéro de projet : 9021

Fig. 1 : Les hydrocyls

Description du chantier

Les ouvrages sont soumis aux conditions d'exposition réelles d'extérieur (ensoleillement et pluviométrie)

Prélèvements selon la Norme **AFNOR EN ISO 5667**

Planification des échéances de prélèvement des échantillons

↓

Définition du mode opératoire de prélèvement des échantillons

↓

Identification des analyses à réaliser et des seuils réglementaires à respecter

↓

Installation du dispositif

Chantier dit « Témoin »

SUIVI ENVIRONNEMENTAL

Type de suivi	Début du suivi	Fin du suivi
Chantier	08/10/2019	29/09/2020

Paramètres	Unité	Seuils MEL
COT (sur éluat)	mg/l	70
Antimoine	µg/l	
Arsenic	µg/l	
Baryum	µg/l	
Cadmium	µg/l	
Chrome	µg/l	
Cuivre	µg/l	
Mercure	µg/l	
Plomb	µg/l	
Molybdène	µg/l	
Nickel	µg/l	
Sélénium	µg/l	
Etain	µg/l	
Zinc	µg/l	
Somme des métaux	µg/l	15 000
Azote kjeldahl	mgN/l	
Nitrites	mg/l	
Nitrites	mgN/l	
Nitrates	mg/l	
Nitrates	mgN/l	
Calcul de l'azote total	mgN/l	
HCT (C10-C40)	µg/l	
Somme des HAP (16) - EPA	µg/l	1
PCB totaux (7)	mg/kg	50
DBO (5 jours)	mg/l	100
DCO	mg/l	300
MES	mg/l	100

Tab. 2 : Résultats du suivi environnemental

Dépassement négligeable

Dépassement important

INNOCUITE ENVIRONNEMENTALE

VALIDEE **NON VALIDEE**

neo-eco

FICHE SYNTHESE APPLICATION « HYDROCYLS » - Leers

Projet : SEDIMEL

Numéro de projet : 9021

Chantier dit « Expérimental »

Fig. 1 : Les hydrocyls

Fig. 2 : Modélisation 3D des chantiers test

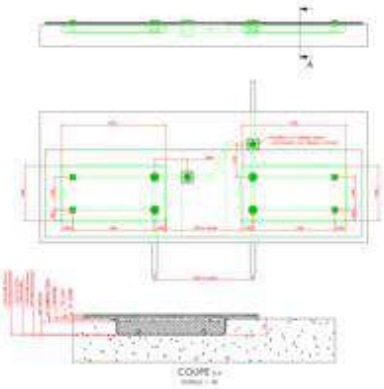


Fig. 3 : Dimensionnement des chantiers test

CARACTERISTIQUES

Application

Une chaussée réservoir est une chaussée composée de matériaux granulaires ou préfabriqués (ex : cylindres creux en béton préfabriqués, hydrocyls) ayant une porosité importante assurant ainsi une capacité de stockage importante.

Formulation du matériau

Composition

Eau	Sable	Granulat	Sédiments	Ciment
10 %	25 %	45 %	5 %	15 %

Formulation avec substitution du sable par les sédiments (5%)

EMPLACEMENT

L'ouvrage est situé dans la ville de Leers.

Le plan ci-dessous illustre l'emplacement des hydrocyls :

Fig. 4 : Localisation du chantier test à Leers

EQUIPEMENT / DIMENSIONNEMENT

Equipement	Dimension / Informations
Longueur	76 mètres
Largeur	10 mètres
Epaisseur	0,9 mètres dont 0,6 mètres d'hydrocyl

Tab. 1 : Dimensions du chantier test à Leers

neo-eco

FICHE SYNTHESE APPLICATION « HYDROCYLS » - Leers

Projet : SEDIMEL

Numéro de projet : 9021

Description du chantier

Les ouvrages sont soumis aux conditions d'exposition réelles d'extérieur (ensoleillement et pluviométrie)

Prélèvements selon la Norme **AFNOR EN ISO 5667**

Planification des échéances de prélèvement des échantillons

↓

Définition du mode opératoire de prélèvement des échantillons

↓

Identification des analyses à réaliser et des seuils réglementaires à respecter

↓

Installation du dispositif

Essai mécanique réalisé	Formulation 5 %
Tassement lors du 1er cycle de chargement sous 65 kN (mm)	5,5
Tassement cumulé lors du 10ème cycle de chargement à 65 kN (mm)	9,2
Tassement cumulé sous 65 kN lors de la dernière rampe de chargement (mm)	9,4

Fig. 5 : Comportement mécanique des hydrocyls

Chantier dit « Expérimental »

SUIVI ENVIRONNEMENTAL

Type de suivi	Début du suivi	Fin du suivi
Chantier	08/10/2019	29/09/2020

Paramètres	Unité	Seuils MEL
COT (sur éluat)	mg/l	70
Antimoine	µg/l	
Arsenic	µg/l	
Baryum	µg/l	
Cadmium	µg/l	
Chrome	µg/l	
Cuivre	µg/l	
Mercure	µg/l	
Plomb	µg/l	
Molybdène	µg/l	
Nickel	µg/l	
Sélénium	µg/l	
Etain	µg/l	
Zinc	µg/l	
Somme des métaux	µg/l	15 000
Azote kjeldahl	mgN/l	
Nitrites	mg/l	
Nitrites	mgN/l	
Nitrates	mg/l	
Nitrates	mgN/l	
Calcul de l'azote total	mgN/l	
HCT (C10-C40)	µg/l	
Somme des HAP (16) - EPA	µg/l	1
PCB totaux (7)	mg/kg	50
DBO (5 jours)	mg/l	100
DCO	mg/l	300
MES	mg/l	100

Tab. 2 : Résultats du suivi environnemental

Dépassement négligeable

Dépassement important

INNOCUITE ENVIRONNEMENTALE

VALIDEE **NON VALIDEE**

neo-eco

FICHE SYNTHESE APPLICATION « COULIS»

Projet : SEDIMEL

Numéro de projet : 9021

Chantier dit « Témoin »

Fig. 1 : Prélèvement des eaux de suivi du coulis témoin

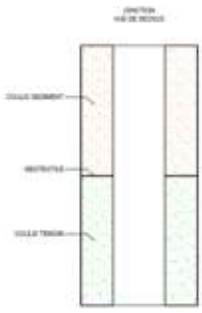


Fig. 2 : Délimitation entre le chantier test témoin et expérimental

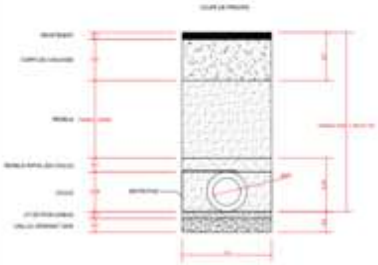


Fig. 3 : Dimensionnement du profil des chantiers test

CARACTERISTIQUES

Application

Le coulis est un matériau autocompactant utilisé pour le remblayage des tranchées. Il combine le caractère autoplaçant, une portance rapide et des caractéristiques mécaniques adaptées à son usage.

Formulation du matériau

Composition

CEM I 52.5	Rolac PFLH	Cendres volantes	Sédiments	Fibres
4 %	0 %	96 %	0 %	0,15 %

Formulation classique sans substitution avec des sédiments

EMPLACEMENT

L'ouvrage de coulis est situé chemin de beau séjour à Bondues.

Le plan ci-dessous illustre le linéaire de 600 m de la ville de Bondues concerné par le coulage des coulis :

Fig. 4 : Localisation du chantier test de coulis

EQUIPEMENT / DIMENSIONNEMENT

Equipement	Dimension / Informations
Linéaire de canalisation	600 m au total (témoin + expérimental)
Diamètre de la canalisation en grès	300 à 500 mm
Volume de coulis	700 m3 au total (témoin + expérimental)
Eau de process	Eau de pluie

Tab. 1 : Dimensions du chantier coulis

neo-eco

FICHE SYNTHESE APPLICATION « COULIS»

Projet : SEDIMEL

Numéro de projet : 9021

Fig. 1 : Localisation du point de prélèvement témoin

Description du chantier

Les ouvrages sont soumis aux conditions d'exposition réelles d'extérieur (ensoleillement et pluviométrie)

Prélèvements selon la Norme **AFNOR EN ISO 5667**

Planification des échéances de prélèvement des échantillons

↓

Définition du mode opératoire de prélèvement des échantillons

↓

Identification des analyses à réaliser et des seuils réglementaires à respecter

↓

Installation du dispositif

Chantier dit « Témoin »

SUIVI ENVIRONNEMENTAL

Type de suivi	Début du suivi	Fin du suivi
Chantier	08/10/2019	29/09/2020

Paramètres	Unité	Seuils MEL
COT (sur éluat)	mg/l	70
Antimoine	µg/l	
Arsenic	µg/l	
Baryum	µg/l	
Cadmium	µg/l	
Chrome	µg/l	
Cuivre	µg/l	
Mercure	µg/l	
Plomb	µg/l	
Molybdène	µg/l	
Nickel	µg/l	
Sélénium	µg/l	
Etain	µg/l	
Zinc	µg/l	
Somme des métaux	µg/l	15 000
Azote kjeldahl	mgN/l	
Nitrites	mg/l	
Nitrites	mgN/l	
Nitrates	mg/l	
Nitrates	mgN/l	
Calcul de l'azote total	mgN/l	
HCT (C10-C40)	µg/l	
Somme des HAP (16) - EPA	µg/l	1
PCB totaux (7)	mg/kg	50
DBO (5 jours)	mg/l	100
DCO	mg/l	300
MES	mg/l	100

Tab. 3 : Résultats du suivi environnemental

Dépassement négligeable

Dépassement important

INNOCUITE ENVIRONNEMENTALE

VALIDEE **NON VALIDEE**

neo-eco

FICHE SYNTHESE APPLICATION « COULIS»

Projet : SEDIMEL

Numéro de projet : 9021

Fig. 1 : Prélèvement des eaux de suivi du coulis expérimental

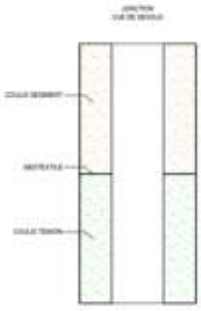


Fig. 2 : Délimitation entre le chantier test témoin et expérimental

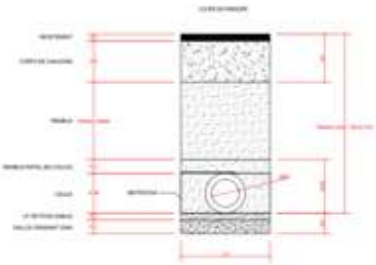


Fig. 3 : Dimensionnement du profil des chantiers test

Chantier dit « Expérimental »

CARACTERISTIQUES

Application

Le coulis est un matériau autocompactant utilisé pour le remblayage des tranchées. Il combine le caractère autoplaçant, une portance rapide et des caractéristiques mécaniques adaptées à son usage.

Formulation du matériau

Composition

CEM I 52.5	Rolac PI LH	Cendres volantes	Sédiments	Fibres
0 %	8 %	72 %	20 %	0,15 %

Formulation avec substitution du CEM I et des cendres volantes par les sédiments

EMPLACEMENT

L'ouvrage de coulis est situé chemin de beau séjour à Bondues.

Le plan ci-dessous illustre le linéaire de 600 m de la ville de Bondues concerné par le coulage des coulis :

Fig. 4 : Localisation du chantier test de coulis

EQUIPEMENT / DIMENSIONNEMENT

Equipement	Dimension / Informations
Linéaire de canalisation	600 m au total (témoin + expérimental)
Diamètre de la canalisation en grès	300 à 500 mm
Volume de coulis	700 m3 au total (témoin + expérimental)
Eau de process	Eau de pluie

Tab. 1 : Dimensions du chantier coulis

neo-eco

FICHE SYNTHESE APPLICATION « COULIS»

Projet : SEDIMEL

Numéro de projet : 9021

Fig. 1 : Localisation du point de prélèvement expérimental

Description du chantier

Les ouvrages sont soumis aux conditions d'exposition réelles d'extérieur (ensoleillement et pluviométrie)

Prélèvements selon la Norme **AFNOR EN ISO 5667**

Planification des échéances de prélèvement des échantillons

↓

Définition du mode opératoire de prélèvement des échantillons

↓

Identification des analyses à réaliser et des seuils réglementaires à respecter

↓

Installation du dispositif

Chantier dit « Expérimental »

SUIVI ENVIRONNEMENTAL

Type de suivi	Début du suivi	Fin du suivi
Chantier	08/10/2019	29/09/2020

Paramètres	Unité	Seuils MEL
COT (sur éluat)	mg/l	70
Antimoine	µg/l	
Arsenic	µg/l	
Baryum	µg/l	
Cadmium	µg/l	
Chrome	µg/l	
Cuivre	µg/l	
Mercure	µg/l	
Plomb	µg/l	
Molybdène	µg/l	
Nickel	µg/l	
Sélénium	µg/l	
Etain	µg/l	
Zinc	µg/l	
Somme des métaux	µg/l	15 000
Azote kjeldahl	mgN/l	
Nitrites	mg/l	
Nitrites	mgN/l	
Nitrates	mg/l	
Nitrates	mgN/l	
Calcul de l'azote total	mgN/l	
HCT (C10-C40)	µg/l	
Somme des HAP (16) - EPA	µg/l	1
PCB totaux (7)	mg/kg	50
DBO (5 jours)	mg/l	100
DCO	mg/l	300
MES	mg/l	100

Tab. 2 : Résultats du suivi environnemental

Dépassement négligeable

Dépassement important

INNOCUITE ENVIRONNEMENTALE

VALIDEE **NON VALIDEE**

neo-eco

CCTP Travaux HYDROCYL |

Proposition de contenu spécifique à l'expérimentation SEDIMATERIAUX

1. Sommaire

1. Sommaire 2

2. Expérimentation SEDIMATERIAUX : 3

2.1. Contexte de l'expérimentation : 3
2.2. Démarche SEDIMATERIAUX : 4
2.3. Mise en œuvre de l'expérimentation : 6
2.3.1. Principe général : 6
2.3.2. Spécificités techniques liées à l'expérimentation : 6
2.3.3. Assistance à maîtrise d'ouvrage spécifique à l'expérimentation : 7
2.4. Suivi à l'issue de l'expérimentation : 8

Annexe : EXPÉRIMENTATION SÉDIMATÉRIAUX HYDROLCYL 9

2. Expérimentation SEDIMATERIAUX :

2.1. Contexte de l'expérimentation :

Le plan bleu métropolitain :

En partenariat avec la région Nord Pas de calais, la MEL s'engage vers une prise de compétence en matière de gestion de certaines voies d'eau dans le cadre du plan bleu métropolitain. En effet, il apparaît que ces voies répondent à des objectifs déjà identifiés dans le cadre des politiques communautaires en constituant :

- Une armature de développement des espaces naturels de la métropole et un corridor écologique remarquable
- Un élément fonctionnel de l'alimentation en eau, de l'assainissement urbain et de la prévention des inondations
- Un potentiel d'amélioration de la qualité de vie par le développement d'animations touristiques
- Une dynamisation économique par le rayonnement provoqué
- Un élément clef d'une politique plus large d'aménagement, déjà éprouvé au travers des exemples de réhabilitation des canaux anglais et hollandais et au travers des mécanismes amorcés de retournement des villes vers l'eau.

Le maillage bleu est constitué des cours d'eau principaux du réseau domanial, accueillant le transport fluvial de marchandises, tels que la Deûle ou la Lys, mais irrigue également l'ensemble du territoire métropolitain au travers des voies d'eau secondaires, connectées ou non au réseau principal et de l'ensemble du réseau des rivières et becques. Aujourd'hui, l'État et Voies Navigables de France se recentrent très fortement sur la vocation marchande de la voie d'eau au détriment des autres éléments constitutifs du maillage bleu. La mise en place du Plan Bleu Métropolitain passe donc en premier lieu par la sauvegarde et la valorisation des voies d'eau décentralisables, aujourd'hui délaissées.

Dans cette logique, l'article 56 de la loi du 30 juillet 2003 sur les Risques Naturels et Technologiques révisé par la loi du 13 août 2004 et désormais codifié à l'article L 3113-1 et suivant du Code Général de la Propriété des Personnes Publiques permet la décentralisation optionnelle des rivières et canaux. Cette loi permet désormais aux groupements de collectivités, dès lors qu'elles se dotent de la compétence requise, de solliciter le transfert en pleine propriété et à titre gratuit des rivières et canaux ne relevant pas de la catégorie des voies navigables d'intérêt national (réseau magistral) dont la consistance a été précisée par le décret du 16 août 2005. En région Nord - Pas de Calais, plusieurs voies d'eau régionales sont décentralisables (Sambre, Scarpe, etc...). La Région Nord-Pas de Calais est aujourd'hui favorable à une implication et a décidé par délibération du 25 juin 2009 de l'élaboration d'un programme d'actions ayant pour optique la préservation et la valorisation du réseau fluvial secondaire en synergie avec les projets des agglomérations et des territoires concernés.

www.neo-eco.fr
Tel : +33 (0) 3 20 10 31 18 - Fax : +33 (0) 3 20 10 31 13
1 Rue de la Source, 59320 Hallennes Lez Haubourdin, France.
SAS au capital de 550.890 € - RCS : Lille Métropole - SIRET : 811 041 367 00020 - NAF : 7112B - TVA : FR 72 811041367

Au sein du périmètre communautaire, plusieurs voies d'eau sont concernées par cette problématique :

- Les boucles des Prés du Hem à ARMENTIERES et NIEPPE, les boucles d'ERQUINGHEM à NIEPPE/ERQUINGHEM et délaissés de HOUPLINES
- Le Canal de SECLIN
- Les bras et délaissés de la Deûle et la Lys
- Le canal de Roubaix et la Marque Urbaine et ses bras de CROIX et TOURCOING.

Parmi ces différentes voies, certaines ont déjà fait l'objet de démarches et des études sont en cours.

Ainsi dans le cadre de la délibération 12C0701 du 14 décembre 2012 impliquant la sa prise de compétence expérimentale sur le bras de la basse Deûle, la MEL souhaite requalifier et valoriser ce cours d'eau.

2.2. Démarche SEDIMATERIAUX :

Pour la valorisation de ce cours d'eau, la MEL s'est engagée avec l'Institut Mines Télécom Lille-Douai, la DREAL, le CD2E et la Région Nord Pas de Calais dans la démarche Sédimatériaux.

La démarche SEDIMATERIAUX a pour ambition d'apporter une réponse adaptée et dimensionnée à la problématique de la gestion et de valorisation terrestre des sédiments de dragage portuaires et fluviaux. Elle se veut une démarche collective à l'échelle nationale, qui fédère les volontés locales dans la recherche de solutions opérationnelles et innovantes.

Comme illustré dans la figure ci-dessous, cette démarche passe par une validation à échelle laboratoire de la faisabilité géotechnique et environnementale de la valorisation des sédiments dans les usages visés.

Cette phase laboratoire a été réalisée par la MEL entre 2013 et 2015 en partenariat avec NEOECO et l'IMT Lille-Douai. L'objectif de cette phase du projet était de substituer des matières granulaires « nobles » utilisées dans les coulis et les bétons de chaussée réservoir (hydrocyl) tout en maintenant des caractéristiques mécaniques fonctionnelles et environnementales acceptables.

La conclusion de cette étude laboratoire était que les sédiments peuvent être utilisés en proportion non négligeable dans les filières de type coulis autocompactant et béton en modules de chaussée réservoir.

