

# Méthodologie de caractérisation et de valorisation des sédiments marins en technique routière

ACHOUR Raouf, ABRIAK Nor-Edine & ZENTAR Rachid  
*Département de génie civil, Mines Douai, Douai, France.*

RIVARD Patrice

*Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada.*

GREGOIRE Pascal

*Grand Port maritime de Dunkerque, Dunkerque, France.*



*Challenges from North to South  
Des défis du Nord au Sud*

## ABSTRACT

The valorization of non-submersible marine sediments of the harbour of Dunkirk (Grand Port Maritime de Dunkerque, GPMD) as a new aggregate presents alternative solutions for a better management in the field of civil engineering. This study focus on the valorization study of marine sediment in road engineering (laboratory and *in situ*).

The objective of the study is to demonstrate the feasibility of valorisation of marine sediments in road building. This study aims at proposing a methodology of valorisation based on valuation parameters, physical, chemical and mechanical alternative materials made from dredged sediment.

The valorisation of marine sediment in foundation layer is considered and it is proposed a mixture of 1/3 of marine sediment and 2/3 of dredged sand, the mixture treated with lime and an hydraulic binder. Another objective of this laboratory work is to predict the mechanical behavior and the environmental aspect of the proposed mix design based on non-submersible sediment on short and long terms.

The study was conducted in two phases. The first phase took place in the laboratory to discover the behavior of sediment introduced into the road formulation and evaluation of these mechanical and environmental performance in order to prove the possibility of use in road building. The second phase is to apply the mix design in the laboratory to the field by performing a first experimental road in France at Freycinet 12 to Dunkirk. A study of the mechanical behavior and environmental monitoring is carried out on cores taken at 60 and 360 days.

## RÉSUMÉ

La valorisation des sédiments marins non-immérgeables du Grand Port Maritime de Dunkerque comme un nouveau granulats présente une solution alternative pour une meilleure gestion dans le domaine de génie civil. Ce article se focalise sur l'étude de valorisation de sédiment marin en technique routière (étude en laboratoire et *in situ*).

L'objectif est de démontrer la faisabilité de la valorisation des sédiments marins en technique routière. Cette étude vise à proposer une méthodologie de valorisation sur la base d'évaluation de paramètres, physiques, chimiques et mécaniques des matériaux alternatifs élaborés à partir de sédiment de dragage.

Dans cette étude, une valorisation des sédiments marins en couche de fondation est envisagée. Nous proposons l'étude d'un mélange d'un 1/3 de sédiments marins et 2/3 de sable de dragage traité à la chaux vive et au liant hydraulique. Un second objectif de ce travail en laboratoire consiste à prévoir le comportement mécanique et l'aspect environnemental de la formulation proposée à base des sédiments non-immérgeable à court et à long terme.

L'étude de valorisation s'est déroulée en deux phases. La première phase a été réalisée en laboratoire afin d'analyser le comportement des sédiments introduit dans la formulation routière et d'évaluer ses performances mécaniques et environnementales afin de prouver la possibilité d'utilisation en technique routière. La deuxième phase a consisté à appliquer la formulation étudiée en laboratoire sur le terrain en réalisant une première route expérimentale en France au Freycinet 12 à Dunkerque. Une étude du comportement mécanique et un suivi environnemental ont été effectués sur des carottes prélevés à 60 et 360 jours.

## 1 INTRODUCTION

Situé sur la Mer du Nord, à 40 km de Douvres, côté britannique, et à 10 km de la frontière belge, le Grand Port Maritime de Dunkerque (GPMD) est un port côtier de haute mer très proche du rail de séparation des trafics qui franchissent le détroit du Pas de Calais sur la route maritime la plus fréquentée du monde avec pas moins de 600 navires par jour. De fait, l'ensemble des infrastructures portuaires nécessite des dragages d'entretien de fréquence plus ou moins rapprochée pour restaurer les tirants d'eau indispensables à la navigation,

à la sécurité et, au bon fonctionnement du port. Dans ce cadre, le GPMD est engagé à des opérations de dragage et d'élimination des sédiments qui conduisent à l'extraction de plusieurs millions de m<sup>3</sup> de sédiments annuellement. Ce sont 6,3 millions de m<sup>3</sup> par an, qui devront être dragués, dont 500 000 m<sup>3</sup> ne sont pas immergeables.

Depuis près de dix ans, ces sédiments, considérés jusqu'alors comme déchets, ont alimenté plusieurs filières de valorisation. Ce processus de valorisation réunit un avantage économique et un enjeu environnemental. En effet, ce matériau n'est plus stocké ou mis en décharge

mais peut être ainsi utilisé comme matériau de substitution. De plus, son dragage s'inscrit dans un contexte d'écologie industrielle.

