

Projet SEDIBET



Utilisation de **SED**iments inertés et de fines dans la conception de nouveaux **BET**ons



LABORATOIRE
de MECANIQUE
de LILLE
UMR CNRS 8107



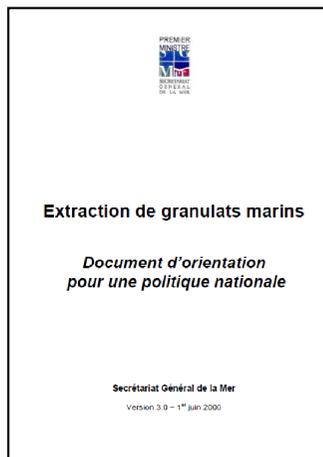
CERIB



Contexte

2 problèmes économiques et environnementaux à résoudre:

- raréfaction des ressources en granulats



« *Chaque année, on utilise en France plus de 400 millions de tonnes de granulats, [...] cette substance si répandue se raréfie ; plus exactement, les ressources accessibles dans des conditions acceptables aux plans de l'économie, de l'environnement et des risques diminuent. [...] problèmes d'acceptabilité et d'environnement que posent les carrières terrestres d'où proviennent actuellement la majorité de ces granulats. Se pose alors la **question de la recherche de ressources alternatives.** »*



La prise en compte du coût environnemental (notamment vis-à-vis de la **production de CO₂**) du transport des granulats et de la production de ciment, doit encourager la recherche de sources de granulats proche des chantiers et la réduction des quantité de ciment à utiliser.

Contexte

2 problèmes économiques et environnementaux à résoudre:

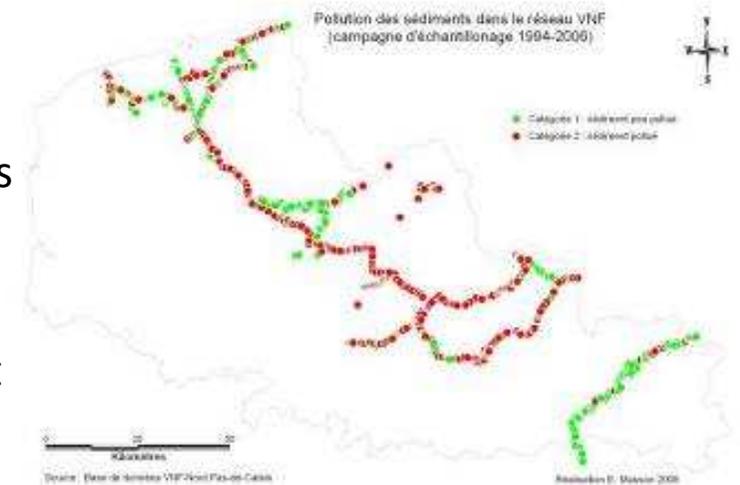
- raréfaction des ressources en granulats
- pollution des sédiments de dragage



Nécessité des opérations de dragage pour assurer le fonctionnement des ports et canaux.

Problèmes:

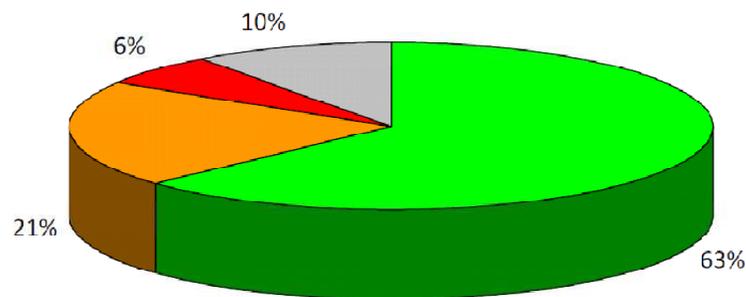
- cubages très importants: 50 Mm³/an dans les ports français, 2.8 Mm³/an sur les 8500 km de canaux.
- pollution importante en métaux lourds et polluants organiques (HAP, PCB,...)