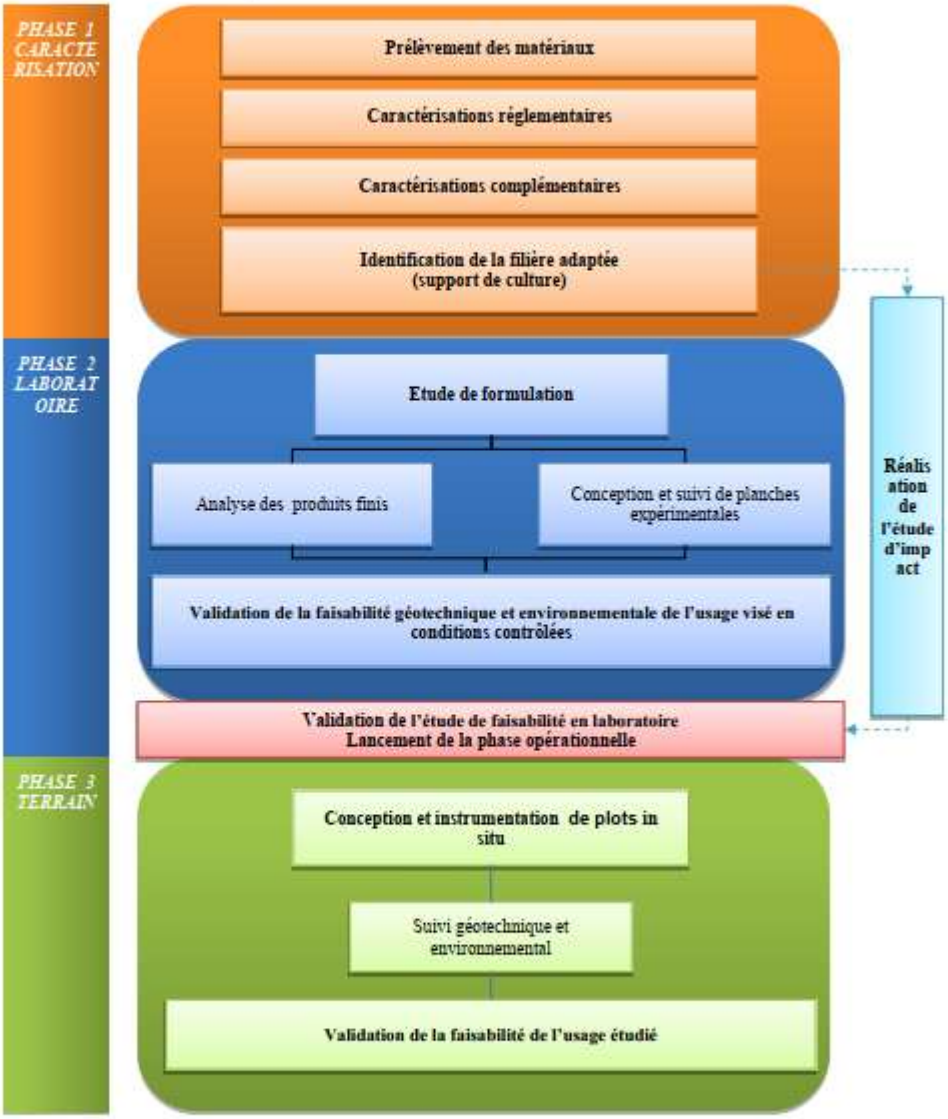
En effet, à la fois les essais mécaniques et environnementaux ont permis de démontrer l'acceptabilité des matériaux dans les conditions suivantes :

- Utilisation jusqu'à 20 % de sédiments dans la formule de coulis ;
- Utilisation de jusqu'à 15 % de sédiments en substitution du sable dans la formule de béton en modules de chaussée réservoir ;
- Criblage et séchage préalable des sédiments nécessaire ;

Suite à ces résultats très concluants de cette laboratoire la MEL souhaite donc passer à la phase expérimentation à échelle réelle (phase 3 de la figure ci-dessous) en réalisant des chantiers expérimentaux à base de sédiments.

www.neo-eco.fr
Tél : +33 (0) 3 20 10 31 18 - Fax : +33 (0) 3 20 10 31 11
Rue de la Source, 59320 Hallennes Lez Haubourdin, France.
SAS au capital de 550.890 € - RCS : Lille Metropole - SIRET : 811 041 367 00012 - NAF : 7112B - TVA : FR 72 811041367

C'est donc dans cette optique que s'inscrit l'expérimentation SEDIMATERIAUX de mettre en œuvre des hydrocyl à base de sédiments dans le chantier de la présente consultation.



www.neo-eco.fr
Tél : +33 (0) 3 20 10 31 18 - Fax : +33 (0) 3 20 10 31 11
Rue de la Source, 59320 Hallennes Lez Haubourdin, France.
SAS au capital de 550.890 € - RCS : Lille Métropole - SIRET : 811 041 367 00012 - NAF : 7112B - TVA : FR 72 811041367

2.3. Mise en œuvre de l'expérimentation :

2.3.1. Principe général :

La mise en œuvre du chantier hydrocyl se fera dans les conditions usuelles moyennant la prise en compte de certaines spécificités liées à l'expérimentation SEDIMATERIAUX.

L'objectif de cette expérimentation est d'appliquer les résultats de la phase laboratoire sur un ouvrage à l'échelle 1/1 au sein duquel les hydrocyls à base de sédiments sont mis en œuvre dans des conditions représentatives de l'usage étudié (épaisseurs, nature des couches…).

Cela permettra de s'affranchir de l'effet d'échelle qui peut être occasionné lors de la réalisation d'essais à des échelles plus petites (échelle laboratoire).

Ainsi nous assurerons un suivi environnemental et mécanique de la structure de l'ouvrage afin de valider les études de laboratoire correspondantes.

2.3.2. Spécificités techniques liées à l'expérimentation :

Les spécificités liées à l'expérimentation Sédimateriaux consiste à ce qui suit, ces points sont illustrés en annexe par des plan 2D et 3D :

1. Assurer une séparation entre la partie témoin du chantier réalisée à base d'hydrocyl sans sédiments et la partie réalisée avec des hydrocyl intégrant des sédiments. Cette séparation est assurée par une géomembrane, la soudure de la géomembrane est illustrée sur le plan en annexe (détail C du plan)

   En effet, la validation de la faisabilité technique et environnementale de la valorisation des sédiments dans les hydrocyls se fera sur la base d'une comparaison des performances mécaniques et environnementales de la partie témoin du chantier et de la partie « prototype » ayant recours à des hydrocyls à base de sédiment.
   Pour la meilleure représentativité possible, les mêmes quantités d'hyrocyl seront mise en œuvre et sur la partie témoin et sur la prototype. En conséquence les volumes de la partie témoin du chantier et de la partie prototype seront égaux.

2. Instrumentation de chaque partie séparément en vue de récupérer les eaux pour les analyses du suivi environnementale.
   Comme illustré dans les plans en annexe, cette instrumentation constera à mettre des piézomètres qui permettront de réaliser des prélèvements des eaux pour les analyses du suivi environnemental.
   Chaque partie du chantier (témoin et prototype à base d'hydrocyls sédiment) sera donc dotée d'un système permettant les prélèvements nécessaires au suivi environnemental.

www.neo-eco.fr
Tél : +33 (0) 3 20 10 31 18 - Fax : +33 (0) 3 20 10 31 11
Rue de la Source, 59320 Hallennes Lez Haubourdin, France.
SAS au capital de 550.890 € - RCS : Lille Métropole - SIRET : 811 041 367 00012 - NAF : 7112B - TVA : FR 72 811041367

3. Comme illustré dans les plans en annexe, l'étanchéité sera assurée par les 3 couches suivantes :
   A. Couche anti-poinçonnement
   B. Géomembrane
   C. Couche anti-poinçonnement

2.3.3. Assistance à maitrise d'ouvrage spécifique à l'expérimentation :

Une assistance à maitrise d'ouvrage spécifique à l'expérimentation a été prévu par la MEL. Cette mission a été confiée à NEOECO.

A. Présentation de NEOECO :

Neo-Eco est un bureau d'études en ingénierie qui installe des lignes de tri de déchets et réalise de nombreux programmes de R&D dans le domaine de la valorisation de déchets. Les déchets sont de différents types : déchets organiques (plastiques, déchets verts), déchets minéraux (sédiments, mâchefers, laitiers, sable de fonderie, gravats, matériaux de déconstruction, déchets du BTP), déchets industriels,... Cette entreprise s'est spécialisée dans la création de boucles d'économie circulaire, c'est-à-dire qu'elle cherche à redonner une seconde vie aux déchets afin de remplacer des matières premières vierges par des matières premières secondaires pour créer des éco-produits.

Cela passe par la caractérisation des déchets, la formulation, des propositions de solutions innovantes de séparation et de valorisation, et la conception de nouvelles machines de tri. Cette structure apporte à ses clients des solutions complètes clefs en main.

Nous participons à de nombreux programmes collaboratifs où nous réalisons des études de Recherche et Développement, ou concevons, fabriquons et mettons en service des démonstrateurs pilotes ou industriels.

Nous voulons axer nos travaux de R&D sur des sujets à forts potentiels économiques et environnementaux. L'entreprise est très axée sur la R&D car l'innovation fait partie de ses priorités. Un ingénieriste se doit de proposer en permanence des process innovants. De nombreux programmes dans l'entreprise permettent d'inventer les process de« demain » en partenariat avec nos clients. Nous avons donc noué des partenariats avec des écoles d'ingénieurs, des universités et des centres de Recherches pour transférer des programmes de recherches vers les entreprises. Ses programmes de R&D sont orientés vers les nouveaux matériaux : sédiments, mâchefers, amiante, pneumatiques, bétons chargés, textiles, composites,...

B. Missions de NEOECO lors de la mise en œuvre de l'expérimentation :

NEOECO assistera le titulaire du marché en vue d'assurer la prise en compte des spécificités techniques liées à l'expérimentation SEDIMATERIAUX.

NEOECO sera donc en charge d'organiser une réunion pré-chantier en vue d'expliquer d'une façon théorique les spécificités liées à l'expérimentation.

NEOECO assistera aussi lors de la mise en œuvre des chantier hydrocyl.

www.neo-eco.fr
Tel : +33 (0) 3 20 10 31 18 - Fax : +33 (0) 3 20 10 31 11
Rue de la Source, 59320 Hallennes Lez Haubourdin, France.
SAS au capital de 550.890 € - RCS : Lille Metropole - SIRET : 811 041 367 00012 - NAF : 7112B - TVA : FR 72 811041367

Des points d'arrêts seront organisés en vue de permettre à NEOECO de vérifier la conformité de la mise en œuvre par rapport aux spécificités de l'expérimentation SEDIMATERIAUX.

Les principaux points à vérifier par NEOECO sont les suivants :

- La bonne séparation entre la partie témoin du chantier réalisée à base d'hydrocyl sans sédiments et la partie réalisée avec des hydrocyl intégrant des sédiments
- La bonne mise en œuvre des 3 couches inférieures pour assurer l'étanchéité
- La bonne prise en compte des spécificités liées à l'instrumentation en vue de la réalisation des prélèvements par le biais des piézomètres.

2.4. Suivi à l'issue de l'expérimentation :

A l'issue de la réalisation de l'expérimentation, NEOECO se chargera du suivi environnemental et mécanique du chantier en vue de valider la faisabilité de la valorisation des sédiments dans des hydrocyls.

Le suivi environnemental sera fera par la réalisation d'analyses sur les eaux prélevées au niveau des piézomètres.

www.neo-eco.fr
Tél : +33 (0) 3 20 10 31 18 - Fax : +33 (0) 3 20 10 31 11
Rue de la Source, 59320 Hallennes Lez Haubourdin, France.
SAS au capital de 550.890 € - RCS : Lille Métropole - SIRET : 811 041 367 00012 - NAF : 7112B - TVA : FR 72 811041367

Annexe 6 : Cahier des clauses techniques particulière - chantier coulis

CCTP Travaux Coulis |

Proposition de contenu spécifique à l'expérimentation SEDIMATERIAUX

www.neo-eco.fr
Tél : +33 (0) 3 20 10 31 18 - Fax : +33 (0) 3 20 10 31 13
1 Rue de la Source, 59320 Hallennes Lez Haubourdin, France.
SAS au capital de 550.890 € - RCS : Lille Métropole - SIRET : 811 041 367 00020 - NAF : 7112B - TVA : FR 72 811041367

1. Sommaire

1. Sommaire **2**

2. Expérimentation SEDIMATERIAUX : **3**

2.1. Contexte de l'expérimentation : 3
2.2. Démarche SEDIMATERIAUX : 4
2.3. Mise en œuvre de l'expérimentation : 6
2.3.1. Chantiers concernées : 6
2.3.2. Principe général : 7
2.3.3. Spécificités techniques liées à l'expérimentation : 7
2.4. Fabrication et coulage du coulis : 10
2.4.1. Formulation des coulis à base de sédiment : 10
2.4.2. Quantité du coulis à produire : 10
2.4.3. Caractéristiques des coulis : 11
2.4.4. Assistance à maitrise d'ouvrage spécifique à l'expérimentation : 11
2.5. Suivi à l'issue de l'expérimentation : 12

Annexe 1 : Plan 2D du chantier Coulis **12**

Annexe 2 : Fiche technique des Sédiments 0-20mm préparés **13**

www.neo-eco.fr
Tél : +33 (0) 3 20 10 31 18 - Fax : +33 (0) 3 20 10 31 11
Rue de la Source, 59320 Hallennes Lez Haubourdin, France.
SAS au capital de 550.890 € - RCS : Lille Métropole - SIRET : 811 041 367 00012 - NAF : 7112B - TVA : FR 72 811041367

2. Expérimentation SEDIMATERIAUX :

2.1. Contexte de l'expérimentation :

Le plan bleu métropolitain :

En partenariat avec la région Nord Pas de calais, la MEL s'engage vers une prise de compétence en matière de gestion de certaines voies d'eau dans le cadre du plan bleu métropolitain. En effet, il apparaît que ces voies répondent à des objectifs déjà identifiés dans le cadre des politiques communautaires en constituant :

- Une armature de développement des espaces naturels de la métropole et un corridor écologique remarquable
- Un élément fonctionnel de l'alimentation en eau, de l'assainissement urbain et de la prévention des inondations
- Un potentiel d'amélioration de la qualité de vie par le développement d'animations touristiques
- Une dynamisation économique par le rayonnement provoqué
- Un élément clef d'une politique plus large d'aménagement, déjà éprouvé au travers des exemples de réhabilitation des canaux anglais et hollandais et au travers des mécanismes amorcés de retournement des villes vers l'eau.

Le maillage bleu est constitué des cours d'eau principaux du réseau domanial, accueillant le transport fluvial de marchandises, tels que la Deûle ou la Lys, mais irrigue également l'ensemble du territoire métropolitain au travers des voies d'eau secondaires, connectées ou non au réseau principal et de l'ensemble du réseau des rivières et becques. Aujourd'hui, l'État et Voies Navigables de France se recentrent très fortement sur la vocation marchande de la voie d'eau au détriment des autres éléments constitutifs du maillage bleu. La mise en place du Plan Bleu Métropolitain passe donc en premier lieu par la sauvegarde et la valorisation des voies d'eau décentralisables, aujourd'hui délaissées.

Dans cette logique, l'article 56 de la loi du 30 juillet 2003 sur les Risques Naturels et Technologiques révisé par la loi du 13 août 2004 et désormais codifié à l'article L 3113-1 et suivant du Code Général de la Propriété des Personnes Publiques permet la décentralisation optionnelle des rivières et canaux. Cette loi permet désormais aux groupements de collectivités, dès lors qu'elles se dotent de la compétence requise, de solliciter le transfert en pleine propriété et à titre gratuit des rivières et canaux ne relevant pas de la catégorie des voies navigables d'intérêt national (réseau magistral) dont la consistance a été précisée par le décret du 16 août 2005. En région Nord - Pas de Calais, plusieurs voies d'eau régionales sont décentralisables (Sambre, Scarpe, etc...). La Région Nord-Pas de Calais est aujourd'hui favorable à une implication et a décidé par délibération du 25 juin 2009 de l'élaboration d'un programme d'actions ayant pour optique la préservation et la valorisation du réseau fluvial secondaire en synergie avec les projets des agglomérations et des territoires concernés.
Au sein du périmètre communautaire, plusieurs voies d'eau sont concernées par cette problématique :

- Les boucles des Prés du Hem à ARMENTIERES et NIEPPE, les boucles d'ERQUINGHEM à NIEPPE/ERQUINGHEM et délaissés de HOUPLINES
- Le Canal de SECLIN
- Les bras et délaissés de la Deûle et la Lys
- Le canal de Roubaix et la Marque Urbaine et ses bras de CROIX et TOURCOING.

Parmi ces différentes voies, certaines ont déjà fait l'objet de démarches et des études sont en cours.

Ainsi dans le cadre de la délibération 12C0701 du 14 décembre 2012 impliquant la sa prise de compétence expérimentale sur le bras de la basse Deûle, la MEL souhaite requalifier et valoriser ce cours d'eau.

www.neo-eco.fr
Tel : +33 (0) 3 20 10 31 18 - Fax : +33 (0) 3 20 10 31 13
1 Rue de la Source, 59320 Hallennes Lez Haubourdin, France.
SAS au capital de 550.890 € - RCS : Lille Métropole - SIRET : 811 041 367 00020 - NAF : 7112B - TVA : FR 72 811041367

2.2. Démarche SEDIMATERIAUX :

Pour la valorisation de ce cours d'eau, la MEL s'est engagée avec l'Institut Mines Télécom Lille-Douai, la DREAL, le CD2E et la Région Nord Pas de Calais dans la démarche Sédimatériaux.
La démarche SEDIMATERIAUX a pour ambition d'apporter une réponse adaptée et dimensionnée à la problématique de la gestion et de valorisation terrestre des sédiments de dragage portuaires et fluviaux. Elle se veut une démarche collective à l'échelle nationale, qui fédère les volontés locales dans la recherche de solutions opérationnelles et innovantes.
Comme illustré dans la figure ci-dessous, cette démarche passe par une validation à échelle laboratoire de la faisabilité géotechnique et environnementale de la valorisation des sédiments dans les usages visés.
Cette phase laboratoire a été réalisée par la MEL entre 2013 et 2015 en partenariat avec NEOECO et l'IMT Lille-Douai.
L'objectif de cette phase du projet était de substituer des matières granulaires « nobles » utilisées dans les coulis et les bétons de chaussée réservoir (hydrocyl) tout en maintenant des caractéristiques mécaniques fonctionnelles et environnementales acceptables.
La conclusion de cette étude laboratoire était que les sédiments peuvent être utilisés en proportion non négligeable dans les filières de type coulis autocompactant et béton en modules de chaussée réservoir.

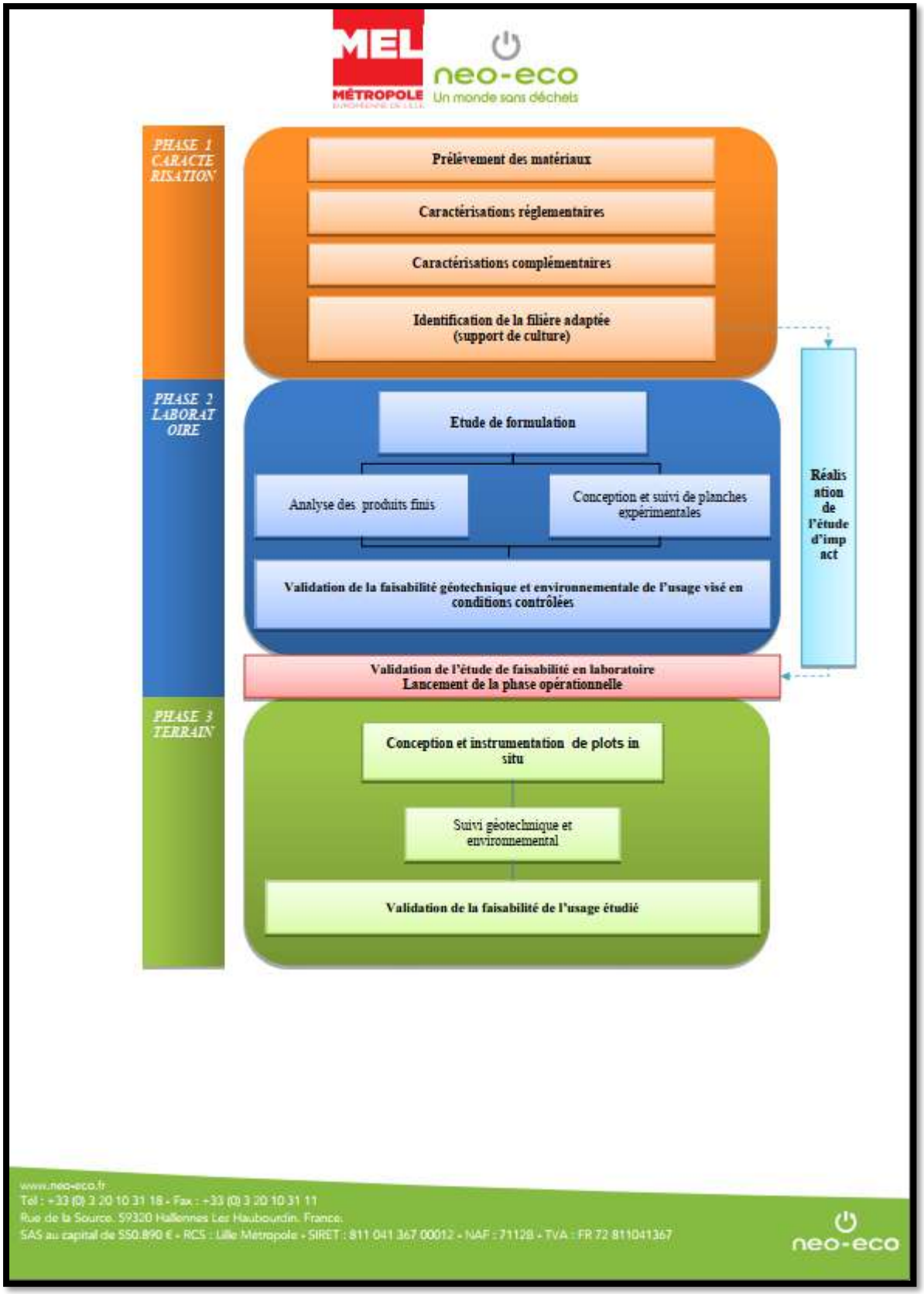
En effet, à la fois les essais mécaniques et environnementaux ont permis de démontrer l'acceptabilité des matériaux dans les conditions suivantes :

- Utilisation jusqu'à 20 % de sédiments dans la formule de coulis ;
- Utilisation de jusqu'à 15 % de sédiments en substitution du sable dans la formule de béton en modules de chaussée réservoir ;
- Criblage et séchage préalable des sédiments nécessaire ;

Suite à ces résultats très concluants de cette laboratoire la MEL souhaite donc passer à la phase expérimentation à échelle réelle (phase 3 de la figure ci-dessous) en réalisant des chantiers expérimentaux à base de sédiments.