En France, la consommation des granulats représente 376 millions de tonnes provenant essentiellement de gisements terrestres [UNPG, 2009]. Devant les difficultés croissantes d'accès aux gisements terrestres, les producteurs de granulats ont diversifiés leurs ressources, notamment par les granulats marins (sables et sédiments marins). Ces matériaux extraits en mer possèdent des caractéristiques semblables à celles des granulats de roches meubles extraits des carrières terrestres. Ils sont donc une ressource complémentaire.

Face à cette problématique, des filières de valorisation en génie civil ont été développées, exemple: en technique routière [Dubois, 2006; Tran, 2009 ; Dubois et al. 2009; Zentar et al. 2009; Miraoui, 2010; Dia, 2013], en granulats [Brakni, 2008] et fabrication de briques [Mezencevova et al. 2012 ; Hamer et al. 2002]. Ces voies de valorisations peuvent réduire le recours aux granulats naturels. La démarche de valorisation permet de répondre aux multiples enjeux de développement durable.

Les travaux de recherche menés dans cette étude s'insèrent dans le cadre du projet de recherche « SEDIMATERIAUX ». Ce projet vise à faire émerger des filières de gestion à terre et à mettre en œuvre des opérations significatives de référence dont le but ultime est de mettre en jeu des matériaux de construction contenant des sédiments. L'objectif principal consiste donc à développer une méthodologie scientifique de valorisation des sédiments marins, basée sur des études de caractérisation intrinsèque en amont afin de mettre en œuvre un matériau alternatif selon le guide d'acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière [AMATR, Sétra, 2012], et qui sera adapté pour une valorisation en couche de fondation. L'étude consiste à l'élaboration d'une formulation à base de sédiments marins. Après la validation en laboratoire, un premier ouvrage routier à l'échelle 1 (échelle réelle) à base de sédiment a été réalisé à Dunkerque. Un suivi in situ des performances mécaniques et environnementales de l'ouvrage a par la suite été réalisé [Figure 1].

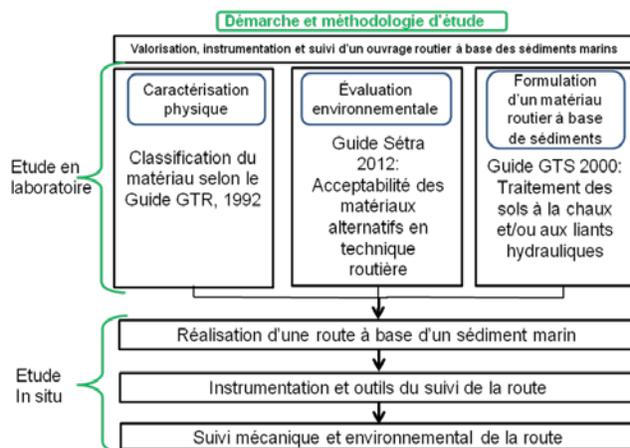


Figure 1. Méthodologie de valorisation de sédiment marin en technique routière

## 2 MATERIELS, METHODOLOGIE ET PROGRAMME EXPERIMENTAL

### 2.1 Caractérisations physiques, minéralogiques et environnementales des sédiments marins bruts

Dans le contexte de l'étude des sédiments marins, les paramètres suivants doivent être évalués : distribution granulométrique, proportion en matières organiques, masse volumique absolue, effet de la fraction fine à l'aide de l'essai au bleu de Méthylène, limites d'Atterberg, indice de portance immédiat, composition minéralogique et évaluation environnementale. Cette étude préalable a donc pour objectif de souligner les paramètres importants qui réagissent le comportement général des sédiments.

L'établissement d'une carte d'identité des prélèvements des sédiments marins a permis de mettre en évidence les principales caractéristiques du matériau. Les essais ont montré que la teneur en eau est élevée. Les essais ont aussi montré un taux de fine relativement important, avec la présence de 10% de matière organique, ce qui peut influencer les performances mécaniques.