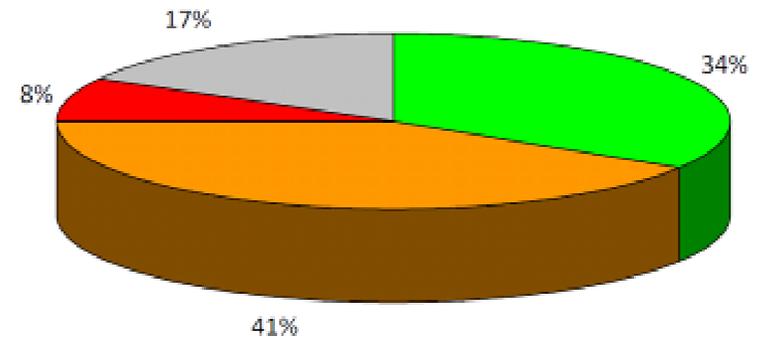
Contexte

2 problèmes économiques et environnementaux à résoudre:

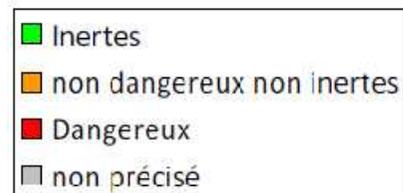
- raréfaction des ressources en granulats
- pollution des sédiments de dragage



Qualité des sédiments dragués



Répartition des volumes à draguer sur 10 ans en fonction de leur qualité



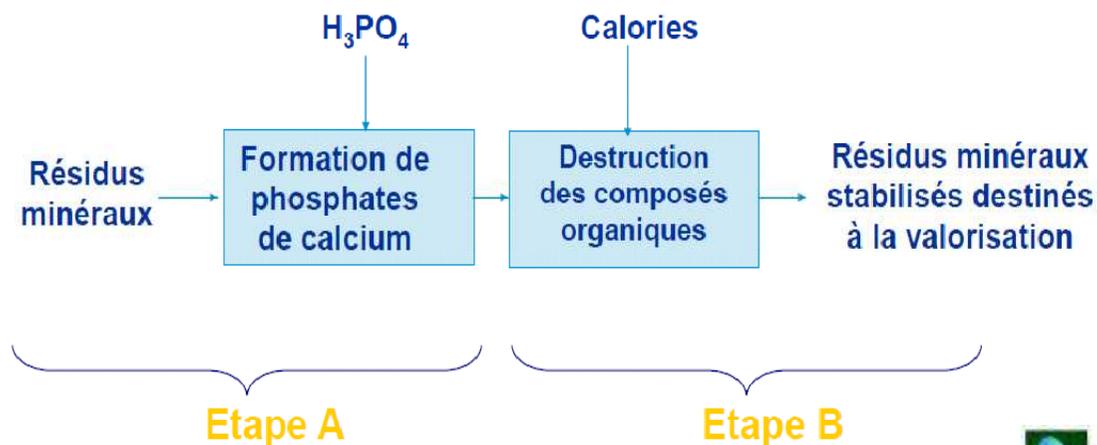
Source: www.sedimateriaux.com

« Politique de VNF en matière de gestion des sédiments issus du dragage »
Présentation du 9 Juin 2010 par O. Prevost

Le procédé Novosol[®]



- Immobilisation chimique des métaux lourds
- Elimination thermique des polluants organiques



Le procédé Novosol®



- Immobilisation chimique des métaux lourds
- Elimination thermique des polluants organiques



Produit A

venant du cyclonage)

-
- ◇ Le contexte et le procédé Novosol
 - ◇ Le projet SEDIBET
 - ◇ Contexte normatif
 - ◇ Valorisation des sédiments
 - ◇ Evaluation environnementale
 - ◇ Analyse socio-économique
 - ◇ Conclusions et perspectives

-
- ◇ Le contexte et le procédé Novosol
 - ◇ Le projet SEDIBET
 - ◇ Contexte normatif
 - ◇ Valorisation des sédiments
 - ◇ Evaluation environnementale
 - ◇ Analyse socio-économique
 - ◇ Conclusions et perspectives

Le projet SEDIBET

UTILISATION DE SEDIMENTS INERTES ET DE FINES DANS LA CONCEPTION DE
NOUVEAUX BETONS

Le projet SEDIBET

UTILISATION DE SEDIMENTS INERTES ET DE FINES DANS LA CONCEPTION DE NOUVEAUX BETONS

Coordinateur:

- LML / Ecole Centrale de Lille

Partenaires:

- CERIB · BRGM · SOLVAY · TVES/Lille 1 · LAMTI
- Ecole Mines Douai · GeM/Centrale Nantes

Méthodologie:

- *concevoir de **nouvelles méthodes de formulation** et les **mettre en œuvre industriellement***
- *mieux **comprendre et appréhender l'incorporation massive de fines** (éventuellement un peu réactives) dans certains bétons, par l'étude de leur impact sur le comportement des matériaux frais et matures (sur les plans retrait, durabilité, mécanique et thermique).*
- *disposer de **données microstructurales** sur ces incorporations et **sur le vieillissement***
- ***vérifier l'innocuité environnementale** de l'incorporation de fines traitées en milieu cimentaire par la mise au point de tests originaux de lixiviation et des méthodes parallèles d'interprétation.*

-
- ◇ Le contexte et le procédé Novosol
 - ◇ Le projet SEDIBET
 - ◇ Contexte normatif
 - ◇ Valorisation des sédiments
 - ◇ Evaluation environnementale
 - ◇ Analyse socio-économique
 - ◇ Conclusions et perspectives

Contexte normatif



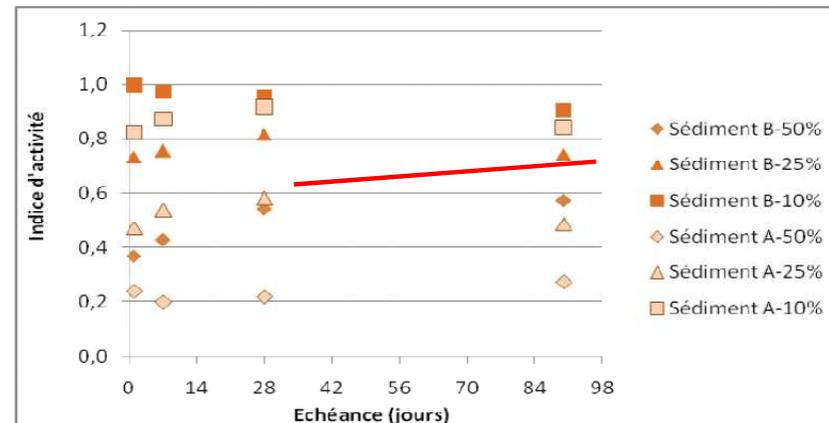
Définition des champs possibles d'utilisation.

L'objectif de cette caractérisation consiste à classer les sédiments inertés (calcinés et calcinés/cyclones) soit comme :

- granulat (filler) selon NF EN 12620 ou
- additif pour béton hydraulique : addition siliceuse, addition calcaire, fumée de silice, laitier de haut fourneau, cendre volante.

Tableau 15. Positionnement des sédiments A et B par rapport aux exigences des normes additions et granulats

PRODUIT	Norme	Sédiment A	Sédiment B	Sédiment A	Sédiment B	Sédiment A	Sédiment B	Sédiment A	Sédiment B	Sédiment A	Sédiment B	Sédiment A	Sédiment B
Essai													
SO ₂	EN 196-2	>= 95%	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42
Si	ISO 3286	>0,4%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CaO libre	EN 45-1	<=0,1%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	max 1,5%	-
Sulfate	EN 196-2	<=2%	17	15	17	15	17	15	17	15	17	15	17
Na2O eq	EN 196-2	valeur à indiquer (%)	3,7	2,4	3,7	2,4	valeur à indiquer	3,7	2,4	valeur à indiquer	3,7	2,4	3,7
Cl-	EN 196-2	<=0,2% en masse	0,04	0,03	max 0,1%	0,04	0,03	max 0,1%	0,04	0,03	max 0,1%	0,04	0,03
perte au feu	EN 196-2	<= 4,7%	8,3	3,3	< 3%	8,3	3,3	max 0,15%	8,3	3,3	8,3	3,3	max 5,1%
surface spécifique	ISO 3277	min 15,0 m ² /g	5,71	5,06	5,71	5,06	5,71	5,06	5,71	5,06	5,71	5,06	5,71
teneur extrait sec	EN 12631-5:32	valeur à indiquer	99,7	99,9	99,7	99,9	99,7	99,9	99,7	99,9	99,7	99,9	99,7
indice activité	EN 12631-5:33												0 à 3
module chimique	NF P 18-938-4:21												
surface massique Blaine	EN 196-6	144	423	deux classes A (min 225, max 255) et B (min 225)	144	423	deux classes A (min 225, max 255) et B (min 225)	144	423	deux classes A (min 225, max 255) et B (min 225)	144	423	144
masse volumique absolue	P 18-528	2910	2730	2700 kg/m ³ < 3000 kg/m ³	2910	2730	A 2600 < 2700 kg/m ³ B 2250 < 2600 kg/m ³	2910	2730	2910	2730	2910	2730
sulfure aspiré à en soufre				< 2%									
teneur en eau	NFP 18-555												
valeur bleu	EN 933-9	0,2	0,1	0,2	0,1	valeur max 0	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2
teneur soufre total	XFP 18-992					max 0,15%		max 0,4%			inf 4,1%		
teneur carbonates	EN 196-2												
teneur matière organique	NFP 18-528 annexe B							max 0,2%			inf 0,2%		
réactivité alcali	P 18-525										normé par le pourcentage inf 0,05% à 3 mois < 0,1% à 6 mois		
stabilité	EN 196-1												max 10 mm