C'est donc dans cette optique que s'inscrit l'expérimentation SEDIMATERIAUX de mettre en œuvre des hydrocyl à base de sédiments dans le chantier de la présente consultation.

www.neo-eco.fr
Tél : +33 (0) 3 20 10 31 18 - Fax : +33 (0) 3 20 10 31 11
Rue de la Source, 59320 Hallennes Lez Haubourdin, France.
SAS au capital de 550.890 € - RCS : Lille Métropole - SIRET : 811 041 367 00012 - NAF : 7112B - TVA : FR 72 811041367


MEL
MÉTROPOLE
neo-eco
Un monde sans déchets
PHASE 1 CARACTERISATION
Prélèvement des matériaux
Caractérisations réglementaires
Caractérisations complémentaires
Identification de la filière adaptée (support de culture)
PHASE 2 LABORATOIRE
Etude de formulation
Analyse des produits finis
Conception et suivi de planches expérimentales
Validation de la faisabilité géotechnique et environnementale de l'usage visé en conditions contrôlées
Réalisation de l'étude d'impact
Validation de l'étude de faisabilité en laboratoire
Lancement de la phase opérationnelle
PHASE 3 TERRAIN
Conception et instrumentation de plots in situ
Suivi géotechnique et environnemental
Validation de la faisabilité de l'usage étudié
www.neo-eco.fr
Tél : +33 (0) 3 20 10 31 18 - Fax : +33 (0) 3 20 10 31 11
Rue de la Source, 59320 Hallennes Lez Haubourdin, France.
SAS au capital de 550.890 € - RCS : Lille Métropole - SIRET : 811 041 367 00012 - NAF : 7112B - TVA : FR 72 811041367
neo-eco

2.3. Mise en œuvre de l'expérimentation :

2.3.1. Chantiers concernées :

Le chantier de coulis est situé chemin de beau séjour à Bondues, le linéaire de canalisation concerné par le chantier est celle de la rue Prouvost descendus entre 1,40 m et 2,50 m de profondeur sous voiries. La canalisation est en grès de diamètre 300 à 500 mm.
700 m3 de coulis seront donc coulés pour la mise en œuvre de ce chantier.
Une partie du chantier sera mise en œuvre avec une formulation témoin de coulis sans intégration de sédiment.

Le plan ci-dessous illustre le linéaire de 600m environ de la ville de Bondues concerné par le coulage des coulis :

www.neo-eco.fr
Tél : +33 (0) 3 20 10 31 18 - Fax : +33 (0) 3 20 10 31 11
Rue de la Source, 59320 Hallennes Lez Haubourdin, France.
SAS au capital de 550.890 € - RCS : Lille Métropole - SIRET : 811 041 367 00012 - NAF : 7112B - TVA : FR 72 811041367

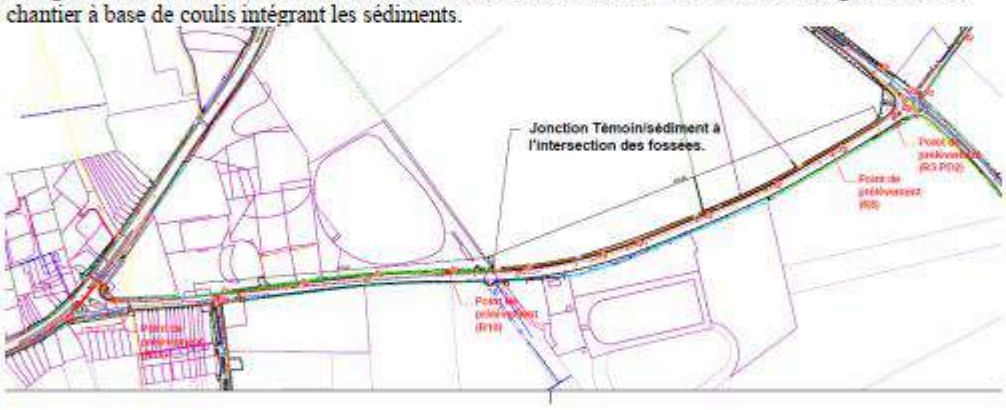
2.3.2. Principe général :

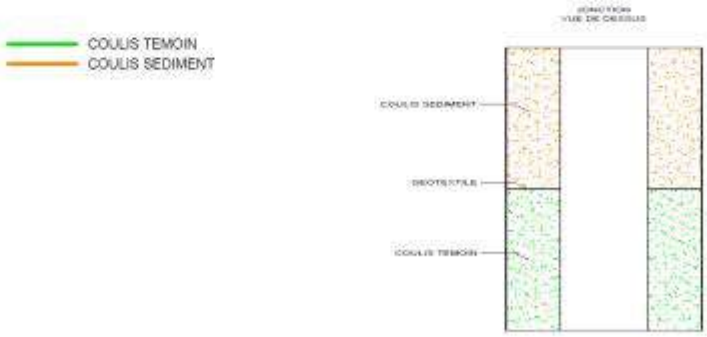
La mise en œuvre du chantier de coulis se fera dans les conditions usuelles moyennant la prise en compte de certaines spécificités liées à l'expérimentation SEDIMATERIAUX.
L'objectif de cette expérimentation est d'appliquer les résultats de la phase laboratoire sur un ouvrage à l'échelle 1/1 au sein duquel les coulis à base de sédiments sont mis en œuvre dans des conditions représentatives de l'usage étudié (épaisseurs, nature des couches…).
Cela permettra de s'affranchir de l'effet d'échelle qui peut être occasionné lors de la réalisation d'essais à des échelles plus petites (échelle laboratoire).
Ainsi nous assurerons un suivi environnemental et mécanique de la structure de l'ouvrage afin de valider les études de laboratoire correspondantes.

2.3.3. Spécificités techniques liées à l'expérimentation :

Les spécificités liées à l'expérimentation Sédimateriaux consiste à ce qui suit, ces points sont illustrés en annexe par un plan 2D :

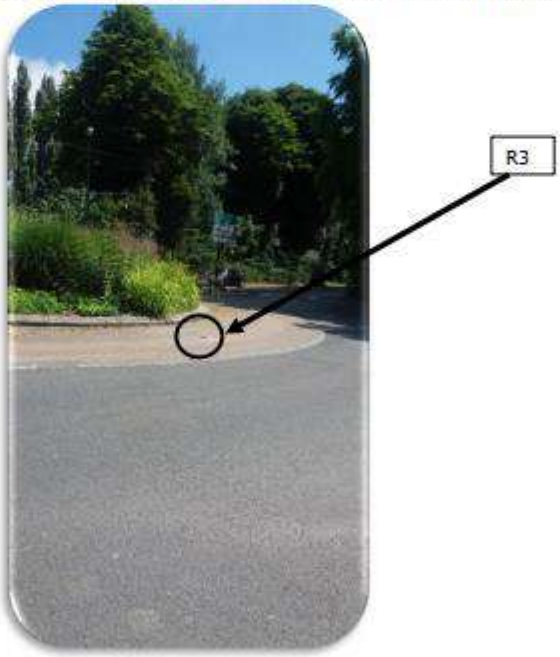
1. Assurer une séparation entre la partie témoin du chantier réalisée à base de coulis sans sédiments et la partie réalisée avec du coulis intégrant des sédiments. Cette séparation est assurée par un géotextile. La jonction entre la zone témoin et la zone sédiment se fera au niveau de l'intersection des fossés.
   La figure ci-dessous illustre en vert la zone du chantier à base de coulis témoin et en orange la zone du chantier à base de coulis intégrant les sédiments.





www.neo-eco.fr
Tél : +33 (0) 3 20 10 31 18 - Fax : +33 (0) 3 20 10 31 11
Rue de la Source, 59320 Hallennes Lez Haubourdin, France.
SAS au capital de 550.890 € - RCS : Lille Métropole - SIRET : 811 041 367 00012 - NAF : 71128 - TVA : FR 72 811041367

Le piézomètre R3 quant à lui se trouve au rondpoint en intersection avec la rue Jean Baptiste Lebas.



www.neo-eco.fr
Tél : +33 (0) 3 20 10 31 18 - Fax : +33 (0) 3 20 10 31 11
Rue de la Source. 59320 Hallennes Lez Haubourdin. France.
SAS au capital de 550.890 € - RCS : Lille Métropole - SIRET : 811 041 367 00012 - NAF : 7112B - TVA : FR 72 811041367

Ainsi chaque zone du chantier (témoin et prototype à base de coulis sédiment) sera donc dotée d'un système permettant les prélèvements nécessaires au suivi environnemental.

2.4. Fabrication et coulage du coulis :

2.4.1. Formulation des coulis à base de sédiment :

Le tableau ci-dessous présente la composition de la formulation témoin du coulis sans sédiment et la formulation du coulis intégrant les sédiments :

Composition	Formulation témoin	Formulation intégrant les sédiments
CEM I 52.5 (%)	4	0
Rolac PI LH(%)	0	8
Cendres volantes (%)	96	72
Sédiments (%)	0	20
Fibres (%)	0,15	0,15

2.4.2. Quantité du coulis à produire :

Les sédiments criblés à une granulometrie de 0-20mm sont disponibles sur un site de la Métropole Européenne de Lille situé au 7 avenue de Rotterdam à Bondues.

www.neo-eco.fr
Tél : +33 (0) 3 20 10 31 18 - Fax : +33 (0) 3 20 10 31 11
Rue de la Source, 59320 Hallennes Lez Haubourdin, France.
SAS au capital de 550.890 € - RCS : Lille Métropole - SIRET : 811 041 367 00012 - NAF : 7112B - TVA : FR 72 811041367

Les quantités des coulis à produire par type sont les suivantes :
-350 m3 de coulis témoin sans l'intégration des sédiments
-350 m3 de coulis sur la base de la formulation intégrant les sédiments

Le titulaire du marché devra prendre en charge le transport de la quantité nécessaire des sédiments pour la fabrication des hydrocyls intégrant les sédiments dans la formulation.

2.4.3. Caractéristiques des coulis :

Le titulaire du marché devra assurer par la réalisation d'essais au CERIB, la conformité des coulis au caractéristiques ci-dessous :

- Affaissement au cône d'Abrams (NF EN 12350-2, 2012) : **h>15cm**,
- Indice de portance IPI (NF EN 13286-47, 2012) à 24h : **IPI>10**,
- Résistance à la compression simple Rc à 28jours : **Rc_{28j}> 1MPa**,
- Résistance à l'immersion à 60jours : **Rc_{imm}/Rc>0,8**

2.4.4. Assistance à maitrise d'ouvrage spécifique à l'expérimentation :

Une assistance à maitrise d'ouvrage spécifique à l'expérimentation a été prévu par la MEL. Cette mission a été confiée à NEOECO.

A. Présentation de NEOECO :

Neo-Eco est un bureau d'études en ingénierie qui installe des lignes de tri de déchets et réalise de nombreux programmes de R&D dans le domaine de la valorisation de déchets. Les déchets sont de différents types :

www.neo-eco.fr
Tél : +33 (0) 3 20 10 31 18 - Fax : +33 (0) 3 20 10 31 11
Rue de la Source, 59320 Hallennes Lez Haubourdin. France.
SAS au capital de 550.890 € - RCS : Lille Metropole - SIRET : 811 041 367 00012 - NAF : 7112B - TVA : FR 72 811041367

déchets organiques (plastiques, déchets verts), déchets minéraux (sédiments, mâchefers, laitiers, sable de fonderie, gravats, matériaux de déconstruction, déchets du BTP), déchets industriels,... Cette entreprise s'est spécialisée dans la création de boucles d'économie circulaire, c'est-à-dire qu'elle cherche à redonner une seconde vie aux déchets afin de remplacer des matières premières vierges par des matières premières secondaires pour créer des éco-produits.
Cela passe par la caractérisation des déchets, la formulation, des propositions de solutions innovantes de séparation et de valorisation, et la conception de nouvelles machines de tri. Cette structure apporte à ses clients des solutions complètes clefs en main.
Nous participons à de nombreux programmes collaboratifs où nous réalisons des études de Recherche et Développement, ou concevons, fabriquons et mettons en service des démonstrateurs pilotes ou industriels.
Nous voulons axer nos travaux de R&D sur des sujets à forts potentiels économiques et environnementaux.
L'entreprise est très axée sur la R&D car l'innovation fait partie de ses priorités. Un ingénieriste se doit de proposer en permanence des process innovants. De nombreux programmes dans l'entreprise permettent d'inventer les process de« demain » en partenariat avec nos clients. Nous avons donc noué des partenariats avec des écoles d'ingénieurs, des universités et des centres de Recherches pour transférer des programmes de recherches vers les entreprises. Ses programmes de R&D sont orientés vers les nouveaux matériaux : sédiments, mâchefers, amiante, pneumatiques, bétons chargés, textiles, composites,...

B. Missions de NEOECO lors de la mise en œuvre de l'expérimentation :

NEOECO assistera le titulaire du marché en vue d'assurer la prise en compte des spécificités techniques liées à l'expérimentation SEDIMATERIAUX.
NEOECO sera donc en charge d'organiser une réunion pré-chantier en vue d'expliquer d'une façon théorique les spécificités liées à l'expérimentation.
NEOECO assistera aussi lors de la mise en œuvre des chantier Coulis.
Des points d'arrêts seront organisés en vue de permettre à NEOECO de vérifier la conformité de la mise en œuvre par rapport aux spécificités de l'expérimentation SEDIMATERIAUX.
Les principaux points à vérifier par NEOECO sont les suivants :

- La bonne séparation entre la partie témoin du chantier réalisée à base de coulis sans sédiments et la partie réalisée avec du coulis intégrant des sédiments
- La localisation des piézomètres
- vérifier l'incorporation des bons taux de sédiments
- vérifier la bonne application des formulations développés au laboratoire
- définir des points de contrôle et de vigilance à mettre en place,
- échantillonnage du coulis sur place pour la réalisation d'essais laboratoire en vue de la vérification des caractéristiques
- Prise des photographies et vidéos pour les actions de communication

2.5. Suivi à l'issue de l'expérimentation :

A l'issue de la réalisation de l'expérimentation, NEOECO se chargera du suivi environnemental et mécanique du chantier en vue de valider la faisabilité de la valorisation des sédiments dans du coulis.
Le suivi environnemental sera fera par la réalisation d'analyses sur les eaux prélevées.

Annexe 1 : Plan 2D du chantier Coulis

(Annexe en piece jointe du present document)

www.neo-eco.fr
Tél : +33 (0) 3 20 10 31 18 - Fax : +33 (0) 3 20 10 31 11
Rue de la Source, 59320 Hallennes Lez Haubourdin, France.
SAS au capital de 550.890 € - RCS : Lille Métropole - SIRET : 811 041 367 00012 - NAF : 7112B - TVA : FR 72 811041367

Annexe 7 : Comptes-rendus des réunions de suivi de chantier

PROJET SEDIMEL 1

Compte rendu pour la réunion Spécifique SEDIMATERIAUX pour le chantier expérimental BONDUES Beau Séjour

19 Juin 2019

Présents :

Société		Représentant	Contact
Maitrise d'ouvrage	Mel	PRUD'HOMME Nicolas	'nprudhomme@lillemetropole.fr'
Assistance à maitrise d'ouvrage Economie Circulaire	Néo-Eco	KADIRI Amine	akadiri@neo-eco.fr
Entreprises	• EJL • NORMAT • EURIVIA	EDDAHABI Mohammed JUCKEL Franck WARZYSZYNSKI Robert JARRY Vincent	'mohamed.eddahabi@dte-nord.fr'; 'franck.juckel@normat.fr'; 'robert.warzyszynski@ejl.fr'; 'vincent.jarry@ejl.fr'

Ordre du jour:

- Qualité de la formulation à base sédiments
- Approvisionnements du chantier

- Planning et Localisations des zones pour la coulage du coulis Témoin et du coulis SEDIMATERIAUX
- Localisation des Piézomètres
- Communication spécifique SEDIMATERIAUX dans le cadre du chantier

Sujets abordés:

Formulation de Coulis	• Depuis la réunion de chantier du 18 Juin 2019, la centrale pour la fabrication de coulis a défini les modalités qui lui permettra de produire et livrer pour le chantier aussi bien le coulis Témoin sans sédiments que le coulis SEDIMATEIRIAUX à base de sédiments. • Les formulations ont bien été étudiées et le pourcentage de substitution de 20% en sédiment a été validé • La centrale a défini son protocole pour la réalisation du mélange en vue d'intégrer les sédiments dans la formulation Coulis. Cependant, la centrale précise qu'il s'agit à ce stade de modalités spécifiques au chantier expérimental. La centrale sera amenée à étudier l'adaptation de son process pour accueillir les sédiments à plus grande échelle dans le cadre de la création de la filière « Coulis » pour les sédiments de dragage.
Quantité de sédiment	La quantité de 45 tonnes de sédiment livrée à ce jour à la centrale permettra de fabriquer 140m3. Néo-Eco s'est renseigné auprès de la société LIB* et il sera possible de fournir 20 tonnes de sédiment complémentaire.
Planning et Localisation des zones pour la coulage du coulis Témoin et du coulis SEDIMATERIAUX	**Coulis SEDIMATERIAUX :** La quantité de 45 tonnes de sédiment livrée à ce jour permettra de fournir le COULIS sedimateriaux pour le tronçon EU16 à EU 18. Eurovia, EJL et Nomnat précisera s'il est possible d'arriver jusqu'au EU19 avec la quantité complémentaire de 20 tonnes de sédiments qui sera livrée par Néo-Eco. En prévisionnel, ce coulis sera produit et livré avec un débit de 20m3/jour en fin de semaine 29 soit à partir du Jeudi 18/07 ou Vendredi 19/07. La centrale précisera au plus-tôt le jour exact de livraison.

	Coulis Témoin : Le coulis témoin sera localisé entre EU19 et EU25. Le début de fabrication et de livraison du coulis témoin est prévu pour la semaine 30 soit à partir du 22 Juillet.
Localisation des Piézomètres	4 piézomètres seront installés pour la réalisation des prélèvements des eaux du suivi environnemental des chantierS : -Zone SEDIMATERIAUX : 2 piézomètres seront installés entre EU16 et EU18. Le premier à proximité de EU 16 et l'autre à proximité de EU18 --Zone Témoin: 2 piézomètres seront installés entre EU25 et EU22. Le premier à proximité de EU 25 et l'autre à proximité de EU22.
Communication dans le cadre du projet	Il est prévu de produire une vidéo du chantier. Il convient de filmer pour cette vidéo : -L'étude de la formulation au laboratoire – Contact : Mohammed EDDAHABI -La fabrication du coulis en centrale – Contact : Franck Juckel -La réalisation du chantier – Contact : WARZYSZYNSKI Robert et JARRY Vincent Pour cela Charlotte DESTOMBES du CD2E prendra contact avec les différents interlocuteurs. Eurovia, EJL et Normat communiqueront leurs logos pour une apparition dans la vidéo du chantier.

Société LIB* : société titulaire du marché de fourniture des hydrocyls à base de sédiment pour les 2 autres chantiers expérimentaux de SEDIMATERIAUX de la MEL.

PROJET SEDIMEL 1

Compte rendu pour la réunion Spécifique SEDIMATERIAUX pour le chantier expérimental Centre-Ville de LEERS

Lundi 08 Juillet 2019

Présents :

Société		Représentant	Contact
Maitrise d'ouvrage	Mel	PRUD'HOMME Nicolas	nprudhomme@lillemetropole.fr
Assistance à maitrise d'ouvrage Economie Circulaire	Néo-Eco	KADIRI Amine	akadiri@neo-eco.fr
Entreprise	LIB*	ROHART Dominique DELVART Franck	d.rohart@groupelib.com f.delvart@groupelib.com

Société LIB* : société titulaire du marché de fourniture des hydrocyls à base de sédiment pour les 2 chantiers expérimentaux de SEDIMATERIAUX de la MEL.

Ordre du jour:

- Livraison du Vendredi 05 Juillet des hydrocyls avec un taux considérable de matériaux à faible résistance mécanique
  - Explications
  - Actions à court terme

- Planning des prochaines livraisons

Sujets abordés:

Planning de livraison des hydrocyls :

Hydrocyls Sédiments :

Sur les 212 tonnes fabriquées : 80 ont été livrées dont 20 à 25 tonnes de perte

La quantité présente sur les bassins du chantier de Leers est estimé à 55 tonnes.