Paramètres	Valeur	Norme
Teneur en eau (%) à 105°C	60	NF P 94-050-1995
Teneur en matière organique (%)	9,4	XP P 94 047-1998
Masse volumique ( $\rho_s$ )	2,56	NF EN 196-6-2012
Valeur au bleu de Méthylène (VBS) (g/100g)	3,76	NF P94-068-998
Limite de plasticité (PL)	29	NF P94-052-1993
Limite de liquidité (LL)	45	NF P94-052-1-1995
Indice de plasticité IP(%)	16	NF P94-052-1-1995
Grains < 2 $\mu$ m (%)	10	ISO 13320-2009
2 $\mu$ m < Grains < 63 $\mu$ m	55	ISO 13320-2009
Grains > 63 $\mu$ m (%)	35	ISO 13320-2009
W <sub>OPM</sub> (%) Proctor modifié	19,8	NF P 94-093-1999
p <sub>dOPM</sub> Proctor (g/cm <sup>3</sup> )	1,6	NF P 94-093-1999
Indice de portance immédiat (IPI)	30	NF P94-078-1997

Tableau 1. Caractéristiques physiques du sédiment marin

La caractérisation minéralogique a défini les principaux minéraux constituant le sédiment. Le sédiment contient deux importantes phases soit la calcite et le quartz, ainsi que des phases argileuses comme l'illite, l'halite et la muscovite. Cette information est très importante afin de bien comprendre la réaction de ces derniers dans un environnement bien déterminé, permettant par la suite de bien définir le comportement du matériau.

D'après le GTR, pour une classification des matériaux routiers, une proportion en matière organique comprise entre 3% et 10% indique une classe F (sol organique), ce qui correspond aux matériaux naturels renfermant de la matière organique, et plus précisément une sous-classe

F11 (F11 : Teneur en matière organiques supérieures à 3%). D'autre part, selon l'aspect granulométrique, le sédiment marin se positionne dans la classe A (sols fins) pour les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 50 mm et le passant à 80µm est supérieur à 35 %. La sous-classe est déterminée selon la valeur du bleu de Méthylène et la limite d'Atterberg. Le sédiment analysé se classe en A3. Selon le GTR, les sédiments étudiés présentent une plasticité élevée et une sensibilité à l'eau. Pour une meilleure utilisation en technique routière, une amélioration des propriétés est nécessaire afin de répondre aux exigences du comportement requis.

La caractérisation environnementale du sédiment marin a été étudiée selon le guide méthodologique d'acceptabilité des matériaux alternatifs en technique routière. Il s'agit d'une étape primordiale permettant de bien suivre le comportement du sédiment selon différents scénarios. Le sédiment marin a été analysé à travers l'essai de lixiviation NF EN 12457-2. Selon l'évaluation de l'impact sur l'environnement, le taux de relargage du sédiment était inférieur aux valeurs seuils niveau 1 du guide, ce qui autorise l'acceptabilité de la valorisation des sédiments en technique routière.

Sur le plan géotechnique, on a constaté que le sédiment de GPMD présente une teneur en eau élevée, avec la présence d'une fraction argileuse et d'une quantité considérable de matière organique. Pour faire face à ces anomalies, un traitement sera envisagé afin de réduire la teneur en eau et améliorer les caractéristiques de portance du matériau.

## 2.2 Elaboration d'une formulation de couche de fondation à base des sédiments marins

La valorisation d'un matériau alternatif «sédiment marin» en matériau routier nécessite d'abord une connaissance de toutes ses propriétés, mais il faut aussi tenir compte de toutes les différentes caractéristiques des matériaux routiers dans lesquels il va être introduit. En effet, la valorisation des sédiments marins du GPMD ne peut être acceptée que s'il présente des propriétés mécaniques et environnementales adaptées à l'usage envisagé.

Le but de l'étude de formulation consiste à examiner la possibilité de remplacer une fraction de sable utilisé dans les matériaux routiers par des sédiments non immergeables dragués du GPMD. Le mélange est traité avec de la chaux vive et du liant hydraulique. En raison de sa disponibilité dans le port, l'utilisation du sable de dragage avec le sédiment fin présente une solution alternative pour la gestion des matériaux dragués [Abriak et al., 2003].

Concernant la composition et les pourcentages utilisés dans cette formulation, nous nous sommes basées sur des études antérieures et des résultats obtenus au cours de ces dernières années [Dubois, 2006; Tran, 2008].

Dans notre étude, le mélange adopté est composé de 1/3 de sédiment marin et 2/3 de sable de dragage. La quantité de liant hydraulique a été fixée à 6%, ce qui est typiquement utilisé pour un traitement en construction routière. La proportion de chaux à ajouter a été fixée à 1% de la masse sèche du mélange. Le pourcentage en chaux

a été déterminé par le test de fixation limite [Tremblay, 1998].