Indice d'activité des sédiments en fonction du temps et du taux de substitution du ciment

Contexte normatif



- Les sédiments A et B ne présentent pas d'effet pouzzolanique.
- Pour un taux de substitution de 25% par le sédiment B, la valeur d'indice d'activité est proche de celle mesurée pour addition calcaire par exemple.

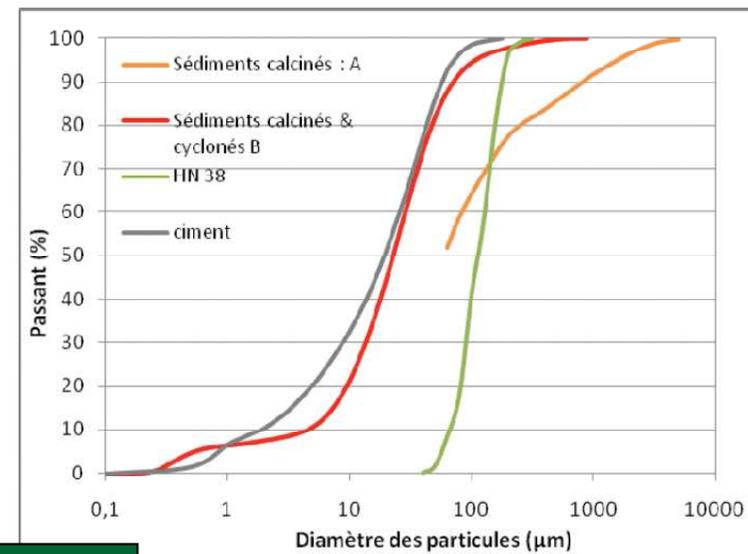
Le gain de résistance obtenue avec le sédiment B est vraisemblablement attribuable à :

- l'amélioration de la compacité du mortier ;
- la réduction de la quantité d'eau efficace, par absorption de celle-ci par les sédiments ;
- une défloculation plus importante des éléments fins par l'adjuvantation.

Conclusion de l'étude normative:

« Les fractions de sédiment étudiés **ne présentent pas les propriétés suffisantes leur permettent d'être considéré comme une addition**. Les sédiments A et B pourront au mieux être utilisés comme filler au sens de la norme NF EN12620.

Leur utilisation dans les bétons par rapport à la granularité de chacun des produits, pourrait se faire par **substitution d'une partie du ciment pour le sédiment B et d'un sable pour le sédiment A**. »



Le sédiment traité doit acquérir le statut de produit.

-
- ◇ Le contexte et le procédé Novosol
 - ◇ Le projet SEDIBET
 - ◇ Contexte normatif
 - ◇ Valorisation des sédiments
 - ◇ Evaluation environnementale
 - ◇ Analyse socio-économique
 - ◇ Conclusions et perspectives

Valorisation des sédiments



L'incorporation de sédiments dans des matériaux cimentaires a été réalisée sur deux types de matériaux : les **pavés** (production annuelle 4.8 Mm³) et les **bétons autoplaçants**.