Pour la livraison des 131 tonnes restants. Cela se fera par le biais de **5 camions** chargés de 26 à 27 tonnes.

Si le dernier camion à charger n'est pas 100% plein => A compléter avec les hydrocyls témoin.

Livraison se fera 18 Juillet. La procédure de livraion sera la suivantes :

2 chargements le 17 Juillet au soir chez Lib avec des livraisons aux horaires suivants :

- ⇨ **Premier à 8h**
- ⇨ **Deuxième à 9h**

3 chargements le 18 Juillet Matin chez Lib pour des livraisons sur chantier à Leers :

- ⇨ **Premier à 11h**
- ⇨ **Deuxième à 12h**
- ⇨ **Troisième à 14h**

Pour les témoin :

Livraison 3 camions cette semaine le Mercredi 10 Juillet.

La procédure de livraison sera la suivante. Chargement chez Lib le Mercredi 10 Juillet matin pour des livraisons sur chantier de Leers le 18 Juillet :

- ⇨ Premier à 10h30
- ⇨ Deuxième à11h30
- ⇨ Troisième 12h30

Aussi bien pour les livraisons d'hydrocyls témoin et sédiments. A minima 30 min de décalage entre 2 livraisons sur chantier à Leers.

Pour la quantité restantes à livrer pour les hydrocyls témoin, cela se fera par le biais de **5 camions**.

La **Livraison se fera 19 Juillet. La procédure de livraion sera la suivantes :**

2 chargements le 18 Juillet au soir chez Lib avec des livraisons aux horaires suivants :

- **Premier à 8h**
- **Deuxième à 9h**

3 chargements le 19 Juillet Matin chez Lib pour des livraisons sur chantier à Leers :

- **Premier à 11h**
- **Deuxième à 12h**
- **Troisième à 14h**

Livraison du Vendredi 05 Juillet des hydrocyls avec un taux considérable de matériaux à faible résistance mécanique	Une partie des hydrocyls livrée Vendredi 5 a été fabriquée le 3 Juillet 2019. D Ces hydrocyls était très jeunes donc (produits de 3 jours) Le premier camion livré contenait principalement les hydrocyls très jeunes ce qui explique le grand % de casse.
Fabrication et livraison chantier	***Pour les sédiments :*** Début de livraison le 26/06/2019 Sur les 212 tonnes fabriquées => 80 ont été livrées dont 20 à 25 tonnes de perte Soit présent sur chantier 55 à 60 Tonnes dans le bassin 131 tonnes à livrer pour les sédiments => 5 camions à livrer chargés à 26 et 27 tonnes ⇨ Si le dernier camion à charger n'est pas 100% plein => A compléter avec le témoin **Livraison le 18 :** Pour les horaires de livraison : **Possibilité de charger la veille chez Lib et donc les livraisons dès 8h.** **2 chargements le 17 soir chez Lib avec livraison :** **Premier à 8h** **Deuxième à 9h** **3 chargements le 18 pour des livraison :**

	11h **12h** **14h** **Pour les témoin :** Début de fabrication le 3 Juillet Livraison 3 camions cette semaine le Mercredi 10 Juillet Pour la procédure de livraison 10h30 11h30 12h30 **A minima 30 min de décalage entre 2 livraisons** Le reste de livraison soit 5 le 19 Juillet avec la même procédure de livraison que les sédiments soit : **Possibilité de charger la veille chez Lib et donc les livraisons dès 8h.** **2 chargements le 18 soir chez Lib avec livraison :** **Premier à 8h** **Deuxième à 9h** **3 chargements le 19 pour des livraison :** **11h** **12h** **14h** **Possibilité de chargement**

Faire un mail spécifique au transporteur

Annexe 8 : Résultats du suivi environnemental des pilotes expérimentaux "graves traitées" à Houplines

Seuil	Unité	Seuil	Semaine 1		Semaine 2		Semaine 3		Semaine 4		Semaine 6		Semaine 8		Semaine 12		Semaine 26		Semaine 39		Semaine 45		Semaine 52	
		*	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp
COT	mg/l	70	8	120	10/12/2019 PAS DE DÉTECTEUR – REPORTÉ AU 06/10/2020 (Semaine 45)		4,6	85	3,6	78	3,8	100	4,6	120	3	49	11	40	4,9	31	3,1	21	3,2	17
antimoine	µg/l		<2	<2			2,9	<2,0	<2,0	<2,0	2,5	<2,0	3,1	<2,0	<2,0	<2,0	4,2	4,3	2,9	5,3	2,23	6,4	2,17	5,7
arsenic	µg/l		<5	5,8			<5	<5	<5	6,8	<5	<5	<5	<5	<5	<5	4	2	3,3	3,1	2,3	2,6	2,4	2,5
baryum	µg/l		250	400			110	310	85	240	40	260	24	250	26	140	18	49	19	24	11	18	12	15
cadmium	µg/l		0,23	0,29			<0,20	<0,20	<0,20	0,3	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,050	0,061	<0,050	0,052	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
chrome	µg/l		19	28			7,5	18	7,3	17	7,3	17	10	21	6,3	13	5,8	11	3,4	7,1	2,3	9,2	3,2	9,3
cuivre	µg/l		26	1800			8,5	1300	7,1	1200	7,8	1500	9,7	1800	6	940	13	840	7,1	390	2,7	270	3	200
mercure	µg/l		<0,05	0,06			<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
plomb	µg/l		2,5	9,8			<2,0	5,3	<2,0	5,2	<2,0	4,2	<2,0	5,8	2,1	<2,0	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	<2	<2	<2	<2
molybdène	µg/l		9,4	35			3,5	22	2,8	19	2,8	22	3,7	27	2,6	15	4,6	20	2,4	11	<2	11	2,6	11
nickel	µg/l		3,4	110			<3	79	<3	64	<3	81	<3	97	<3	45	2,4	44	1	23	<3	16	<3	14
sélénium	µg/l		<3,9	11			<3,9	8,7	<3,9	8,5	<3,9	8,2	<3,9	11	<3,9	5,7	1,3	2,8	<1,0	2,4	<2	2,1	<2	<2
étain	µg/l		<2,0	2,7			<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	2,1	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2	<2
zinc	µg/l		17	46			13	25	28	44	26	110	<10	17	81	500	17	12	17	28	<10	14,5	<10	<10
somme des métaux	µg/l	15 000	327,5	2448,6			145,4	1768	130,2	1604,8	86,4	2002,4	52,6	2228,8	124	1658,7	70,3	985,2	56,1	493,952	20,53	349,8	25,37	257,5
azote kjeldahl	mgN/l		-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,8	28	1,0	17	<0,5	5,4	1,0	2,9
nitrites	mg/l		-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,1	16	2,6	23	0,31	16	1,1	17
nitrites	mgN/l		-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,64	4,8	0,80	7,1	<0,1	4,8	0,33	5,1
nitrates	mg/l		-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11	38	4,3	87	1,8	26	1,9	26
nitrates	mgN/l		-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,6	8,6	0,98	20	0,40	5,9	0,42	5,8
calcul de l'azote total	mgN/l		-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	41	2,8	44	<1	16	1,8	14
HCT (C10-C40)	µg/l		-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	70	<20	40	<20	<20	<20	45
somme des HAP (16) – EPA	µg/l	1	<0,6	<0,6			<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6
PCB totaux (7)	µg/l	50	<0,07	<0,07			<0,07	<0,11	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07
DBO (5 jours)	mg/l	100	10	288			3,7	115	<3	<3	<3	132	<3	179	<3	57	<3	<3	<3	3,0	<3	<3	<3	<3
DCO	mg/l	300	34	380			<25	245	<25	210	<25	270	<25	320	<25	131	<25	108	<25	83	<25	59	<25	47
matières en suspension (<2mg/l)	mg/l	100	53	17			70	36	29	15	27	12	10	32	9	61	8,1	13	16	190	11	24	49	32

(*) Seuils : Arrêté du 15/02/16 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux – Annexe 1

Annexe 9 : Résultats du suivi environnemental des chantiers expérimentaux “hydrocyls” à Tourcoing

Seuil	Unité	Seuil	Semaine 1		Semaine 2		~~Semaine 3~~ Semaine 4		Semaine 4		Semaine 6		Semaine 8		Semaine 12		Semaine 14		Semaine 26		Semaine 31		Semaine 39		~~Semaine 52~~ Semaine 53	
		*	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp
COT	mg/l	70	7,4	60	09/05/2019 PAS D’ EAU - REPORTÉ AU 01/08/2019 (Semaine 14)		8,7	61	23/05/2019 PAS D’ EAU - REPORTÉ AU 29/11/2019 (Semaine 31)		8,9	39	41	67	36	53	20	62	4,1	5,9	4,4	2,8	6,2	3,7	30	13
antimoine	µg/l		4,7	14			2,7	15			<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	2,1	3,7	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<0,50	<0,50
arsenic	µg/l		21	41			16	61			<5	13	7,0	13	8,5	8,6	<5	6	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<1,0	1,2
baryum	µg/l		33	35			66	210			<15	15	<15	18	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	<15	16	<15	25	36
cadmium	µg/l		<0,20	<0,20			<0,20	0,84			<0,20	<0,20	0,47	0,92	0,26	0,35	<0,20	<0,20	<0,20	0,22	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	0,098	<0,050
chrome	µg/l		110	140			75	210			6,9	32	3,6	8,1	3,0	13	1,6	6,2	1,8	1,2	1,6	2,7	<1	2,4	2,1	1,2
cuivre	µg/l		40	64			39	170			4,1	23	11	9,5	9,5	9,9	7,7	6,3	4,2	5,4	5,7	4,7	7,3	5,6	17	7,2
mercure	µg/l		<0,05	<0,05			<0,05	<0,05			<0,05	<0,05	0,08	<0,05	<0,05	<0,05	0,06	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
plomb	µg/l		24	28			27	150			6,8	9,4	<2,0	6,4	<2,0	4,0	<2,0	3,3	2,6	2,9	2,8	<2,0	3,6	<2,0	4,3	<1,0
molybdène	µg/l		22	41			43	27			6,2	4,7	<2	<2	5,1	4,7	<2	2,2	<2	3,5	<2	<2	<2	<2	2,1	3,6
nickel	µg/l		8,8	10			11	40			<3	4,5	6,2	6,2	6,4	4,8	<3	4,4	<3	<3	<3	<3	<3	<3	3,3	2,9
sélénium	µg/l		<3,9	8,5			17	10			<3,9	<3,9	<3,9	<3,9	<3,9	<3,9	<3,9	<3,9	<3,9	<3,9	<3,9	<3,9	<3,9	<3,9	2,2	2,1
étain	µg/l		<2,0	3,1			<2,0	<2,0			<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0
zinc	µg/l		70	71			72	430			16	28	29	50	26	45	20	21	18	47	49	12	22	<10	49	21
Somme des métaux	µg/l	15 000	339,65	455,85			370,95	432,89			71,15	137,75	84,25	122,07	83,81	115	64,46	72,55	26,6	60,22	59,1	19,4	48,9	8	105,09	75,2
azote Kjeldahl	mgN/l		-	-			-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,9	2,2
nitrite	mg/l		-	-			-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,3	0,6
nitrite	mgN/l		-	-			-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,1	0,18
nitrate	mg/l		-	-			-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	5,6
nitrate	mgN/l		-	-			-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,69	1,3
calcul de l'azote total	mgN/l		-	-			-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,6	3,7
HCT (C10-C40)	µg/l		-	-			-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<50	<50
Somme des HAP (16) - EPA	µg/l	1	<0,6	<0,6			<0,6	<0,6			<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6
PCB totaux (7)	µg/l	50	<0,07	<0,07			<0,07	<0,07			<0,07	<0,11	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07
DBO (5 jours)	mg/l	100	<3	40			<3	17			<3	17	10	22	6,4	11	5,0	25	<3	<3	<3	<3	<3	<3	8,8	3,2
DCO	mg/l	300	34	189			30	180			<25	116	485	200	105	260	82	210	<25	<25	<25	<25	<25	<25	90	42
MES (<2mg/l)	mg/l	100	42	100			130	1000			36	81	880	120	9,4	16	9,6	15	18	28	11	13	21	7,3	13	3,6

(*) Seuils : Arrêté du 15/02/16 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux – Annexe 1

Annexe 10 : Résultats du suivi environnemental des chantiers expérimentaux “hydrocyls” à Leers

Seuil	Unité	Seuil	Semaine 1		Semaine 2		Semaine 3		Semaine 4		Semaine 6		Semaine 8		Semaine 12		Semaine 26		Semaine 30		Semaine 39		Semaine 52	
		*	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp
COT	mg/l	70	19	79	21	92	9,1	67	10	53	9,9	43	9,4	40	5,5	11			18	25	22	43	9,3	15
antimoine	µg/l		2,1	2,1	3,8	2,5	<2	<2	2,2	<2,0	2,6	<2,0	2,5	<2,0	<2,0	<2,0			1,7	<0,50	2,9	0,83	1,76	1,15
arsenic	µg/l		<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5			2,3	<1,0	3	1,8	1,1	<1,0
baryum	µg/l		21	60	<15	21	<15	100	<15	38	19	150	<15	180	<15	110			13	91	11	200	12	130
cadmium	µg/l		0,68	0,22	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	0,33	0,36	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20			<0,050	<0,050	0,066	0,12	<0,2	<0,2
chrome	µg/l		87	47	150	56	78	41	79	35	42	19	64	17	20	12			26	6,8	20	6,3	4,8	2,1
cuivre	µg/l		39	560	44	670	32	520	31	500	30	330	37	360	14	120			44	170	33	220	9	84
mercure	µg/l		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05			<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
plomb	µg/l		4	6,9	2,3	<2,0	4,6	6	<2,0	2	7,4	5,8	2,2	5,6	2,2	<2,0			1,7	1,6	1,4	8,4	<1,0	<1,0
molybdène	µg/l		18	13	28	15	17	11	18	11	10	7,3	13	6,7	7,1	6,1			7,6	5,8	6,8	4,6	3,1	3,3
nickel	µg/l		5,3	54	5,4	69	3,4	50	5	52	3	33	3,1	36	<3	10			4,9	21	3,5	31	<3	13
sélénium	µg/l		11	15	19	7,6	4,4	13	7,7	<3,9	4,6	5,9	4	<3,9	<3,9	3,9			2,1	<1,0	2,7	1,7	1,2	<1,0
étain	µg/l		<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	2,3	<2	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	2,1	2,6	4,4			<2,0	<2,0	2,1	<2,0	<2,0	<2,0
zinc	µg/l		61	37	31	20	56	40	24	13	52	20	25	27	37	15			46	26	24	55	21	13,7
somme des métaux	µg/l	15 000	249,08	795,22	283,5	861,1	197,7	781	166,9	651	170,93	571,36	150,8	634,4	82,9	281,4			149,3	322,2	110,466	529,75	53,96	247,25
azote kjeldahl	mgN/l		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			2,3	5,7	1,7	7,3	1,4	3,3
nitrites	mg/l		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			2,8	4,5	1	4,3	0,32	5,7
nitrites	mgN/l		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			0,85	1,4	0,31	1,3	<0,1	1,7
nitrates	mg/l		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			6,9	2	20	1,8	3,4	<0,75
nitrates	mgN/l		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			1,6	0,44	4,5	0,42	0,77	<0,17
calcul de l'azote total	mgN/l		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			4,8	7,5	6,5	9	2,2	5,0
HCT (C10-C40)	µg/l																		<50	<50	65	480	<50	<50
somme des HAP (16) - EPA	µg/l	1	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6			<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6
PCB totaux (7)	µg/l	50	<0,07	<0,07	<0,07	<0,11	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07			<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07
DBO (5 jours)	mg/l	100	11	94	13	106	5,4	59	3,5	72	4,4	10	4	43	<3	<3			<3	9	<3	51	<3	<3
DCO	mg/l	300	69	194	58	235	<25	171	34	166	<25	113	35	109	<25	35			55	76	58	127	30	46
matières en suspension (<2mg/l)	mg/l	100	100	200	130	62	63	150	25	67	120	100	63	69	52	29			48	45	7,4	180	6,7	37

31/03/2020 COVID-19 - REPORTÉ AU 28/04/2020 (Semaine 30)

(*) Seuils : Arrêté du 15/02/16 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux – Annexe 1

Annexe 11 : Résultats du suivi environnemental des chantiers expérimentaux “coulis” à Bondues

Seuil	Unité	Seuil	Semaine 1		Semaine 2		Semaine 3		Semaine 4		Semaine 6		Semaine 8		Semaine 12		Semaine 26		Semaine 30		Semaine 39		Semaine 52	
		*	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp	Tém	Exp
COT	mg/l	70	4,0	4,3	5,5	6,1	4,7	6,3	4,9	5,5	6,2	4,0	4,1	3,4	3,9	3,3			14	5,1	5,9	5,3	5,7	5,4
antimoine	µg/l		<2,0	4,5	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0			<0,50	<0,50	<0,50	0,77	1,02	0,83
arsenic	µg/l		<5	5	8,1	8,6	<5	<5	<5	<5	6,3	6,6	<5	<5	7,3	<5			2,1	1,7	3,3	1,8	1,7	4,3
baryum	µg/l		61	37	43	47	94	51	150	57	51	55	51	60	61	67			43	42	74	47	65	56
cadmium	µg/l		0,33	<0,20	<0,20	<0,20	0,2	<0,20	<0,20	<0,20	0,28	0,34	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20			0,091	0,13	0,083	<0,050	<0,2	<0,2
chrome	µg/l		2,4	2,3	<1	1,7	<1	1,3	4,9	<1	1,7	<1	1,1	<1	1,3	1,1			<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	1	1,1
cuivre	µg/l		12	3,4	3,7	7,3	6,3	3,8	5,2	4,4	5,3	3,5	5,9	3,5	6,3	4,1			4,6	5,3	4,6	5,7	6,5	4
mercure	µg/l		<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05			<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
plomb	µg/l		11	<2,0	5,6	4,8	5,4	3,9	5,1	4,3	5,7	2,5	5,8	<2,0	8,5	<2,0			<1,0	<1,0	3,30	1,00	1,2	<1,0
molybdène	µg/l		6,8	20	16	27	10	23	16	13	12	8,6	12	6,8	9,8	11			8,3	8,6	6,7	5,8	3,5	7,4
nickel	µg/l		4,9	<3	7,8	4,4	4,8	3,1	6,3	3,8	5,2	3,6	5,1	3,7	9,2	8			9,8	9,6	9,5	6,9	15	6,7
sélénium	µg/l		<3,9	12	<3,9	19	<3,9	19	<3,9	13	<3,9	15	<3,9	7,1	<3,9	12			2,1	1,3	<1,0	1,4	1,7	1,7
étain	µg/l		<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	3	<2,0	4,7	2,3	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0			<2,0	<2,0	3,80	3,10	7,8	<2,0
zinc	µg/l		67	<10	47	28	40	23	44	15	46	23	38	16	40	34			21	29	38	29	43	52
somme des métaux	µg/l	15 000	165,43	84,2	131,2	147,8	163,7	128,1	236,2	112,8	133,48	118,14	118,9	97,1	143,4	137,2			90,991	97,63	143,283	102,47	147,42	134,03
azote kjeldahl	mgN/l		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			1,9	0,8	3,20	<0,5	2,6	1,0
nitrites	mg/l		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			0,36	<0,3	<0,3	<0,3	1,7	<0,3
nitrites	mgN/l		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			0,11	<0,1	<0,1	<0,1	0,51	<0,1
nitrates	mg/l		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			8,70	6,00	2,10	24,00	8,7	30
nitrates	mgN/l		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			2,00	1,40	0,47	5,30	2,0	6,7
calcul de l'azote total	mgN/l		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			4	2,2	3,7	5,3	5,1	7,7
HCT (C10-C40)	µg/l		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			<50	<50	55	<20	<50	<50
somme des HAP (16) - EPA	µg/l	1	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6			<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6	<0,6
PCB totaux (7)	µg/l	50	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07			<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07
DBO (5 jours)	mg/l	100	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3			3,8	<3	<3	<3	<3	<3
DCO	mg/l	300	33	<25	<25	<25	<25	81	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25			44	<25	<25	<25	<25	<25
matières en suspension (<2mg/l)	mg/l	100	54	5,2	30	110	22	22	21	10	34	7,7	34	15	35	11			8,2	8,4	20	20	10,0	22

31/03/2020 COVID-19 - REPORTÉ AU 28/04/2020 (Semaine 30)

(*) Seuils : Arrêté du 15/02/16 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux – Annexe 1