L'étude de formulation a été effectuée en confectionnant un mélange de sédiment marin, de sable de dragage, de chaux vive et de liant hydraulique tout en respectant la norme NF EN 14227. Le taux d'introduction du sédiment est estimé à 30%. La distribution granulométrique du mélange (1/3 de sédiments dragués, 2/3 de sable dragué, 6% de liant hydraulique et 1% de chaux) est illustrée sur la Figure 2. En évaluant les coefficients de courbure et de d'uniformité, nous avons obtenu un  $C_u$  de 50 qui est largement supérieur à la valeur de référence de 6 et un  $C_c$  de 1,8. L'ajout granulaire de 2/3 de l'ensemble de la formulation permet d'avoir une distribution granulaire respectant les critères d'uniformité et de courbure.

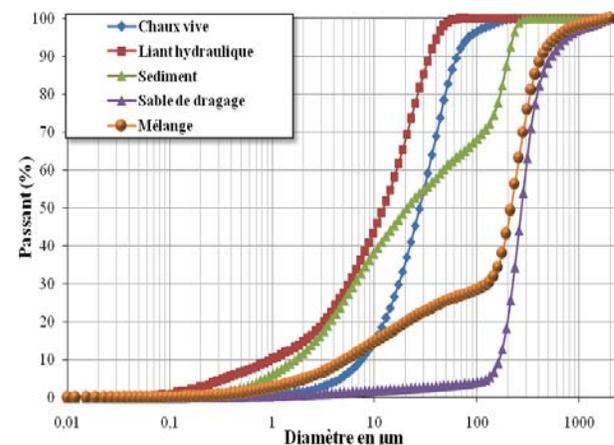


Figure 2. Distributions granulométriques de la formulation proposée

Dans le domaine routier, l'utilisation des matériaux à base de chaux et de liant hydraulique requiert une étude spécifique et approfondie sur le plan mécanique. Pour pouvoir utiliser le sédiment traité à la chaux et au liant hydraulique en couche de fondation, le mélange proposé doit répondre à plusieurs critères mécaniques à court et à long terme.

La démarche de valorisation de sédiment consiste à identifier les caractéristiques optimales de la formulation étudiée ( $W_{OPM}$  et  $p_{dOPM}$ ) par l'essai Proctor ainsi que l'aptitude du mélange à supporter la circulation des engins à travers l'IPI. Suite aux critères optimaux et de portance déterminés, la confection des éprouvettes peut être réalisée. Après différentes échéances de cure, une étude des comportements mécanique et environnemental est effectuée. Dans ce contexte, trois types d'essais ont été mis en œuvre :

- l'essai Proctor afin de déterminer la teneur en eau optimale et la portance immédiate du mélange (IPI) selon les normes NF P 94-093 et NF P 98-078;
- l'essai de résistance à la compression uniaxiale suivant la norme NF EN13286-41 ;
- l'essai de résistance à la compression diamétrale pour évaluer la résistance à la traction et le module d'élasticité en traction ( $R_t$  et  $E$ ) d'après la norme NF EN13286-42 et 43.

Pour une valorisation du mélange en couche de fondation, une campagne d'essai Proctor modifié a été réalisée afin d'évaluer la capacité de portance, la teneur en eau optimale et la densité. L'essai est réalisé sur un mélange représentatif préparé avec cinq teneurs en eau différentes. La détermination de l'indice de portance immédiat IPI a été précédée par un essai Proctor permettant de déterminer la teneur en eau optimale de la matière " $W_{OPM}$ " et la densité sèche maximale " $\gamma_{d_{OPM}}$ ". La courbe du Proctor modifié relative à l'indice de portance immédiat (IPI) et aux densités sèches est présentée à la Figure 3.

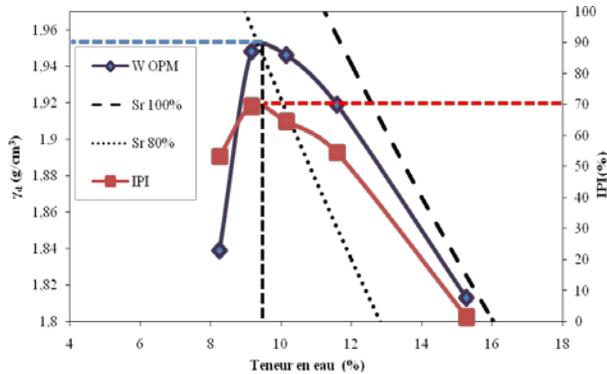


Figure 3. Courbe Proctor modifié & IPI du mélange

Les résultats expérimentaux montrent que la formulation étudiée présente une teneur en eau optimale de 9,5 % avec un IPI de l'ordre de 70 % et une densité sèche de 1,95 ce qui indique une bonne portance du mélange à base de sédiment. Le traitement à la chaux et au liant hydraulique combiné au sable de dragage a permis de réduire la teneur en eau; cette diminution est liée à la consommation par les ajouts (chaux et liant hydraulique). Ceci va jouer un rôle important dans l'amélioration de la durabilité de la couche de fondation de la chaussée. Après la détermination des paramètres optimaux ( $W_{OPM}$  et  $\rho_{d_{OPM}}$  et IPI), l'étape de confection des éprouvettes de la formulation choisie a été réalisée afin de déterminer les propriétés mécaniques ( $R_c$ ,  $R_t$  et  $E$ ) qui assurent la bonne tenue de la couche de fondation.