Paramètre	Unite	Usages de type 1	Usages de type 2	Usages de type 3	H-TEM	H-5%	H-6%	Coulis
broyage	-	-	-	-	Ja	Ja	Ja	
matière sèche	% massique	-	-	-	98.2	97.5	96.4	98.3
COT	mg/kg MS	30000	30000	30000	11000	3800	7900	70000
pH (KCl)		-	-	-	12.7	12.7	12.7	10.0
température pour mes. pH	°C	-	-	-	19.2	19.4	19.3	19.3
LIXIVIATION								
date de lancement		-	-	-	23-03-2021 00:00:00	23-03-2021 00:00:00	23-03-2021 00:00:00	23-03-2021 00:00:00
Lixiviation 24h - NF-EN-12457-2		-	-	-	#	#	#	#
COMPOSES AROMATIQUES VOLATILS								
benzène	mg/kg MS	-	-	-	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
toluène	mg/kg MS	-	-	-	<0.05	<0.05	<0.05	0.19
éthylbenzène	mg/kg MS	-	-	-	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
orthoxylène	mg/kg MS	-	-	-	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
para- et métaxylène	mg/kg MS	-	-	-	<0.05	<0.05	<0.05	0.12
xylènes	mg/kg MS	-	-	-	<0.10	<0.10	<0.10	0.12
BTEX totaux	mg/kg MS	6	6	6	<0.25	<0.25	<0.25	0.31
HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES								
naphtalène	mg/kg MS	-	-	-	<0.02	<0.02	<0.02	0.16
acénaphtylène	mg/kg MS	-	-	-	<0.02	<0.02	<0.02	0.06
acénaphtène	mg/kg MS	-	-	-	<0.02	<0.02	<0.02	0.11
fluorène	mg/kg MS	-	-	-	<0.02	<0.02	<0.02	0.04
phénanthrène	mg/kg MS	-	-	-	0.05	0.04	0.04	0.42
anthracène	mg/kg MS	-	-	-	<0.02	<0.02	<0.02	0.11
fluoranthène	mg/kg MS	-	-	-	0.06	0.18	0.06	1.4
pyrène	mg/kg MS	-	-	-	0.09	0.18	0.07	1.2

benzo(a)anthracène	mg/kg MS	-	-	-	0.02	0.10	0.03	0.25
chrysène	mg/kg MS	-	-	-	<0.02	0.10	0.04	0.22
benzo(b)fluoranthène	mg/kg MS	-	-	-	0.03	0.21	0.06	0.32
benzo(k)fluoranthène	mg/kg MS	-	-	-	<0.02	0.09	0.03	0.14
benzo(a)pyrène	mg/kg MS	-	-	-	<0.02	0.12	0.03	0.07
dibenzo(ah)anthracène	mg/kg MS	-	-	-	<0.02	0.02	<0.02	<0.02
benzo(ghi)pérylène	mg/kg MS	-	-	-	<0.02	0.12	0.03	0.03
indéno(1,2,3-cd)pyrène	mg/kg MS	-	-	-	<0.02	0.12	0.03	0.03
Somme des HAP (10) VROM	mg/kg MS	-	-	-	<0.20	0.87	0.29	2.8
Somme des HAP (16) - EPA	mg/kg MS	50	50	50	<0.32	1.3	0.42	4.6
POLYCHLOROBIPHENYLS (PCB)								
PCB 28	µg/kg MS	-	-	-	<2	<2	<2	9.8
PCB 52	µg/kg MS	-	-	-	<2	<2	<2	15
PCB 101	µg/kg MS	-	-	-	<2	<2	<2	14
PCB 118	µg/kg MS	-	-	-	<2	<2	<2	7.7
PCB 138	µg/kg MS	-	-	-	<2	<2	<2	9.9
PCB 153	µg/kg MS	-	-	-	<2	<2	<2	13
PCB 180	µg/kg MS	-	-	-	<2	<2	<2	9.4
PCB totaux (7)	µg/kg MS	1000	1000	1000	<14	<14	<14	79
HYDROCARBURES TOTAUX								
fraction C10-C12	mg/kg MS	-	-	-	<5	<5	<5	<5
fraction C12-C16	mg/kg MS	-	-	-	26	<5	7.0	<5
fraction C16-C21	mg/kg MS	-	-	-	280	25	89	10
fraction C21-C40	mg/kg MS	-	-	-	250	47	150	43
hydrocarbures totaux C10-C40	mg/kg MS	300	300	300	560	70	250	55
LIXIVIATION								
L/S	ml/g	-	-	-	10.03	10.13	10.03	9.99
pH final ap. lix.	-	-	-	-	12.00	12.00	13.00	9.90
température pour mes. pH	°C	-	-	-	19.1	18.8	18.6	18.5

conductivité (25°C) ap. lix.	µS/cm	-	-	-	4430	4220	7160	627
ELUAT COT								
COD, COT sur éluat	mg/kg MS	-	-	-	24	110	72	230
ELUAT METAUX								
antimoine	mg/kg MS	0.6	0.3	0.08	<0.039	<0.039	<0.039	0.11
arsenic	mg/kg MS	0.6	0.6	0.6	<0.05	<0.05	<0.05	0.17
baryum	mg/kg MS	36	25	25	1.9	1.5	3.6	0.23
cadmium	mg/kg MS	0.05	0.05	0.05	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004
chrome	mg/kg MS	4	2	0.6	0.21	0.075	0.059	0.37
cuivre	mg/kg MS	10	5	3	0.063	0.55	0.19	0.84
mercure	mg/kg MS	0.01	0.01	0.01	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
plomb	mg/kg MS	0.6	0.6	0.6	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
molybdène	mg/kg MS	5.6	2.8	0.6	0.054	0.052	<0.05	0.43
nickel	mg/kg MS	0.5	0.5	0.5	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
sélénium	mg/kg MS	0.5	0.4	0.1	<0.039	<0.039	<0.039	0.10
zinc	mg/kg MS	5	5	5	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
ELUAT COMPOSES INORGANIQUES								
fraction soluble	mg/kg MS	-	-	-	13900	12000	17900	5570
ELUAT PHENOLS								
Indice phénol	mg/kg MS	-	-	-	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
ELUAT DIVERSES ANALYSES CHIMIQUES								
fluorures	mg/kg MS	60	30	13	3.7	4.1	2.8	14
chlorures	mg/kg MS	10000	5000	1000	220	320	340	60
sulfate	mg/kg MS	10000	5000	1300	99.3	78.4	18.5	2510

Annexe 13 : Compte-rendu du Copil n°1

PROJET SEDIMEL 1

Copil n°1 – Mercredi 12 Juillet 2018

Intitulé du projet : ***Pilotes expérimentaux pour l'application « grave traitée » et ouvrages expérimentaux pour les applications coulis et hydrocyls***

Présents	Email
La MEL	
Nicolas Prud'Homme	nprudhomme@lillemetropole.fr
Conseil Régional	
Patrice Maurel	patrice.maurel@hautsdefrance.fr
Néo-Eco	
Amine Kadiri	akadiri@neo-eco.fr
VNF	
Marion Delplanque	marion.delplanque@vnf.fr
CD2E	
Cyril Scribot	c.scribot@cd2e.com

Adresse de la réunion : Locaux de la MEL- 1 rue ballon Lille

Charlotte Destombes	c.destombes@cd2e.com

1 Rappel du projet

1.1 SEDIMATERIAUX de la MEL phase laboratoire (2013-2015) :

Les projets de la valorisation des sédiments de la Métropole Européenne de Lille se réalisent selon la démarche SEDIMATERIAUX.

Cette démarche passe par une validation à échelle laboratoire de la faisabilité géotechnique et environnementale de la valorisation des sédiments dans les usages visés.

Cette phase laboratoire a été réalisée par la MEL entre 2013 et 2015 en partenariat avec NEOECO et l'IMT Lille-Douai.

L'objectif de cette phase du projet était de substituer des matières granulaires « nobles » utilisées dans les coulis et les bétons de chaussée réservoir (hydrocyl) tout en maintenant des caractéristiques mécaniques fonctionnelles et environnementales acceptables.

La conclusion de cette étude laboratoire était que les sédiments peuvent être utilisés en proportion non négligeable dans les filières de type coulis autocompactant et béton en modules de chaussée réservoir.

En effet, à la fois les essais mécaniques et environnementaux ont permis de démontrer l'acceptabilité des matériaux dans les conditions suivantes :

- Utilisation jusqu'à 20 % de sédiments dans la formule de coulis ;
- Utilisation de jusqu'à 15 % de sédiments en substitution du sable dans la formule de béton en modules de chaussée réservoir. Cela induit une substitution de 6% de la formulation globale par des sédiments
- Criblage et séchage préalable des sédiments nécessaire ;

1.2 Présentation générale du projet SEDIMEL 1 :

Suite à ces résultats très concluants de cette phase laboratoire, la MEL est donc passée à la phase terrain de réalisation des ouvrages expérimentaux à base de sédiments.

Pour cette phase terrain 3 ouvrages expérimentaux seront mis en œuvre sur la métropole de Lille.

- deux de ces ouvrages seront consacrés à l'application Hydrocyl, ces ouvrages seront différents en terme d'utilisation finale, de sollicitation et de taux de sédiment incorporé dans les formulations. L'objectif serait de fiabiliser les résultats et de les généraliser sur tout différents types de chantier de la métropole de Lille.
- un ouvrage sera consacré à l'application Coulis.

En complément, la MEL souhaite également développé des formulations de grave traitée à base de sédiment. Des pilotes expérimentaux seront réalisés à base de cette formulation de « grave traitée » à base de sédiment.

2 Rappel des phases du projet

Phase du projet		MEL – Porteur	NEOECO-Prestataire de la MEL	IMT Lille-Douai-Prestataire de NEOECO
Caractérisation des sédiments			X	X
Etude de formulation « Grave traitée »				X
Pilotes expérimentaux pour l'application « Grave traitée »	Réalisation des pilotes expérimentaux		X	
	Suivis des pilotes expérimentaux		X	
Ouvrages expérimentaux pour les applications coulis et hydrocyl :	Rédaction des cahiers des clauses techniques particulières spécifiques aux ouvrages expérimentaux		X	
	Réalisation des 3 ouvrages expérimentaux	X		
	Suivi de la réalisation des ouvrages expérimentaux		X	
	Suivis environnementaux et mécaniques des ouvrages expérimentaux		X	
Etude du potentiel de recyclabilité des produits			X	
Analyse des conditions de mise sur le marché			X	
Communication			X	

3 Avancée du projet

3.1 Caractérisation des sédiments

Les sédiments ont été soumis à une phase de préparation pour la création d'une fraction de 0-20mm.

A l'issue de la préparation, des échantillonnages ont été réalisés pour les essais de caractérisation physique, minéralogique et environnementale, réalisés par l'IMT de Douai. La société Néo-Eco s'est chargée de l'interprétation des résultats et de la présentation de la méthodologie et des résultats lors COPIL n°1.

Tableau de synthèse de la caractérisation des sédiments :

Caractérisation physique et classification GTR

Essais	**Résultats**	**Interprétation**	**Sous classe**	**Classification GTR**
Caractérisation physique				
Perte au feu	13,15 pour T=450°C 13,82 pour T=550°C			
Masse volumique	2,38 g/ cm3			
Classification GTR				
Dmax	<50mm	Sol fin	A	A1h
Fraction inf. à 80µm	>35%			
Valeur de bleu de méthylène (VBS)	1,30	Sol limoneux	A1	
Indice de plasticité (Ip)	14,4	Sol moyennement plastique		
Proctor - Teneur en eau W_{OPM}	28,4%	Humide	A1h	
Indice Portant Immédiat (IPI)	5,8			

Caractérisation environnementale		
Ecotoxicité	SEDIMENT NON TOXIQUE	Sédiment non inerte non dangereux
Lixiviation	Le taux d'hydrocarbure et d'antimoine dépassent le seuil ISDI	
Seuil S1 et seuil S2	Le taux de plomb dépasse le seuil S1 Le taux de cuivre et du zinc dépassent le seuil S2	

3.2 Etude de formulation « Grave traitée »

Sur les 7 formulations étudiées, nous retiendrons la formulation FGT5 pour la réalisation des pilotes expérimentaux.

La formulation FGT7 a été validée aussi pour la réalisation du programme analytique complet en vue de l'évaluation des performances requis pour une application « grave traitée ».

Formulation FGT5 :

	FGT5
	20SED1CaO4ROCAS
Sable 0/5,6 (%)	**38,39**
Graviers 6/20 (%)	**47,01**
Sédiments MEL (%)	**10,41**
CV F (%)	**0,00**
LHF (%)	**0,00**
ROC AS (%)	**4,00**
CaO (%)	**0,19**

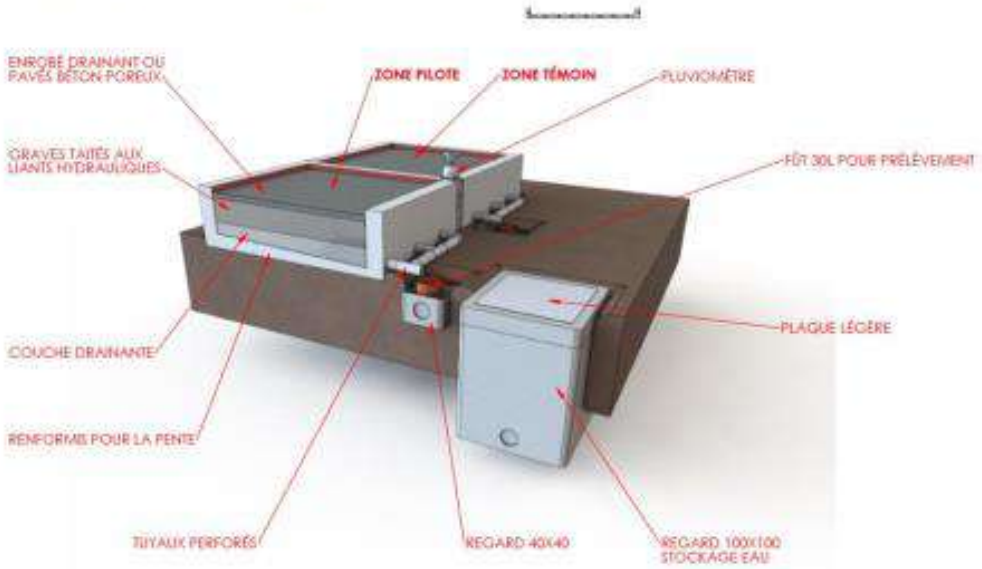
Formulation FGT7 :

	FGT7
	20SED3LHF3CVF
Sable 0/5,6 (%)	36,80
Graviers 6/20 (%)	46,00
Sédiments MEL (%)	9,20
CV F (%)	3,00
LHF (%)	5,00
ROC AS (%)	0,00
CaO (%)	0,00

3.3 Pilotes expérimentaux pour l'application « Grave traitée »

La conception et le protocole de suivi environnemental et mécanique des pilotes expérimentaux ont été présentés au copil.

Ci-dessous une illustration du pilote :



3.4 Ouvrages expérimentaux pour les applications coulis et hydrocyl :

La présentation générale des 3 ouvrages expérimentaux a été faite au copil.

Ouvrage expérimental hydrocyl n°1	Ouvrage expérimental hydrocyl n°2	Ouvrage expérimental Coulis
Ouvrage d'aménagement du centre de la ville de Leers	Ouvrage de création de parking sur la rue de Rhin de la ville de Tourcoing	• L'ouvrage de coulis est situé Rue Anne et Albert Prouvost à Bondues, • Le linéaire de canalisation concerné par l'ouvrage est de 800 mètres environ. • La canalisation est en grès de diamètre 500 mm. • 700 m3 de coulis seront donc coulés pour la mise en œuvre de cet ouvrage. • Une partie de l'ouvrage sera mise en œuvre avec une formulation témoin de coulis sans intégration de sédiment.
• Sollicitations modérées • Taux de substitution des sédiments moyen (5% de la composition globale des hydrocyls)	• Sollicitations faibles • Taux de substitution des sédiments maximale (6 à 7% de la composition globale des hydrocyls)	
Dimensions de l'ouvrage : • Longueur : 76 mètres • Largeur : 10 mètres • Epaisseur : 0,9 mètres dont 0,6 mètres d'hydrocyl	Dimensions de l'ouvrage : • Longueur : 19 mètres (sur 2 zones) • Largeur : 10 mètres (sur 2 zones) • Epaisseur : 0,9 mètres dont 0,6 mètres d'hydrocyl	

Le contenu des CCTP de consultation des entreprises spécifiques à l'expérimentation SEDIMATERIAUX a été également présenté au copil. Ces spécificités consiste principalement à :

1. Assurer une séparation entre la partie témoin du chantier réalisée à base d'ouvrage sans sédiments et la partie réalisée avec des ouvrage intégrant des sédiments.
2. Instrumentation de chaque partie séparément en vue de récupérer les eaux pour les analyses du suivi environnementale.
3. Assurer l'étanchéité complète des ouvrages

4 Suivi des Livrables

Phase du projet		Livrable	Disponibilités des livrables
Caractérisation des sédiments		Rapport de caractérisation et fiche sédiment	Disponible au copil N°1 du 12/12/2018
Etude de formulation « Grave traitée »		Rapport de l'étude de formulation de la grave traitée intégrant les sédiments	–
Pilotes expérimentaux pour l'application « Grave traitée »	Réalisation des pilotes expérimentaux	• Fiches pilotes expérimentaux • Rapport et plan de la conception des pilotes expérimentaux • Rapport du protocole et du suivi environnemental et mécanique	–
	Suivis des pilotes expérimentaux		–
Ouvrages expérimentaux pour les applications coulis et hydrocyl :	Rédaction des cahiers des clauses techniques particulières spécifiques aux ouvrages expérimentaux	• Fiches ouvrages expérimentaux • Rapport du protocole de suivi environnemental et mécanique des ouvrages expérimentaux • Rapport avec des illustrations photographiques des étapes de la fabrication et de la mise en œuvre des ouvrages expérimentaux • Rapport du suivi environnemental et mécanique des 3 ouvrages expérimentaux	-Rapports du contenu des cctp spécifique à l'expérimentation SEDIMATERIAUX_ Disponibles au copil N°1 du 12/12/2018
	Réalisation des 3 ouvrages expérimentaux		–
	Suivi de la réalisation des ouvrages expérimentaux		–
	Suivis environnementaux et mécaniques des ouvrages expérimentaux		–

Etude du potentiel de recyclabilité des produits	Rapport de l'étude Etude du potentiel de recyclabilité des produits	_
Analyse des conditions de mise sur le marché	Rapport de l'analyse des conditions de mise sur le marché	_
Communication	• Présentation synthétique des phases et des résultats pour les actions de communication (conférence régionale, colloque nationale et internationale)	_

5 Prochaines échéances du projet

Les prochaines échéances à présenter pour le copil N°2 sont les suivantes :

_Présentation des résultats des programmes d'essais prévus sur les formulations FGT5 et FGT7.

_Construction des pilotes et lancement des suivis environnementaux et mécaniques

_Lancement de la fabrication des Hydrocyls à échelle industrielle

_Début des chantiers pour les ouvrages expérimentaux

_Prévoir des premières actions de communication

Le copil N°2 sera organisé en Juillet 2019.

6 Annexe : Présentation du copil n°1 du 12/12/2018

Annexe 14 : Compte-rendu du Copil n°2

PROJET SEDIMEL 1

Copil n°2 – Vendredi 7 Juin 2019

Intitulé du projet : ***Pilotes expérimentaux pour l'application « grave traitée » et ouvrages expérimentaux pour les applications coulis et hydrocyls***

Présents	Email
La MEL	
Nicolas Prud'Homme	nprudhomme@lillemetropole.fr
Conseil Régional	
Patrice Maurel	patrice.maurel@hautsdefrance.fr
Néo-Eco	
Amine Kadiri	akadiri@neo-eco.fr
Maurane Vermander	mvermander@neo-eco.fr
CD2E	
Cyril Scribot	c.scribot@cd2e.com
Charlotte Destombes	c.destombes@cd2e.com

Adresse de la réunion : Locaux de la MEL

1 Rappel du projet

1.1 SEDIMATERIAUX de la MEL phase laboratoire (2013-2015) :

Les projets de la valorisation des sédiments de la Métropole Européenne de Lille se réalisent selon la démarche SEDIMATERIAUX.

Cette démarche passe par une validation à échelle laboratoire de la faisabilité géotechnique et environnementale de la valorisation des sédiments dans les usages visés.

Cette phase laboratoire a été réalisée par la MEL entre 2013 et 2015 en partenariat avec NEOECO et l'IMT Lille-Douai.

L'objectif de cette phase du projet était de substituer des matières granulaires « nobles » utilisées dans les coulis et les bétons de chaussée réservoir (hydrocyl) tout en maintenant des caractéristiques mécaniques fonctionnelles et environnementales acceptables.

La conclusion de cette étude laboratoire était que les sédiments peuvent être utilisés en proportion non négligeable dans les filières de type coulis autocompactant et béton en modules de chaussée réservoir.

En effet, à la fois les essais mécaniques et environnementaux ont permis de démontrer l'acceptabilité des matériaux dans les conditions suivantes :

- Utilisation jusqu'à 20 % de sédiments dans la formule de coulis ;
- Utilisation de jusqu'à 15 % de sédiments en substitution du sable dans la formule de béton en modules de chaussée réservoir. Cela induit une substitution de 6% de la formulation globale par des sédiments
- Criblage et séchage préalable des sédiments nécessaire ;

1.2 Présentation générale du projet SEDIMEL 1 :

Suite à ces résultats très concluants de cette phase laboratoire, la MEL est donc passée à la phase terrain de réalisation des ouvrages expérimentaux à base de sédiments.

Pour cette phase terrain 3 ouvrages expérimentaux seront mis en œuvre sur la métropole de Lille.

- deux de ces ouvrages seront consacrés à l'application Hydrocyl, ces ouvrages seront différents en terme d'utilisation finale, de sollicitation et de taux de sédiment incorporé dans les formulations. L'objectif serait de fiabiliser les résultats et de les généraliser sur tout différents types de chantier de la métropole de Lille.
- un ouvrage sera consacré à l'application Coulis.

En complément, la MEL souhaite également développé des formulations de grave traitée à base de sédiment. Des pilotes expérimentaux seront réalisés à base de cette formulation de « grave traitée » à base de sédiment.

2 Rappel des phases du projet

Phase du projet		MEL – Porteur	NEOECO-Prestataire de la MEL	IMT Lille-Douai-Prestataire de NEOECO
Caractérisation des sédiments			X	X
Etude de formulation « Grave traitée »				X
Pilotes expérimentaux pour l'application « Grave traitée »	Réalisation des pilotes expérimentaux		X	
	Suivis des pilotes expérimentaux		X	
Ouvrages expérimentaux pour les applications coulis et hydrocyl :	Rédaction des cahiers des clauses techniques particulières spécifiques aux ouvrages expérimentaux		X	
	Réalisation des 3 ouvrages expérimentaux	X		
	Suivi de la réalisation des ouvrages expérimentaux		X	
	Suivis environnementaux et mécaniques des ouvrages expérimentaux		X	
Etude du potentiel de recyclabilité des produits			X	
Analyse des conditions de mise sur le marché			X	
Communication			X	

3 Rappel des avancées présentés en copil n°1

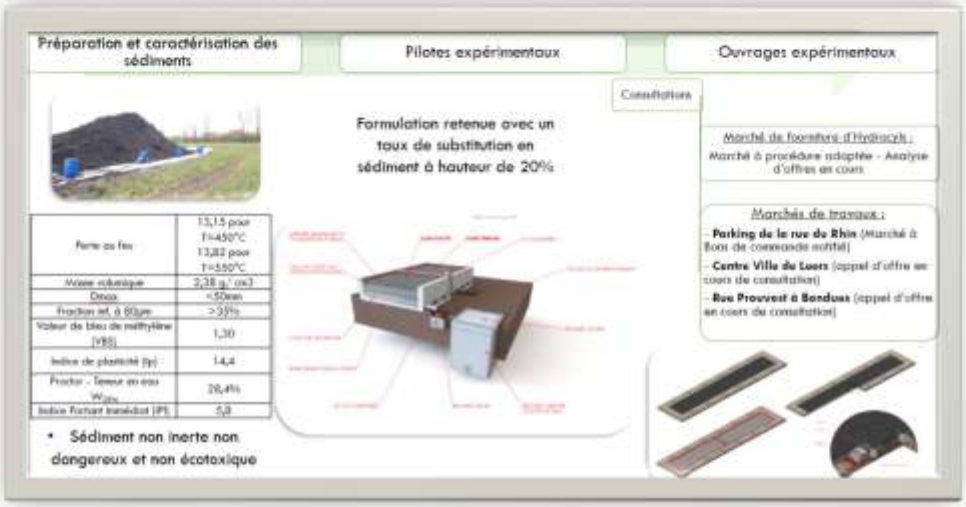
Pour rappel, le copil n°1 s'est consacré à la présentation de :

-Préparation et caractérisation des sédiments

-Etude des formulations de grave traitée et conception des pilotes expérimentaux

-Rédaction des cahiers des charges et des clauses spécifiques à la démarche Sédimateriaux pour le dossier de consultation des entreprises.

La figure ci-dessus illustre les éléments présentés au copil n°1 :



4 Présentation des avancées

4.1 Etudes de formulation

Pour rappel, sur les 7 formulations étudiées la formulation FGT5 a été retenue lors du copil n°1 pour la réalisation des pilotes expérimentaux.

Formulation FGT5 :

	FGT5
	20SED1CaO4ROCAS
Sable 0/5,6 (%)	**38,39**
Graviers 6/20 (%)	**47,01**
Sédiments MEL (%)	**10,41**

CV F (%)	0,00
LHF (%)	0,00
ROC AS (%)	4,00
CaO (%)	0,19

Les résultats des essais complémentaires attendus pour le ce copil n°2 ont été présentés.

Ces résultats démontrent la faisabilité technique de la formulation de grave traitée intégrant les sédiments avec un taux de substitution de 20%.

- **Résistance au trafic de chantier direct:** mesure de la résistance en compression => **R_{cmin}= 1 MPa**

Résistance à la compression simple	
Echéance (jours)	Rc (MPa)
28	1,003
60	1,740
90	2,300

- **Résistance au gel:** mesure de la résistance en traction indirecte => **R_{itmin}= 0,25 MPa**

Résistance à la traction indirecte	
Echéance (jours)	Rit (MPa)
28	0,17
60	0,54
90	0,85

- **Résistances après immersion dans l'eau:** mesure de la résistance en compression après 28 jours de cure normale suivis de 32 jours d'immersion totale dans de l'eau à 20 °C,

Valeur recherchée : Supérieure à 0,7

Résultats : **(Rci60/Rc60=0,38/0,54=0,704 > 0,7)**

- **Classes mécaniques selon Rt (0,8xR_{it}) et E: objectif de classe T2 ou T3**

Echéance (jours)	Rt (MPa)	Et (GPa)
60	0,432	12,59
360	0,660	17,99

4.2 Pilotes expérimentaux

La construction des pilotes expérimentaux est en cours sur un terrain de la Mel : ***Bassin de la prévôté chemin de l'aventure à Houplines.***

La mise en œuvre des matériaux veillera à respecter le protocole laboratoire suivant :

1. Traitement des sédiments MEL humide (environ 20% de teneur en eau) avec 1% de chaux vive par rapport à la masse sèche de sédiments
2. Attendre une heure (temps d'action de la chaux), avant de mélanger les sédiments à la grave (sables - graviers)
3. Mesurer la teneur en eau du mélange (sédiments - sables - graviers)
4. Ajouter la quantité d'eau nécessaire pour avoir la teneur en eau optimale (Paramètres essai Proctor)
5. Ajouter le liant hydraulique (5% environ de la masse sèche du mélange)
6. Compactage à l'optimum Proctor modifié

La figure ci-dessous illustre l'avancement de la construction du pilote :

4.3 Ouvrages expérimentaux

4.3.1 Fabrication des hydrocyls :

Le marché de la fabrication des hydrocyls a été remporté par l'entreprise LIB.

Des tests de fabrication ont eu lieu et les résultats suivants des ces tests ont été présentés au copil n°2 :

[redacted]	Témoin	5% de sédiments	6% de sédiments	7% de sédiments
	R Mpa	R Mpa	R Mpa	R Mpa
Moyennes	52,5	24,2	39,4	33,6

La figure ci-dessous illustre la réalisation des tests industriels chez LIB :

4.3.2 Chantier parking de la rue du Rhin :

Le marché public pour la réalisation de ce chantier expérimental a été remporté par la PME ***CREAPAV***.

La réalisation du chantier s'est déroulée dans de très bonnes conditions. Le chantier s'est réalisé sur le 2ème trimestre de l'année 2019.

Le suivi environnemental de ce chantier a donc pu débuter. Les paramètres suivis sont les mêmes que ceux de la phase laboratoire de la démarche Sédimatériaux du projet SEDIMEL.

Métaux : As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sn, Zn
Carbone Organique Total (COT)
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)
Polychlorobiphényles (PCB)
Demande chimique en Oxygène (DCO)
Demande Biologique en Oxygène (DBO)
Matière en Suspension (MES)

Au copil, les prélèvements suivants ont été réalisés :

Semaine	Date prévue de prélèvement	Date réelle*
1	02/05/2019	02/05/2019
2	09/05/2019	Pas d'eau
3	16/05/2019	Décalé au 20/05/2019
4	23/05/2019	Pas d'eau

*Les prélèvements sont liés à la présence ou non d'eau de pluie (et donc liés à la pluviométrie).

La figure ci-dessous illustre le chantier au cours de sa réalisation :

4.3.3 Chantier Centre-Ville de Leers

Le marché public pour la réalisation de ce chantier expérimental a été remporté par l'entreprise **COLAS.**

Il est prévu de fabriquer pour ce chantier 230 Tonnes d'hydrocyls sédiments et 230 Tonnes d'hydrocyls témoin.

La réalisation du chantier est en cours et la livraison des hydrocyls est prévue pour le mois de Juillet 2019.

Le suivi environnemental du chantier débutera immédiatement après la fin de la réalisation des bassins du chantier.

4.3.4 Chantier Rue Prouvost à Bondues :

Le marché public pour la réalisation de ce chantier expérimental a été remporté par l'entreprise **EUROVIA.**

Il est prévu de fabriquer pour ce chantier 700m3 de coulis pour ce chantier.

La réalisation du chantier est en cours et la livraison des coulis est prévue pour le mois de Juillet 2019.

Le suivi environnemental du chantier débutera immédiatement après la fin de la réalisation des bassins du chantier.

5 Suivi des Livrables

Phase du projet		Livrable	Disponibilités des livrables
Caractérisation des sédiments		Rapport de caractérisation et fiche sédiment	Disponible au copil N°1 du 12/12/2018
Etude de formulation « Grave traitée »		Rapport de l'étude de formulation de la grave traitée intégrant les sédiments	Disponible au copil n°2 du 07/06/2019
Pilotes expérimentaux pour l'application « Grave traitée »	Réalisation des pilotes expérimentaux	• Fiches pilotes expérimentaux • Rapport et plan de la conception des pilotes expérimentaux • Rapport du protocole et du suivi	–
	Suivis des pilotes expérimentaux		–

		environnemental et mécanique	
Ouvrages expérimentaux pour les applications coulis et hydrocyl :	Rédaction des cahiers des clauses techniques particulières spécifiques aux ouvrages expérimentaux	• Fiches ouvrages expérimentaux • Rapport du protocole de suivi environnemental et mécanique des ouvrages expérimentaux • Rapport avec des illustrations photographiques des étapes de la fabrication et de la mise en œuvre des ouvrages expérimentaux • Rapport du suivi environnemental et mécanique des 3 ouvrages expérimentaux	-Rapports du contenu des cctp spécifique à l'expérimentation SEDIMATERIAUX_ Disponibles au copil N°1 du 12/12/2018
	Réalisation des 3 ouvrages expérimentaux		–
	Suivi de la réalisation des ouvrages expérimentaux		–
	Suivis environnementaux et mécaniques des ouvrages expérimentaux		–
Etude du potentiel de recyclabilité des produits		Rapport de l'étude Etude du potentiel de recyclabilité des produits	–
Analyse des conditions de mise sur le marché		Rapport de l'analyse des conditions de mise sur le marché	–
Communication		• Présentation synthétique des phases et des résultats pour les actions de communication (conférence régionale, colloque	Disponible au copil n°2 du 07/06/2019 • Communiqué de presse : Adressé le 3/06 à une base de 120 contacts (presse régionale,

	nationale et internationale)	nationale, spécialisée) • Articles web • Vidéo de fabrication des hydrcoyls • Vidéo de réalisation du chantier du parking rue du Rhin à Tourcoing

6 Communication

La communication dans le cadre du projet a été confiée par Néo-Eco au CD2E.

Le plan d'action de communication du CD2E comporte à ce jour principalement :

- Rédaction de communiqué de presse : Adressé le 3/06 à une base de 120 contacts (presse régionale, nationale, spécialisée)
- Publication d'articles web notamment sur le site sedilab.com
- Prises de parole lors d'événements professionnels
  - Rencontres du CERIB 14 juin
  - Organisation de réunion entre les collectivités pour partage de retour d'expérience lors d'une table ronde
  - Rencontres nationales des ingénieurs territoriaux 13 juin – Dunkerque
  - Journée Expertise construction – 5ème édition 4 juillet – Epernon (28)
- Préparation de la promotion du projet lors des **Assises nationales de la valorisation des sédiments : 1er octobre – Paris**
- Réalisation des Vidéos étapes du projet

La figure ci-dessous illustre ce plan d'action :

7 Prochaines échéances du projet

Les prochaines échéances à présenter pour le copil N°3 sont les suivantes :

- Livraison de 230 Tonnes d'hydrocyls sédiments et de 230 d'hydrocyls témoin pour le chantier des Leers Cœur de Ville la semaine 28
- Livraison du Coulis SEDIMATERIAUX pour le chantier à Bondus en Mi-Juillet 2019
- Lancement des essais CERIB sur les produits finis Hydrocyls
- Suivis environnementaux sur 12 mois sur les 3 ouvrages expérimentaux
- Suivi environnemental et mécanique sur 12 mois sur les pilotes expérimentaux

Le copil N°3 sera organisé en Décembre 2019.

8 Annexe : Présentation du copil n°1 du 12/12/2018

Annexe 15 : Compte-rendu du Copil n°3

PROJET SEDIMEL 1

COPIL n°3 – Mercredi 11 Décembre 2019

Intitulé du projet : Pilotes expérimentaux pour l'application « grave traitée » et ouvrages expérimentaux pour les applications « coulis autocompactant » et « béton en modules de chaussée réservoir (hydrocyls) »

Participants		
Nom	**Structure**	**Fonction**
Nicolas PRUD'HOMME	MEL Direction Eau et Assainissement	Chef de projet
Farid TALBI	MEL Unité Territoriale Roubaix – Villeneuve d'Ascq	Conducteur de travaux
Christophe FOURMESTRAUX	MEL Unité Territoriale Roubaix – Villeneuve d'Ascq	Surveillant
Xavier DEMEYER	MEL UTTA Assainissement	Responsable Travaux Neufs
Gaël BARREAU	MEL UTTA Assainissement	Conducteur Travaux
Pierre LOMMERE	MEL DTEC	Chargée de mission budget climatique
Magali MAERTEN	MEL UTTA Assainissement	Responsable Bureau d'étude Assainissement
Salah BOUSSADA	MEL Voirie	Chargé de mission voirie
Frédéric DECOSTER	MEL - EPCO	Chef de service adjoint
Patrice MAUREL	Conseil Régional Hauts-de-France	Responsable de projets
Marion DELPLANQUE	VNF	Chargée de Mission
Charlotte DESTOMBES	CD2E	Chargée de communication
Cyril SCRIBOT	CD2E	Consultant valorisation sédiments
Amine KADIRI	NEO-ECO	Responsable Pôle Economie Circulaire
Maurane VERMANDER	NEO-ECO	Chef de projet Economie Circulaire
Pauline POIRE	NEO-ECO	Chef de projet Economie Circulaire

1 Rappel du projet

1.1 Phase laboratoire (2013 – 2015)

Le projet SEDIMEL 1, portant sur la valorisation des sédiments de la MEL, est réalisé selon la démarche SEDIMATERIAUX. Cette démarche, ayant pour ambition d'apporter une réponse adaptée et dimensionnée à la problématique de gestion et de valorisation terrestre des sédiments de dragage, se décompose en 3 phases : une phase de caractérisation des sédiments, une phase d'étude à l'échelle laboratoire et une phase d'étude à l'échelle terrain.

Entre 2013 et 2015, la phase d'étude à l'échelle laboratoire a été réalisée par la MEL en partenariat avec NEO-ECO et l'IMT Lille-Douai. L'objectif de cette phase du projet était de substituer des matières granulaires « nobles » utilisées dans les coulis et les bétons de chaussée réservoir (hydrocyls) tout en maintenant des caractéristiques mécaniques fonctionnelles et environnementales acceptables. Les résultats de cette étude ont permis de démontrer la faisabilité technique et environnementale de l'utilisation en proportion non négligeable de sédiments dans les filières envisagées. Cette étude a notamment permis de définir les conditions de préparation des sédiments ainsi que les taux de substitution maximum envisageables :

- Criblage et séchage préalable des sédiments nécessaire ;
- Utilisation jusqu'à 20 % de sédiments dans la formule de coulis ;
- Utilisation jusqu'à 15 % de sédiments en substitution du sable dans la formule de béton en modules de chaussée réservoir.

1.2 Présentation générale du projet SEDIMEL 1

Suite aux résultats concluants de l'étude à l'échelle laboratoire, la MEL s'est lancée dans la phase terrain de réalisation d'ouvrages expérimentaux à base de sédiments. Pour cette phase terrain, 3 ouvrages expérimentaux ont été mis en œuvre sur la métropole de Lille :

- Deux de ces ouvrages sont consacrés à l'application « béton en modules de chaussée réservoir ». Ces ouvrages sont différents en termes d'utilisation finale, de sollicitation et de taux de sédiments incorporés dans les formulations.

- Un ouvrage est consacré à l'application « coulis autocompactant ».

En complément de ces ouvrages, la MEL a également souhaité développer des formulations de graves traitées à base de sédiments. Dans ce cadre, suite à des études de formulation réalisées à l'échelle laboratoire, des pilotes expérimentaux ont été réalisés afin de tester à plus grande échelle cette application.

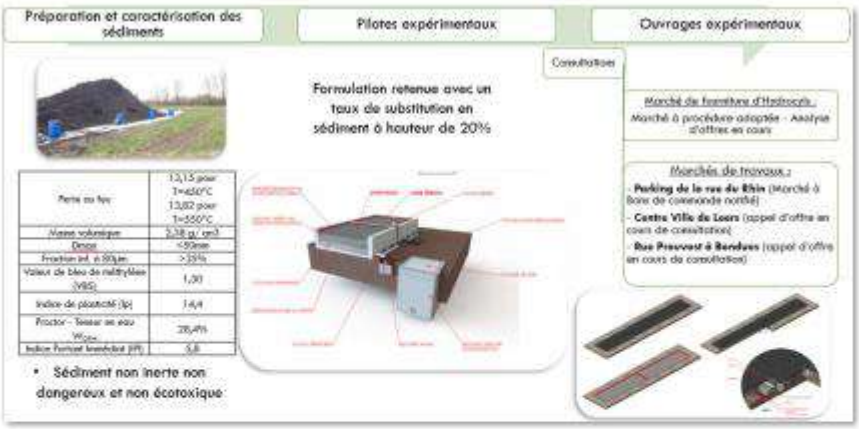


Figure 1 : Synthèse de présentation du COPIL n°1

4 Rappel des avancées présentées en COPIL n°2

Le COPIL n°2, tenu en juin 2019, a permis la présentation des avancées et des éléments suivants :

- Présentation de résultats complémentaires vis-à-vis de l'étude de formulation de l'application graves traitées ainsi que de la mise en œuvre des pilotes expérimentaux ;
- Présentation de la mise en œuvre du chantier de Tourcoing application chaussée réservoir à base d'hydrocyls ainsi que des futurs chantier de Leers et de Bondues ;
- Description du suivi environnemental réalisé sur les ouvrages expérimentaux (chantier de Tourcoing) ;
- Présentation des premières actions de communication réalisées dans le cadre du projet : articles de presse, article sur le site sedilab.com, prise de parole lors d'événements professionnels, vidéos étapes du projet…

La figure ci-dessous fait la synthèse des éléments présentés lors du COPIL n°2 :

Figure 2 : Synthèse de présentation du COPIL n°2

5 Présentation des avancées – COPIL n°3

5.1 Pilotes expérimentaux

La mise en œuvre des pilotes expérimentaux, qui était en cours lors de la présentation du COPIL n°2, est terminée. Pour rappel, les pilotes se situent sur le site du bassin de la prévôté accessible par le chemin de l'aventure à Houplines. Un pilote témoin et un pilote expérimental ont été mis en œuvre. La grave traitée à base de sédiments (sédiments non inertes non dangereux de la MEL) présente un taux de substitution de 20 % de la fraction sableuse.

Figure 3 : Mise en œuvre des pilotes expérimentaux

5.2 Ouvrages expérimentaux

5.2.1 Chantier parking de la rue du Rhin – Tourcoing

Pour rappel, le premier chantier expérimental application « béton en modules de chaussée réservoir » a été mis en œuvre au cours du 2ème trimestre de l'année 2019 rue du Rhin à Tourcoing. Le marché public pour la réalisation de ce chantier a été remporté par la PME CREAPAV. Les hydrocyls ont été fournis par l'entreprise LIB. La réalisation de ce chantier s'est déroulée dans de très bonnes conditions.

La figure ci-dessous illustre la mise en œuvre du chantier :

Figure 4 : Mise en œuvre du chantier de Tourcoing

5.2.2 Chantier Centre-ville de Leers

Le second chantier expérimental application « béton en modules de chaussée réservoir » a été mis en œuvre en juillet 2019 au sein du centre-ville de Leers. Le marché public pour la réalisation de ce chantier a été remporté par l'entreprise COLAS. Les hydrocyls ont été fournis par l'entreprise LIB.