Le comportement mécanique de la formulation a été évalué par des mesures de résistance à la compression uniaxiale (norme NF EN 13286-41) et à la traction indirecte (norme NF EN 13286-42), ainsi que par la détermination du module d'élasticité (norme NF EN 13286-43).

Les mesures de résistance à la compression uniaxiale à 7, 14, 28, 90, 180 et 360 jours sont présentées sur la Figure 4. D'après les résultats obtenus sur l'ensemble des échantillons testés, on observe un gain en résistance à la compression au fil du temps et de bonnes performances atteintes à 90, 180 et 360 jours avec respectivement 11 MPa, 11,7 MPa et 15,6 MPa.

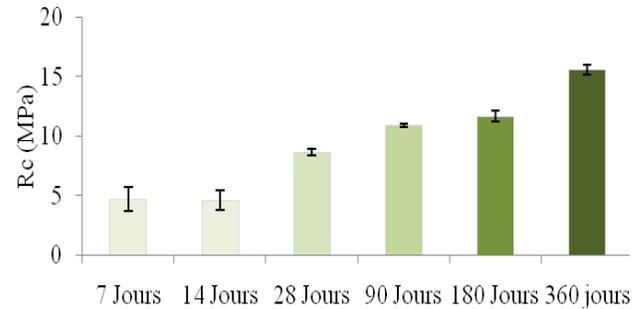


Figure 4. Evolution des résistances en compression de la formulation à base de sédiment

Le critère d'âge autorisant la circulation des engins sur une formulation destinée à une utilisation en couche de fondation est déterminé suite à la mesure de la résistance à la compression à 7 jours. Nous avons obtenu une résistance de 4 MPa à 7 jours. Ceci est expliqué par la bonne prise des sédiments traités au liant hydraulique et à la chaux vive. Concernant les mesures à 28 jours, la résistance est environ 2 fois plus élevée que celles mesurées à 7 et 14 jours. Les résultats obtenus confirment la bonne performance mécanique en compression de la formulation étudiée.

La résistance à la traction indirecte ( $R_t$ ) est obtenue en appliquant une charge linéaire constante sur deux génératrices diamétralement opposées, la première située perpendiculairement au plan de rupture et la deuxième faisant un angle de  $60^\circ$  par rapport à la première. La résistance à la traction est calculée selon l'équation [1] et [2]:

$$R_t = 0,8 \times R_{tb} \quad [1]$$

$$R_{tb} = 2 \times 10^{-2} (Fr/\pi \cdot \phi \cdot h) \quad [2]$$

Avec :

$R_t$  : Résistance à la traction en MPa;

$R_{tb}$  : Résistance en compression diamétrale en MPa;

$Fr$  : Force de rupture en N;

$\phi$  : Diamètre en cm;

$h$  : Hauteur de l'éprouvette en cm.

Nous avons déterminé  $R_t$  et  $E$  pour les échéances 7, 14, 28, 90, 180 et 360 jours afin de suivre le comportement mécanique du matériau dans le temps. L'évolution des résistances en traction pour les échéances testées est présentée sur la Figure 5. Les résultats sont calculés à partir de mesures sur trois éprouvettes différentes. On constate une nette évolution de la résistance à la traction entre 14 jours et 28 jours ainsi qu'une amélioration de la résistance à 90 jours pour atteindre 1,8 MPa. Les résultats obtenus et l'évolution constatée présentent un effet bénéfique pour une valorisation en couche de fondation.

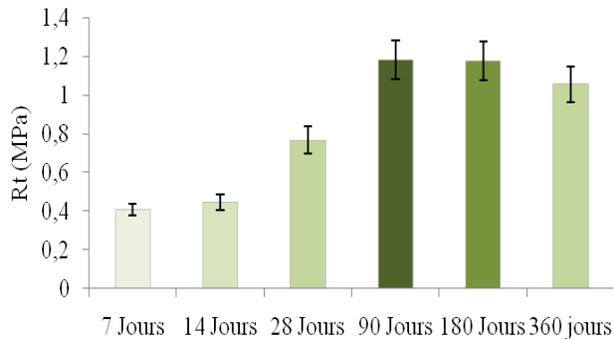


Figure 5. Evolution de la résistance à la traction

À partir des résultats de  $R_t$  et  $E$ , nous avons déterminé la classe mécanique de la formulation étudiée à 7, 14, 28, 90, 180 et 360 jours en positionnant les données sur l'abaque de performances mécaniques à 360 jours (Figure 6). Dans le cadre de la classification des matériaux traités au liant hydraulique du guide GTR, et à partir des résultats des différentes échéances, on distingue une bonne performance à jeune âge (28 jours) en se classant en classe S2. Une amélioration au niveau du classement a été enregistrée en se positionnant en classe S3 pour les échéances 90, 180 et 360 jours. Selon le résultat obtenu à 360 jours, la formulation présente une performance mécanique acceptable pour une utilisation en couche de fondation.

L'évaluation de l'impact environnemental du mélange a été réalisée après 28, 90 et 360 jours de maturation selon la norme NF EN12-457-2 (essai de lixiviation sur des éprouvettes broyées). Les résultats ont été comparés au guide méthodologique pour l'acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière. Les résultats de lixiviation ont montré que les échantillons analysés ne présentent aucun dépassement du seuil pour une utilisation en technique routière, permettant ainsi de justifier une utilisation en couche de fondation.

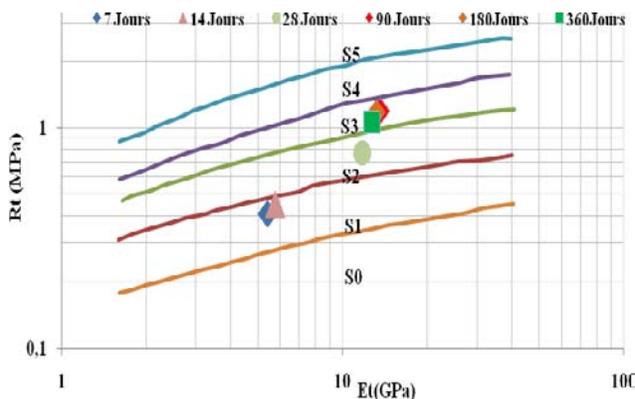


Figure 6. Classification de la formulation à base de sédiment [LCPC-SETRA 2007]

### 2.3 Application in Situ : Construction d'une route à Dunkerque à base de sédiment avec suivi mécanique et environnemental

Après avoir réalisé une étude expérimentale en laboratoire, la construction d'une route en grandeur réelle a été lancée fin juin 2012 au GPMD en utilisant la formulation développée en laboratoire. C'est la première route réalisée en France à base de sédiments marins. Ce programme expérimental vise à confirmer les résultats obtenus en laboratoire en effectuant un suivi du comportement mécanique à 60 jours et à 360 jours du mélange traité de la nouvelle route. Ces résultats vont permettre d'avoir un retour sur le comportement mécanique sous trafic et de recueillir des informations au niveau environnemental. Les hypothèses de conception de la structure routière sont présentées dans le Tableau 2.

Classe de plateforme	PF 2
Trafic	100 PI/par jour
Durée	15 années

Tableau 2. Hypothèses de conception de la route

Selon le trafic et les conditions du site, la structure de la route à base des sédiments marins est composée de :

- une couche de roulement en BBME0/10PC3 (BBME : Béton bitumineux à moule élevé) de 5 cm d'épaisseur ;
- une couche de base en EME 0/10CC2 (EME: Enrobés à moule élevé) de 6 cm d'épaisseur ;
- une couche de fondation à base de sédiment marin traité de 30cm d'épaisseur ;
- un sol naturel constituant la PST (partie supérieur de terrassements) .

La construction de la route expérimentale a été réalisée suivant les recommandations d'usage en France (Sétra/LCPC, 2000). La route est sur 550 mètres de longueur et 7 mètres de largeur (Figure 7).

Le comportement mécanique de la formulation appliquée in situ a été évalué à l'aide d'une campagne de carottage à 60 et à 360 jours afin de mesurer les résistances à la compression, traction indirecte et module d'élasticité.

La résistance à la compression à 60 jours était de 6,7 MPa et de 7,5 MPa à 360 jours. La résistance à la traction à 60 jours était de 0,75 MPa et de 1,18MPa à 360 jours. On constate donc une nette évolution des résistances entre 60 et 360 jours. Les résultats de la résistance à la traction sont en accord ceux obtenus en laboratoire. Nous avons enregistré un module d'élasticité de 8,7 GPa après 60 jours et de 12 GPa à 360 jours.