Retour d'expérience : Les hydrocyls de formulation 6 % présentent de meilleures performances que les hydrocyls de formulation 5 %. De plus, des problèmes de performances des hydrocyls produits (formulations témoin et sédiment) ont été observées lors de la mise en œuvre du chantier de Leers. Ces baisses de performances sont liées à un temps de prise du béton après fabrication insuffisant (28 jours minimum).

La figure ci-dessous illustre la mise en œuvre du chantier :

Figure 5 : Mise en œuvre du chantier de Leers

5.2.3 Chantier rue Prouvost – Bondues

Le troisième chantier expérimental application « coulis autocompactant » a été mis en œuvre en juillet 2019 rue Prouvost à Bondues. Le marché public pour la réalisation de ce chantier a été remporté par l'entreprise EUROVIA.

Retour d'expérience : Le coulis à base de sédiments livré est un peu plus fluide qu'un coulis classique. Néanmoins, cette différence n'est pas gênante, et facilite même la mise en œuvre du produit. En ce qui concerne la résistance mécanique du coulis-sédiments, celle-ci est légèrement plus faible qu'un coulis classique mais répond tout de même aux exigences requises pour l'application visée. La réalisation de ce chantier s'est donc déroulée dans de très bonnes conditions.

La figure ci-dessous illustre la mise en œuvre du chantier :

Figure 6 : Mise en œuvre du chantier de Bondues

5.2.4 Essais mécaniques complémentaires – CERIB et COLAS

Des essais mécaniques complémentaires pour l'application « béton en modules de chaussée réservoir » ont été réalisés par le CERIB. L'objectif de ces essais était de pouvoir comparer le comportement mécanique de chaussées réservoir reconstituées à l'échelle laboratoire et soumises à une charge représentative d'une roue de poids lourd. Ces essais ont été réalisés sur les hydrocyls de formulation 5 et 6 % de sédiments. Les résultats obtenus montrent que les deux structures ont un comportement comparable lors des cycles de chargement à 65 kN, charge représentative d'une charge routière.

La figure ci-dessous illustre le principe de l'essai :

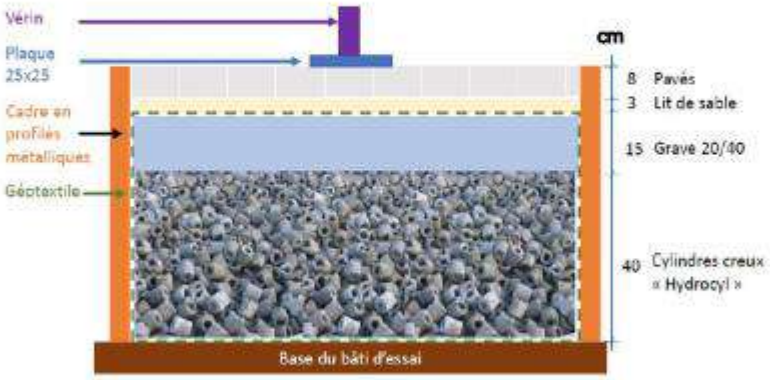


Figure 7 : Principe de l'essai de charge sur chaussée réservoir

De plus, des essais dynaplaque ont été réalisés par COLAS lors de la phase chantier sur les ouvrages témoin et à base de sédiments (formulation 5%) de Leers. Les résultats obtenus

pour les deux formulations mettent en évidence un comportement mécanique comparable entre les hydrocyls en béton classique et les hydrocyls à base de sédiments.

5.2.5 Suivi environnemental – Ouvrage de Tourcoing

Le suivi environnemental de l'ouvrage de Tourcoing a débuté début mai 2019. Ce suivi a pour objectif de vérifier l'innocuité environnementale de l'ouvrage à l'échelle 1. Les paramètres analysés sont les mêmes que ceux qui avaient été testés lors de la phase laboratoire du projet. Ces paramètres font référence à l'arrêté du 9 septembre 1997 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux ainsi qu'à l'arrêté du 2 février 1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau.

Métaux : As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sn, Zn
Carbone Organique Total (COT)
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)
Polychlorobiphényles (PCB)
Demande chimique en Oxygène (DCO)
Demande Biologique en Oxygène (DBO)
Matière en Suspension (MES)

Figure 8 : Paramètres analysés dans le cadre du suivi environnemental

Les premiers résultats d'analyses montrent des dépassements de seuils en matières en suspensions (MES) et en demande chimique en oxygène (DCO). Les dépassements en MES peuvent s'expliquer notamment par l'apport de particules et de poussières par les eaux de ruissellements. En ce qui concerne le dépassement en DCO, celui-ci peut s'expliquer par l'apport de pollen ou de feuille par les eaux de ruissellement. Ces dépassements sont observés sur le témoin ainsi que sur l'ouvrage expérimental.

5.2.6 Suivi environnemental – Ouvrage de Leers

Le suivi environnemental de l'ouvrage de Leers a débuté début octobre 2019. Les paramètres analysés sont les mêmes que ceux présentés précédemment. Les premiers résultats d'analyses montrent des dépassements en carbone organique total (COT), en MES et en demande biochimique en oxygène (DBO). Les dépassements en MES peuvent s'expliquer notamment par l'apport de particules et de poussières par les eaux de ruissellements. Pour ce qui est des dépassements en DBO et COT, ces derniers peuvent notamment être liés à l'état physique des hydrocyls mis en œuvre sur chantier (nombreux hydrocyls cassés = plus de surface de contact).

5.2.7 Suivi environnemental – Ouvrage de Bondues

Le suivi environnemental de l'ouvrage de Bondues a débuté début octobre 2019. Les paramètres analysés sont les mêmes que ceux présentés précédemment. Les premiers

résultats d'analyses montrent de faibles dépassements en MES. Comme pour les autres ouvrages, ces dépassements peuvent s'expliquer par l'apport de particules et de poussières par les eaux de ruissellements.

5.2.8 Suivi environnemental – Pilote grave traitée

Le suivi environnemental des pilotes localisés à Houplines a commencé début décembre 2019. A ce jour, les premiers résultats ne sont pas encore disponibles.

5.2.9 Suivi mécanique des ouvrages expérimentaux

Un suivi mécanique des ouvrages expérimentaux pour les applications coulis et hydrocyls sera réalisé afin d'évaluer le maintien des performances mécaniques des ouvrages au cours du temps. En ce qui concerne le coulis, seul un suivi visuel des ouvrages est prévu. Pour ce qui est des hydrocyls, les essais suivants devront être réalisés à différentes temporalités : porosité accessible à l'eau, réaction sulfatique externe, gel/dégel et résistance à la compression et à la traction.

5.3 Etude de recyclabilité

A l'issue des 12 mois de suivi environnemental des ouvrages, une étude de recyclabilité sera réalisée sur les hydrocyls et le coulis autocompactant. Pour se faire, des carottages seront réalisés sur l'ouvrage coulis. En ce qui concerne l'ouvrage chaussée réservoir, il ne sera pas possible d'y récupérer des hydrocyls. Un protocole de vieillissement des hydrocyls a donc été lancé sur des hydrocyls témoin et de formulation 5 et 6 % pour une durée maximale de 12 mois afin de simuler leur vieillissement naturel.

Figure 9 : Protocole de vieillissement des hydrocyls - alternance immersion/séchage

A l'issue des 12 mois, des essais de lixiviation seront réalisés sur des échantillons de coulis et d'hydrocyls concassés afin de déterminer la typologie de déchet (inerte / non inerte). Par la suite, afin d'évaluer le potentiel de recyclabilité de ces deux produits, des caractérisations des matériaux seront réalisées selon le CDC remblai pour le coulis et selon le CDC remblai et couche de forme pour les hydrocyls.

5.4 Communication

La communication dans le cadre du projet est assurée par le CD2E. Dans la continuité des premières actions réalisées et présentées lors du COPIL n°2, les nouvelles actions de communication mises en œuvre par le CD2E sont les suivantes :

- Réalisation de 3 nouvelles vidéos illustrant la mise en œuvre des trois chantiers expérimentaux (Tourcoing, Leers et Bondues) + 1 vidéo synthèse du projet ;
- Publication de nouveaux articles web relatifs notamment aux chantiers sur le site sedilab.com ;
- Création d'une affiche présentant les différents chantiers et applications exposée lors des Assises Nationale de la valorisation des sédiments ;
- Prise de parole lors d'événements professionnels : Assises Nationale de la valorisation des sédiments ;
- Publication d'articles par La Voix du Nord, La Chronique du BTP et Le Moniteur ;
- Publications sur LinkedIn.

5.5 Suivi des livrables

Phase du projet		Livrable	Disponibilités des livrables
Caractérisation des sédiments		• Rapport de caractérisation • Fiche sédiment	Disponible au copil N°1 du 12/12/2018
Etude de formulation « Grave traitée »		• Rapport d'étude de formulation de la grave traitée	Disponible au copil n°2 du 07/06/2019
Pilotes expérimentaux pour l'application « Grave traitée »	Réalisation des pilotes expérimentaux	• Fiches pilotes expérimentaux • Rapport et plan de conception des pilotes expérimentaux • Rapport du protocole et du suivi environnemental et mécanique	-
	Suivis des pilotes expérimentaux		
Ouvrages expérimentaux pour les applications coulis et hydrocyls	Rédaction des cahiers des clauses techniques particulières spécifiques aux ouvrages expérimentaux	• Fiches ouvrages expérimentaux • Rapport du protocole de suivi environnemental et mécanique des ouvrages expérimentaux • Rapport avec des illustrations photographiques des étapes de la fabrication et de la mise en œuvre des ouvrages expérimentaux	Rapports du contenu des cctp spécifique à l'expérimentation SEDIMATERIAUX_ Disponibles au copil N°1 du 12/12/2018
	Réalisation des 3 ouvrages expérimentaux		-
	Suivi de la réalisation des ouvrages expérimentaux		-

	Suivis environnementaux et mécaniques des ouvrages expérimentaux	• Rapport du suivi environnemental et mécanique des 3 ouvrages expérimentaux	-
Etude du potentiel de recyclabilité des produits		Rapport de l'étude du potentiel de recyclabilité des produits	Disponible au copil n° 3 du 11/12/2019 Protocole d'étude de recyclabilité des produits
Analyse des conditions de mise sur le marché		Rapport de l'analyse des conditions de mise sur le marché	_
Communication		• Présentation synthétique des phases et des résultats pour les actions de communication (conférence régionale, colloque nationale et internationale)	Disponible au copil n°3 du 11/12/2019 • Articles de presse • Articles web • 5 vidéos (fabrication des hydrocyls, chantiers et vidéo synthèse)

5.6 Prochaines échéances du projet

Les prochaines échéances à présenter pour le COPIL N°4 sont les suivantes :

- Avancées des suivis environnementaux des ouvrages expérimentaux hydrocyls et coulis ;
- Suivi mécanique des ouvrages expérimentaux ;
- Suivi environnemental et mécanique des pilotes sur 12 mois ;
- Mise en application du protocole de recyclabilité ;
- Analyse des conditions de mise sur le marché.

Le COPIL n°4 sera organisé en juin 2020.

Annexe 16 : Compte-rendu du Copil n°4

PROJET SEDIMEL 1

COPIL n°4 – Lundi 14 Décembre 2020

Intitulé du projet : Pilotes expérimentaux pour l'application « grave traitée » et ouvrages expérimentaux pour les applications « coulis autocompactant » et « béton en modules de chaussée réservoir (hydrocyls) »

Participants		
Nom	**Structure**	**Fonction**
Salah BOUSSADA	MEL Voirie	Chargé de mission voirie
Frédéric DECOSTER	MEL - EPCO	Chef de service adjoint
François FIEMS	?	?
Frédéric KONINCK	?	?
Nicolas PRUD'HOMME	MEL Direction Eau et Assainissement	Chef de projet
Patrice MAUREL	Conseil Régional Hauts-de-France	Responsable de projets
Marion DELPLANQUE	VNF	Chargée de Mission
Amine KADIRI	NEO-ECO	Responsable Pôle Economie Circulaire
Pauline POIRE	NEO-ECO	Chef de projet Economie Circulaire
Solène ROLLET	NEO-ECO	Chef de projet Economie Circulaire
Brenda OMAÑA SANZ	NEO-ECO	Chef de projet Economie Circulaire

1 Rappel du projet

1.1 Phase laboratoire (2013 – 2015)

Le projet SEDIMEL 1, portant sur la valorisation des sédiments de la MEL, est réalisé selon la démarche SEDIMATERIAUX. Cette démarche, ayant pour ambition d'apporter une réponse adaptée et dimensionnée à la problématique de gestion et de valorisation terrestre des sédiments de dragage, se décompose en 3 phases : une phase de caractérisation des sédiments, une phase d'étude à l'échelle laboratoire et une phase d'étude à l'échelle terrain.

Entre 2013 et 2015, la phase d'étude à l'échelle laboratoire a été réalisée par la MEL en partenariat avec NEO-ECO et l'IMT Lille-Douai. L'objectif de cette phase du projet était de substituer des matières granulaires « nobles » utilisées dans les coulis et les bétons de chaussée réservoir (hydrocyls) tout en maintenant des caractéristiques mécaniques fonctionnelles et environnementales acceptables. Les résultats de cette étude ont permis de démontrer la faisabilité technique et environnementale de l'utilisation en proportion non négligeable de sédiments dans les filières envisagées. Cette étude a notamment permis de définir les conditions de préparation des sédiments ainsi que les taux de substitution maximum envisageables :

- Criblage et séchage préalable des sédiments nécessaire ;
- Utilisation jusqu'à 20 % de sédiments dans la formule de coulis ;
- Utilisation jusqu'à 15 % de sédiments en substitution du sable dans la formule de béton en modules de chaussée réservoir.

1.2 Présentation générale du projet SEDIMEL 1

Suite aux résultats concluants de l'étude à l'échelle laboratoire, la MEL s'est lancée dans la phase terrain de réalisation d'ouvrages expérimentaux à base de sédiments. Pour cette phase terrain, 3 ouvrages expérimentaux ont été mis en œuvre sur la métropole de Lille :

- Deux de ces ouvrages sont consacrés à l'application « béton en modules de chaussée réservoir ». Ces ouvrages sont différents en termes d'utilisation finale, de sollicitation et de taux de sédiments incorporés dans les formulations.

- Un ouvrage est consacré à l'application « coulis autocompactant ».

En complément de ces ouvrages, la MEL a également souhaité développer des formulations de graves traitées à base de sédiments. Dans ce cadre, suite à des études de formulation réalisées à l'échelle laboratoire, des pilotes expérimentaux ont été réalisés afin de tester à plus grande échelle cette application.

2 Rappel des phases du projet

Phases du projet		MEL – Porteur	NEO-ECO	IMT Lille-Douai
Caractérisation des sédiments			X	X
Etude de formulation « Grave traitée »				X
Pilotes expérimentaux pour l'application « Grave traitée »	Réalisation des pilotes expérimentaux		X	
	Suivis des pilotes expérimentaux		X	
Ouvrages expérimentaux pour les applications coulis et hydrocyls	Rédaction des cahiers des clauses techniques particulières spécifiques aux ouvrages expérimentaux		X	
	Réalisation des 3 ouvrages expérimentaux	X		
	Suivi de la réalisation des ouvrages expérimentaux		X	
	Suivis environnementaux et mécaniques des ouvrages expérimentaux		X	
Etude du potentiel de recyclabilité des produits			X	
Analyse des conditions de mise sur le marché			X	
Communication			X	

Tableau 1 : Phasage du projet

3 Rappel des avancées présentées en COPIL n°1

Le COPIL n°1, tenu en décembre 2018, a permis la présentation des avancées et des éléments suivants :

- Identification, préparation et caractérisation des sédiments ;
- Présentation des études de formulation réalisées pour l'application graves traitées ainsi que du protocole de conception des pilotes expérimentaux ;
- Présentation des futurs ouvrages expérimentaux et traitement des aspects CCTP et consultations des entreprises.

La figure ci-dessous fait la synthèse des éléments présentés lors du COPIL n°1 :

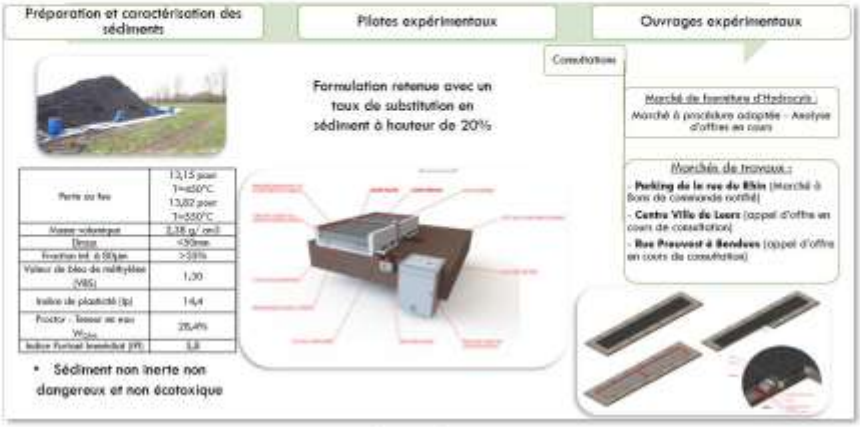


Figure 1 : Synthèse de présentation du COPIL n°1

4 Rappel des avancées présentées en COPIL n°2

Le COPIL n°2, tenu en juin 2019, a permis la présentation des avancées et des éléments suivants :

- Présentation de résultats complémentaires vis-à-vis de l'étude de formulation de l'application graves traitées ainsi que de la mise en œuvre des pilotes expérimentaux ;
- Présentation de la mise en œuvre du chantier de Tourcoing application chaussée réservoir à base d'hydrocyls ainsi que des futurs chantier de Leers et de Bondues ;
- Description du suivi environnemental réalisé sur les ouvrages expérimentaux (chantier de Tourcoing) ;
- Présentation des premières actions de communication réalisées dans le cadre du projet : articles de presse, article sur le site sedilab.com, prise de parole lors d'événements professionnels, vidéos étapes du projet…

La figure ci-dessous fait la synthèse des éléments présentés lors du COPIL n°2 :

Figure 2 : Synthèse de présentation du COPIL n°2

5 Rappel des avancées présentées en COPIL n°3

Le COPIL n°3, tenu en décembre 2019, a permis la présentation des avancées et des éléments suivants :

- Bilan et retour d'expérience sur la mise en œuvre des pilotes et ouvrages expérimentaux ;
- Présentation des résultats des essais mécaniques réalisés sur chaussées réservoirs par le CERIB à l'échelle laboratoire (comparaison des hydrocyls de formulation 5 et 6 %) et par COLAS à l'échelle terrain (ouvrage de Leers) ;
- Présentation des premiers résultats du suivi environnemental et description du suivi mécanique à réaliser sur les ouvrages expérimentaux ;
- Présentation du protocole de recyclabilité (sur coulis autocompactant et hydrocyls) ;
- Présentation de l'ensemble des actions de communications menées dans le cadre du projet : articles de presse, article sur le site sedilab.com, prise de parole lors d'événements professionnels, photos et vidéos du projet, communication sur les réseaux sociaux (LinkedIn).

Les figures ci-dessous font la synthèse des éléments présentés lors du COPIL n°3 :

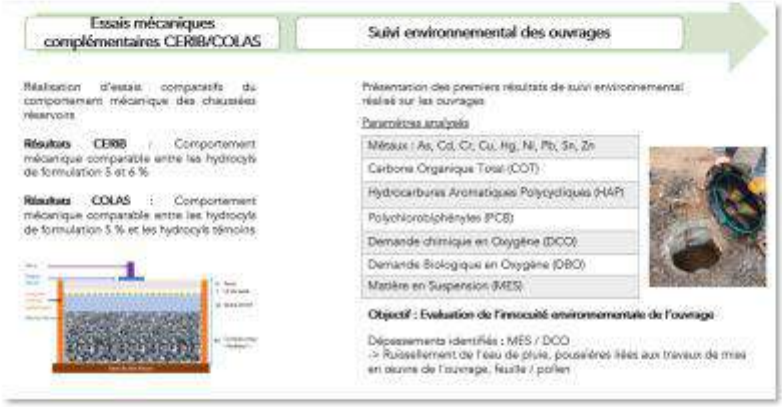


Figure 3 : Synthèse de présentation du COPIL n°3

6 Présentation des avancées – COPIL n°4

6.1 Suivi environnemental et mécanique

6.1.1 Suivi environnemental – Ouvrage de Tourcoing

Le suivi environnemental de l'ouvrage de Tourcoing a débuté en mai 2019 et s'est achevé en avril 2020. Ce suivi avait pour objectif de vérifier l'innocuité environnementale de l'ouvrage à l'échelle 1. Les paramètres analysés sont les mêmes que ceux qui avaient été testés lors de la phase laboratoire du projet. Les résultats ont été comparés aux seuils de l'arrêté du 15 février 2016 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux – Annexe 1 ainsi qu'aux seuils R1/R2 de l'arrêté du 9 août 2006 relatif aux niveaux à prendre en compte lors d'une analyse de rejets dans les eaux de surface.