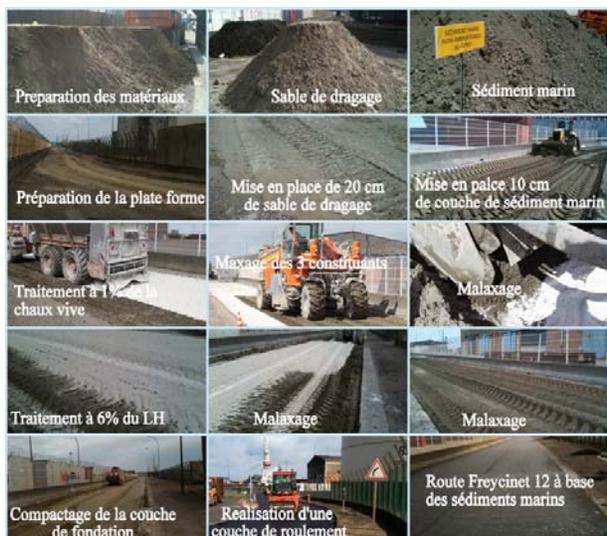


Figure 7. Etapes d'application de la formulation à base de sédiment en route à l'échelle industrielle

La Figure 8 illustre l'estimation de la classification de la couche de fondation à 60 jours, qui présente une classe S2 (classe minimale recommandée selon le guide GTR). A 360 jours, un gain de classe a été enregistré en se classant en S3. L'étude des performances mécaniques de la couche de fondation in situ montre un comportement comparable à celui obtenu en laboratoire. Il s'agit d'un bon résultat qui permet de confirmer l'étude en laboratoire et de valider la formulation à base de sédiments.

Le suivi environnemental de la route expérimentale a été réalisé en caractérisant, identifiant et quantifiant son impact sur l'environnement. Des essais de lixiviation sur des échantillons prélevés de la couche de fondation à 60 et 360 jours ont été effectués suivant la norme EN12457-2. Le Tableau 3 présente les résultats d'analyse sur les éluats des matériaux prélevés. Les mesures des éléments traces métalliques effectuées sur les éluats présentent des concentrations très inférieures aux valeurs limites de lixiviation pour une utilisation en technique routière selon les recommandations du guide acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière «Sétra, 2012».

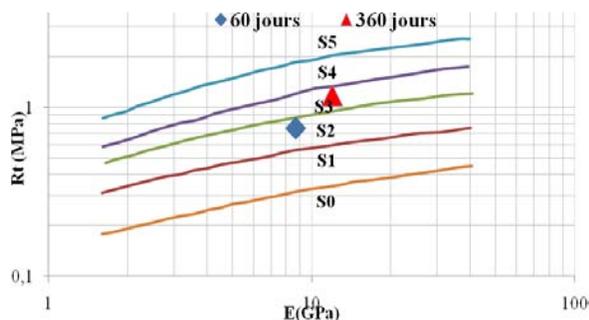


Figure 8. Classification de la couche de fondation à base de sédiment [LCPC-SETRA 2007]

Éléments	Valeur en	Valeur en	Valeurs
	mg/kg MS 60jours	mg/kg MS 360 jours	limites pour être candidat à une utilisation en T.R (mg/kg de MS)
As	<0,1	<0,02	2
Ba	5,7	11,9	100
Cd	<0,04	<0,004	1
Cr	<0,12	<0,03	10
Cu	1,82	2,86	50
Hg	-	-	0.2
Mo	0,18	0,28	10
Ni	0,13	0,16	10
Pb	0,1	0,13	10
Sb	<0,06	<0,06	0.7
Se	<0,1	<0,07	0.5
Zn	<0,1	<0,052	50
Chlorure	1213	1820	15000
Sulfate	220	300	20000
Fraction soluble	6660	13000	60000
pH	12,9	12,5	

Tableau 3. Résultats des analyses sur les carottes à 60 et 360 jours

Les concentrations obtenues à 60 jours et à 360 jours sont en accord avec les résultats obtenus en laboratoire. D'après cette investigation, le matériau à base de sédiment marin valorisé en couche de fondation ne semble pas présenter de risques pour l'environnement et présente des taux de relargage inférieurs aux valeurs seuils du niveau N1 (guide AMATR, Sétra, 2012).

### 3 CONCLUSION

L'établissement d'une carte d'identité des sédiments a permis de mettre en évidence les principales caractéristiques physiques, minéralogiques, mécaniques et environnementales du sédiment marin. Les analyses ont permis de classer le sédiment étudié en classe A3 (guide GTR). Selon l'évaluation de l'impact sur l'environnement, le taux de relargage du sédiment était inférieur aux valeurs seuils du niveau N1 selon le guide AMATR, Sétra, 2012, cela donc autorise l'acceptabilité de la valorisation des sédiments en technique routière.

L'étude du comportement mécanique de la formulation élaboré à partir des sédiments a montré de bonnes performances au niveau des résistances à la compression et à la traction, ainsi qu'au niveau du module d'élasticité. Selon la classification GTS, la formulation se classe en S3, qui est une bonne classe pour une valorisation en couche de fondation. D'un point de vue environnemental, la formulation a montré que les concentrations des éléments traces métalliques sont largement inférieures aux seuils pour une utilisation en technique routière tels que définis par le guide. Les résultats encourageants obtenus en laboratoire aux plans mécanique et environnemental autorisent donc la valorisation d'un matériau à base de sédiment marin.

Sur la base de ces résultats, une application réelle de la formulation élaborée en laboratoire a été réalisée par la

construction d'une route. Le suivi mécanique de la route a montré de bonnes performances et a permis de classer le matériau en classe S3 à 360 jours. L'évaluation environnementale de la route sur une durée de 360 jours a montré des seuils inférieurs aux seuils définis par le guide. D'après l'investigation réalisée sur la formulation de la route réalisée à base de sédiments marins, nous avons montré la compatibilité entre les résultats in situ et ceux obtenus en laboratoire.

A partir de ce travail (étude en laboratoire et in situ), nous avons donc montré l'efficacité de la méthodologie de valorisation d'un matériau considéré comme déchet. Cette méthodologie intègre une étude d'identification du matériau, un traitement du sédiment par ajout granulaire et de liant hydraulique, une réalisation d'un ouvrage routier à base du matériau alternatif. Ceci rend possible la valorisation du sédiment dans un contexte plus large.

## REFERENCES

- Abriak, N.E. et Pascal GREGOIRE 2003. Etude d'une grave routière à base de sable de dragage, *In 2nd International symposium on contaminated sediments- Posters*. p.370-373 Québec CANADA.
- AMATR, Sétra. 2012. Guide méthodologique: Acceptabilité de Matériaux Alternatifs en Techniques Routière, Evaluation environnementale.
- Brakni S., 2008. Première approche vers une valorisation de granulats artificiels à base de sédiments de dragage, *Thèse de doctorat*, Ecole des mines de Douai, 182 pages.
- Dia M., 2013. Traitement et valorisation de sédiments de dragage en technique routière, *Thèse de Doctorat*, Ecole des mines de Douai, 169 pages
- Dubois V., 2006. Caractérisation physico chimiques et environnementale des sédiments marins. Application en technique routière, *Thèse de Doctorat*, Ecole des mines de Douai, 291 pages.
- Dubois V., Zentar Rachid et Abriak Nor-Edine 2009. The use of marine sediments as a pavement base material», *Waste Management*, Volume 29, Issue 2, 2009, Pages 774–782.
- GTR, 1992, Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme, *Editions de SETRA-LCPC*, 2000, fascicule I et II, 2000, 98 p. et 102 p.
- GTS, 1992, Guide de traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques, *Editions de SETRA-LCPC*, 2000, 237p.
- LCPC-Sétra 2007. Guide technique des assises de chaussées « Abaque des classes mécaniques des sols traités pour une réutilisation en assise de chaussée ».
- LCPC-Sétra 2000. Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques.
- Hamer K., et V. Karius 2002. Brick production with dredged harbour sediments. An industrial-scale experiment, *Waste Management*, Volume 22, Issue 5, (2002) pages 521–530.
- Mezencevova A, N. Yeboah, S. Burns, L. Kahn, and K. Kurtis, 2012. Utilization of savannah harbor river sediment as the primary raw material in production of fired brick», *Journal of Environmental Management* 113 (2012) 128-136.
- Miraoui M., 2010. Prétraitement et traitement des sédiments de dragage en vue d'une valorisation dans le génie civil, *Thèse Doctorat*, Mines de Douai, 210pp.
- Tran, N.T. 2009. Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière, *Thèse de doctorat*, Ecole des mines de Douai 189 pages.
- Tremblay, H. 1998. Amélioration mécanique et prédiction de la compressibilité des sols fins au Québec, Thèse de la Faculté des Sciences et de Génie, Université de Laval au Québec.
- UNPG, 2009 : « Union nationale des producteurs de granulats », Site : <http://www.unpg.fr>.
- Zentar R, Abriak Nor-Edine., Dubois Vincent 2009. Effects of salts and organic matter on Atterberg limits of dredged marine sediments, *Applied Clay Science* 42, 2009, pages 391-397.