Paramètre	Unité	Seuils Projet MEL (*)	Semaine 3		Semaine 8	
			Témoin	Exp	Témoin	Exp
DCO	mg/l	300	30	180	485	200
Matières en suspension (<2mg/l)	mg/l	100	130	1000	880	120

Tableau 2 : Comparaison des résultats d'analyse aux seuils de l'arrêté du 15/02/16

Les résultats d'analyses montrent des dépassements en matières en suspensions (MES) et en demande chimique en oxygène (DCO) uniquement pour les semaines 3 et 8. Les dépassements en MES peuvent s'expliquer notamment par l'apport de particules et de poussières par les eaux de ruissellements. En ce qui concerne le dépassement en DCO, celui-ci peut s'expliquer par l'apport de pollen ou de feuille par les eaux de ruissellement. Ces dépassements sont observés sur le témoin ainsi que sur l'ouvrage expérimental. Concernant la comparaison des résultats aux seuils R1/R2, une étape de conversion des données a été nécessaire afin d'obtenir le rejet journalier de l'ouvrage. Les résultats obtenus par calcul sont largement inférieurs aux seuils de l'arrêté. D'après l'ensemble de ces données, **l'innocuité environnementale de l'ouvrage de Tourcoing est validée**.

6.1.2 Suivi environnemental – Ouvrage de Leers

Le suivi environnemental de l'ouvrage de Leers a débuté en octobre 2019 et s'est achevé en septembre 2020. Les paramètres analysés sont les mêmes que ceux présentés précédemment.

Paramètre	Unité	Seuils Projet MEL (*)	Semaine 1		Semaine 2		Semaine 3		Semaine 6		Semaine 39	
			Témoin	Exp	Témoin	Exp	Témoin	Exp	Témoin	Exp	Témoin	Exp
COT	mg/l	70	19	79	21	92	9,1	67	9,9	43	22	43
DBO (5 jours)	mg/l	100	11	94	13	106	5,4	59	4,4	10	< 3	51
Matières en suspension (<2mg/l)	mg/l	100	100	200	130	62	63	150	120	100	7,4	180

Tableau 3 : Comparaison des résultats d'analyse aux seuils de l'arrêté du 15/02/16

Les résultats d'analyses montrent des dépassements en carbone organique total (COT), en MES et en demande biochimique en oxygène (DBO). Les dépassements en MES peuvent s'expliquer par l'apport de particules et de poussières par les eaux de ruissellements. Ces dépassements sont observés sur le témoin ainsi que sur l'ouvrage expérimental. Pour ce qui

est des dépassements en DBO et COT, ces derniers peuvent notamment être liés à l'état physique des hydrocyls mis en œuvre sur chantier (nombreux hydrocyls cassés = plus de surface de contact). Ces dépassements sont observés sur l'ouvrage expérimental uniquement. Concernant la comparaison des résultats aux seuils R1/R2, une étape de conversion des données a été nécessaire afin d'obtenir le rejet journalier de l'ouvrage. Les résultats obtenus par calcul sont largement inférieurs aux seuils de l'arrêté. D'après l'ensemble de ces données, **l'innocuité environnementale de l'ouvrage de Leers est validée**.

6.1.3 Suivi environnemental – Ouvrage de Bondues

Le suivi environnemental de l'ouvrage de Bondues a débuté en octobre 2019 et s'est achevé en septembre 2020. Les paramètres analysés sont les mêmes que ceux présentés précédemment.

Seuil	Unité	Seuils Projet MEL (*)	Semaine 2	
			Témoin	Exp
COT	mg/l	70	5,5	6,1
DBO (5 jours)	mg/l	100	<3	<3
DCO	mg/l	300	<25	<25
Matières en suspension (<2mg/l)	mg/l	100	30	110

Tableau 4 : Comparaison des résultats d'analyse aux seuils de l'arrêté du 15/02/16

Les résultats d'analyses montrent de faibles dépassements en MES uniquement pour la semaine 2. Comme pour les autres ouvrages, ces dépassements peuvent s'expliquer par l'apport de particules et de poussières par les eaux de ruissellements. D'après ces résultats, **l'innocuité environnementale de l'ouvrage de Bondues est validée**.

6.1.4 Suivi environnemental – Pilotes grave traitée

Le suivi environnemental des pilotes localisés à Houplines a débuté en décembre 2019 et s'est achevé en novembre 2020. Les paramètres analysés sont les mêmes que ceux présentés précédemment.

Seuil	Unité	Seuils	Semaine 1		Semaine 3		Semaine 4		Semaine 6		Semaine 8		Semaine 39	
		Projet MEL (*)	Témoin	Exp	Témoin	Exp	Témoin	Exp	Témoin	Exp	Témoin	Exp	Témoin	Exp
COT	mg/l	70	8	120	4,6	85	3,6	78	3,8	100	4,6	120	4,9	31
Somme des métaux	µg/l	15 000	328	2 449	145	1 768	130	1 605	86	2 002	53	2 229	56	494
DBO (5 jours)	mg/l	100	10	288	3,7	115	< 3	< 3	< 3	132	< 3	179	< 3	3
DCO	mg/l	300	34	380	< 25	245	< 25	210	< 25	270	< 25	320	< 25	83
Matières en suspension (<2mg/l)	mg/l	100	53	17	70	36	29	15	27	12	10	32	16	190

Tableau 5 : Comparaison des résultats d'analyse aux seuils de l'arrêté du 15/02/16

Les résultats d'analyses montrent des dépassements en COT, DBO, DCO et MES uniquement sur le pilote expérimental. De plus, un relargage en métaux sur éluât (particulièrement le cuivre) important du pilot expérimental en comparaison à l'ouvrage témoin est observé sur

tous les prélèvements. D'après ces résultats, **l'innocuité environnementale des pilotes n'est pas validée et une optimisation de la formulation est recommandée**.

6.1.5 Suivi mécanique des ouvrages expérimentaux

Un suivi mécanique des ouvrages expérimentaux est nécessaire pour évaluer le maintien des performances mécaniques des ouvrages. Concernant le coulis autocompactant, un suivi visuel de l'ouvrage a été réalisé, et aucune dégradation n'a été observée au cours des 12 mois de suivi. Pour ce qui est des hydrocyls, le prélèvement des matériaux n'étant pas réalisable au sein des ouvrages en place, un protocole de vieillissement sur une période de 12 mois a été réalisé à l'échelle laboratoire (alternance d'immersion/séchage) en vue de simuler le vieillissement des matériaux. Afin de tester l'évolution des performances mécaniques des hydrocyls, les essais suivants ont été lancés :

Echéances	Essais
3 / 6 / 12 mois de vieillissement	Porosité accessible à l'eau
	Réaction sulfatique externe
	Gel / dégel
	Résistance à la compression et à la traction

Tableau 6 : Cahier des charges de l'étude de durabilité

Les résultats de ces essais sont attendus pour début d'année 2021.

6.2 Etude de recyclabilité

A l'issue des 12 mois de suivi environnemental des ouvrages, une étude de recyclabilité a été lancée sur les hydrocyls et le coulis autocompactant. L'objectif de cette étude est d'évaluer le potentiel de recyclabilité des produits formulés à base de sédiments dans une optique d'économie circulaire.

Pour ce faire, des échantillons de coulis (témoin et sédiments) ainsi que des hydrocyls soumis au protocole de vieillissement (témoin, 5% et 6% de sédiments) ont été envoyés en laboratoire pour être testés selon les cahiers des charges remblai et couche de forme :

Essais	Normes
CDC remblai – coulis autocompactant	
Granularité	NF P 94-056
Sulfates solubles dans l'eau	NF EN 1744-1, art. 10.2
Lixiviation	NF EN 1744-3
CDC remblai et couche de forme - hydrocyls	
Granularité	NF P 94-056
Sulfates solubles dans l'eau	NF EN 1744-1, art. 10.2
Lixiviation	NF EN 1744-3
Propreté VBS	NF P 94-068
Los Angeles	NF EN 1097-2
Micro-Deval	NF EN 1097-1

Tableau 7 : Cahier des charges de l'étude de recyclabilité

Les résultats de ces essais sont attendus pour début d'année 2021.

6.3 Analyse des conditions de mise sur le marché

6.3.1 Cadre règlementaire et normatif

Pour chaque application, une étude du cadre réglementaire et normatif a été réalisée afin d'identifier les potentiels freins et contraintes à l'incorporation de sédiments dans les produits.

Cylindres creux en béton préfabriqué – hydrocyls

Concernant les hydrocyls, ces produits ne relèvent d'aucune norme produit et ne font pas l'objet d'un avis technique. Il n'y a donc aucune exigence vis-à-vis des matières premières employées pour la fabrication de ces matériaux, tant que les exigences liées au produit final sont respectées (masse / forme / performance mécanique). Dans le fascicule 70 du CCTG-travaux, titre II, il est indiqué que « *Les matériaux et produits qui ne sont pas couverts par une norme et qui ne font pas l'objet d'un avis technique doivent être agréés par le MOE qui établira les conditions de réception à appliquer.* ». L'emploi et les conditions de réception des hydrocyls relèvent donc de la responsabilité du MOE.

Coulis autocompactant ou béton autoplaçant (BAP)

Pour ce qui est du coulis autocompactant, ce produit ne relève pas d'une norme produit. Néanmoins, les matériaux et la fiche produit du fabricant doivent être conformes aux prescriptions du dossier CERTU. Cette exigence est mentionnée dans la norme NF P98-331, norme elle-même mentionnée pour le choix des matériaux utilisables pour la réalisation de remblai dans le fascicule 70 du CCTG-travaux titre I. Dans le document du CERTU, aucune exigence n'est faite vis-à-vis des matières premières employées pour la fabrication des matériaux autocompactants, seules des exigences vis-à-vis du produit à l'état frais et à l'état durci après 28 jours sont mentionnées.

Grave traitée au liant hydraulique

De nombreuses normes donnent des spécifications vis-à-vis des constituants, des formulations et de la mise en œuvre des mélanges traités aux liants hydrauliques : série des normes NF EN 14227-1 à 5, norme NF P98-115… Dans ces normes, il y est indiqué que les granulats entrant dans la composition des mélanges granulaires traités aux liants hydrauliques doivent être définis par les normes NF EN 13242+A1 et NF P18-545. Les sédiments n'entrent pas dans le champs de définition de ces normes.

Néanmoins, l'utilisation de matériaux hors champs d'application des normes est possible si le produit final respecte les performances mécaniques attendues. Ce paramètre doit être déterminé par des essais laboratoires. Cette pratique semble relativement courante pour ce type de travaux et est généralement proposée sous forme de variante dans les réponses aux appels d'offre.

6.3.2 Statut de déchet

Lorsque les sédiments sont extraits de la voie d'eau, ils acquièrent un statut de déchet et doivent être gérés comme tel en fonction de leur caractère dangereux – non dangereux et inerte – non inerte. Néanmoins, les sédiments peuvent faire l'objet d'une sortie du statut de

déchet. Cette possibilité est prévue par la Directive Cadre Déchet 2008/98/CE du 19 novembre 2008, et transposée dans le code de l'environnement à l'article L. 541-4-3.

Selon l'avis du ministère de l'Ecologie, publié au Journal Officiel du 13 janvier 2016, la sortie du statut de déchet est envisageable selon deux cas de figure : sortie explicite et sortie implicite du statut de déchet.

Concernant la sortie explicite du statut de déchet, le ministère de la transition écologique et solidaire a ouvert en mai 2019 une consultation publique vis-à-vis d'un projet d'arrêté fixant les critères de sortie du statut de déchet pour les terres excavées et sédiments ayant fait l'objet d'une préparation en vue d'une utilisation en génie civil ou en aménagement. Dans le contexte actuel (Grand Paris Express, Canal Seine Nord Europe…), ce projet d'arrêté pourrait se concrétiser dans les prochains mois.

Concernant le projet SEDIMEL, le second cas de figure s'applique : sortie implicite du statut de déchet. Pour permettre cette sortie implicite du statut de déchet, les conditions suivantes doivent être démontrées :

- Déchets utilisés en substitution de matières premières d'origine extractive ;
- Les substances, mélanges, articles ou assemblages d'articles produits par l'installation doivent **respecter les dispositions des règlements REACH et CLP** ;
- S'il s'agit de substances et des mélange, ils doivent **être similaires** à la substance ou au mélange qui aurait été produit sans avoir recours à des déchets ;
- Les substances, mélanges, articles ou assemblages d'articles doivent avoir été produits dans une « **installations de production** », et plus précisément dans une installation inscrite à la nomenclature des ICPE (qu'elles soient soumises à un régime d'autorisation, d'enregistrement ou de déclaration ou non) et dont l'intitulé de la rubrique comprend les termes exacts « production de… », « fabrication de… », « préparation de… », « élaboration de… » ou « transformation de… »[1].

[1] *Cette condition est issue d'une surtransposition de la Directive Déchets et n'est pas exigée par la jurisprudence européenne qui consacre la possibilité de SSD implicite. Elle a donc été supprimée de l'article L. 541-4-3 du code de l'environnement, par la loi n°2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire (dite AGEC). En principe, elle ne peut donc plus être exigée par l'administration. Néanmoins, l'avis ministériel du 13 janvier 2016 étant toujours en vigueur et n'ayant pas été abrogé ou révisé à la suite de la loi AGEC, les administrations peuvent continuer à s'y référer pour exiger le passage par une ICPE de production. A noter qu'en cas de litige avec l'administration sur ce point, les installations n'étant pas des ICPE de production pourront contester cette condition devant le juge administratif.*

Cylindres creux en béton préfabriqué – hydrocyls

Condition	Conformité
Déchet utilisé en substitution de matières premières d'origine extractive	Substitution de la fraction sableuse par des sédiments à hauteur de 5 à 6 % de la composition globale des hydrocyls
Respect des disposition des règlements REACH et CLP	• C'est au producteur des produits finis de s'en assurer • MEL : fournisseur de déchets, soumis à la règlementation déchet (REACH non applicable aux déchets)
Produit à base de déchets similaire à un produit classique	• Innocuité environnementale validée à l'échelle laboratoire et à l'échelle terrain • Produits formulés répondant aux exigences minimales requises en termes de performances techniques
Fabrication en installation ICPE éligible	2522. Installation de fabrication de produits en béton par procédé mécanique

Tableau 8 : Sortie implicite du statut de déchet - application hydrocyls

Coulis autocompactant ou béton autoplaçant (BAP)

Condition	Conformité
Déchet utilisé en substitution de matières premières d'origine extractive	Substitution de la fraction sableuse par des sédiments à hauteur de 20 %
Respect des disposition des règlements REACH et CLP	• C'est au producteur des produits finis de s'en assurer • MEL : fournisseur de déchets, soumis à la règlementation déchet (REACH non applicable aux déchets)
Produit à base de déchets similaire à un produit classique	• Innocuité environnementale validée à l'échelle laboratoire et à l'échelle terrain • Produits formulés répondant aux exigences minimales requises en termes de performances techniques
Fabrication en installation ICPE éligible	2518. Installation de production de béton prêt à l'emploi équipée d'un dispositif d'alimentation en liants hydrauliques mécanisé, à l'exclusion des installations visées par la rubrique 2522.

Tableau 9 : Sortie implicite du statut de déchet - application coulis autocompactant

Grave traitée au liant hydraulique

Condition	Conformité
Déchet utilisé en substitution de matières premières d'origine extractive	Substitution de la fraction sableuse par des sédiments à hauteur de 10 %
Respect des disposition des règlements REACH et CLP	• C'est au producteur des produits finis de s'en assurer • MEL : fournisseur de déchets, soumis à la règlementation déchet (REACH non applicable aux déchets)
Produit à base de déchets similaire à un produit classique	**Formulation à optimiser vis-à-vis du critère environnemental**
Fabrication en installation ICPE éligible	2515. Installation de broyage, concassage, criblage, ensachage, pulvérisation, nettoyage, tamisage, mélange de pierres, cailloux, minerais et autres produits minéraux naturels ou artificiels ou de déchets non dangereux inertes.

Tableau 10 : Sortie implicite du statut de déchet - application grave traitée

6.3.3 Volet économique

L'objectif de l'étude économique est d'évaluer la faisabilité économique de la valorisation des sédiments dans les différentes applications testées.

Pour ce faire, plusieurs scénarios ont été considérés, prenant en compte aussi bien l'intérêt économique du producteur de sédiments (MEL) que l'intérêt économique du fabricant :

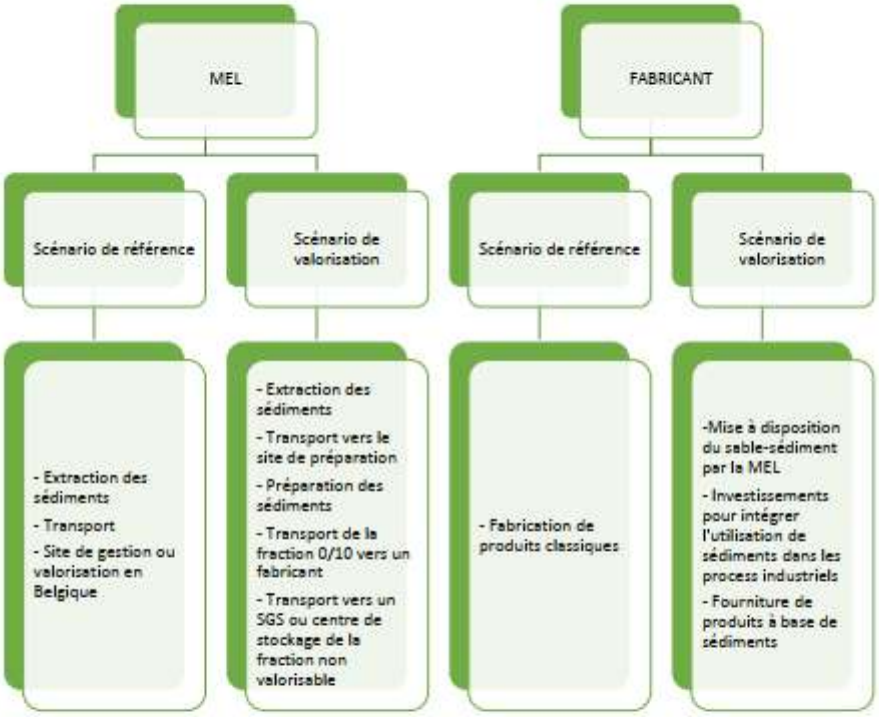


Tableau 11 : Scénarios de l'étude économique

6.4 Suivi des livrables

Phase du projet		Livrable	Disponibilités des livrables
Caractérisation des sédiments		• Rapport de caractérisation • Fiche sédiment	Disponible au copil N°1 du 12/12/2018
Etude de formulation « Grave traitée »		• Rapport d'étude de formulation de la grave traitée	Disponible au copil N°2 du 07/06/2019
Pilotes expérimentaux pour l'application « Grave traitée »	Réalisation des pilotes expérimentaux	• Fiches pilotes expérimentaux • Rapport et plan de conception des pilotes expérimentaux	-
	Suivis des pilotes expérimentaux		

		• Rapport du protocole et du suivi environnemental et mécanique	
Ouvrages expérimentaux pour les applications coulis et hydrocyls	Rédaction des cahiers des clauses techniques particulières spécifiques aux ouvrages expérimentaux	• Fiches ouvrages expérimentaux • Rapport du protocole de suivi environnemental et mécanique des ouvrages expérimentaux • Rapport avec des illustrations photographiques des étapes de la fabrication et de la mise en œuvre des ouvrages expérimentaux • Rapport du suivi environnemental et mécanique des 3 ouvrages expérimentaux	Rapports du contenu des cctp spécifique à l'expérimentation SEDIMATERIAUX_ Disponibles au copil N°1 du 12/12/2018
	Réalisation des 3 ouvrages expérimentaux		-
	Suivi de la réalisation des ouvrages expérimentaux		-
	Suivis environnementaux et mécaniques des ouvrages expérimentaux		-
Etude du potentiel de recyclabilité des produits		Rapport de l'étude du potentiel de recyclabilité des produits	Disponible au copil n° 3 du 11/12/2019 Protocole d'étude de recyclabilité des produits
Analyse des conditions de mise sur le marché		Rapport de l'analyse des conditions de mise sur le marché	-
Communication		Présentation synthétique des phases et des résultats pour les actions de communication (conférence régionale, colloque nationale et internationale)	Disponible au copil n°3 du 11/12/2019 • Articles de presse • Articles web • 5 vidéos (fabrication des hydrocyls, chantiers et vidéo synthèse)

6.5 Prochaines échéances du projet

Les prochains éléments à présenter pour le COPIL N°5 sont les suivants :

- Finalisation du suivi mécanique des ouvrages (essais de durabilité sur les hydrocyls) ;
- Finalisation de l'étude de recyclabilité sur les hydrocyls et les coulis ;
- Finalisation de l'analyse des conditions de mise sur le marché (volet économique) ;

Le COPIL n°5 sera organisé en mars 2021.