Valorisation des sédiments



L'incorporation de sédiments dans des matériaux cimentaires a été réalisée sur deux types de matériaux : les **pavés** (production annuelle 4.8 Mm³) et les **bétons autoplaçants**.

- **Les pavés**

Valorisation des sédiments



- les pavés: étude laboratoire.



Utilisation de sédiment de **granulométrie 0/2mm**.

Plusieurs formulations testées en laboratoire:

- une composition témoin ;
- une composition dans laquelle du **10% en masse du ciment** a été substitué par le sédiment S0/2 mm ;
- une composition dans laquelle **5% en masse du ciment et 7% en masse du sable** ont été substitués par le sédiment S0/2 mm.

Résultats des essais sur pavés selon la norme NF EN 13338.

Essais réalisés suivant la norme NF EN 13338	Témoin	10% S0/2 mm	12% S0/2 mm (5%C + 7%S)	Conditions d'acceptation
Résistance à la traction par fendage (MPa)	5,9	4,5	3,7	Moyenne >3,6 MPa Indiv. > 2,9 MPa
Absorption d'eau (%)	4,0	4,1	5,5	< 6 %
Résistance à l'abrasion (mm)	20	20,2	22	< 23 pour la classe H
Comportement au gel/dégel	< 0,1	< 0,1	< 0,1	Pertes < 1 kg/m ³

Valorisation des sédiments

- les pavés: étude laboratoire.

On retrouve de **nombreux défauts de remplissage conduisant à une très forte porosité pour les deux échantillons**. A une échelle élevée (2000x), on constate que **la présence de sédiments n'augmente pas la quantité de défauts dans la pâte malgré une répartition hétérogène des sédiments**. [...] **avancement plus grand de la réaction d'hydratation et meilleure texturation de la pâte de ciment**. Ceci permettrait de **compenser au niveau des propriétés de la pâte ciment, l'effet négatif induit par une diminution de 10% du ciment dans le pavé contenant les sédiments**. Néanmoins, **des défauts plus macroscopiques induits par les sédiments les plus gros peuvent masquer l'effet bénéfique des fines de sédiments** au niveau des propriétés mécaniques macroscopiques.

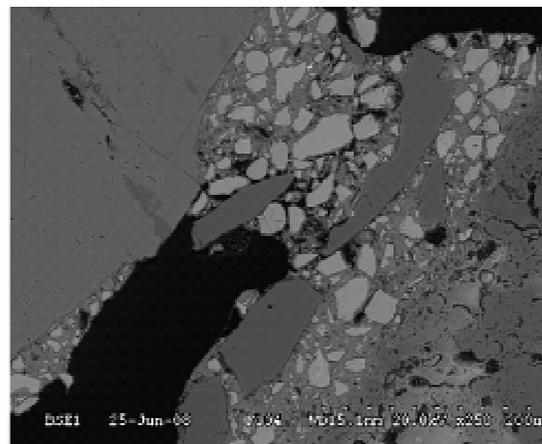
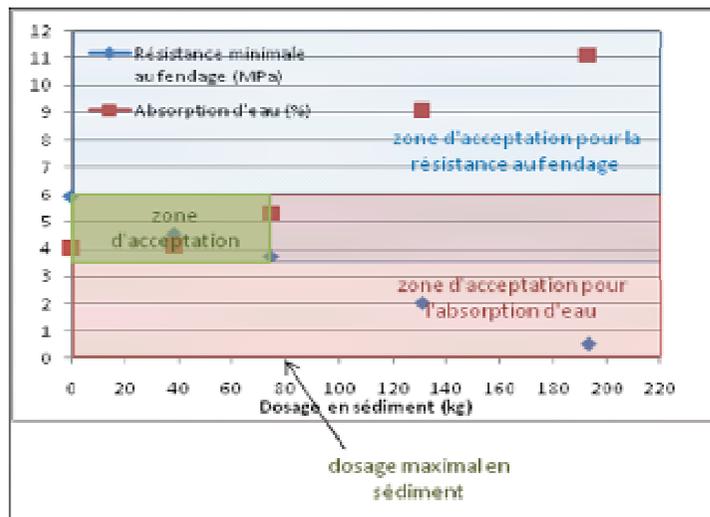


Figure 15. Pavé témoin

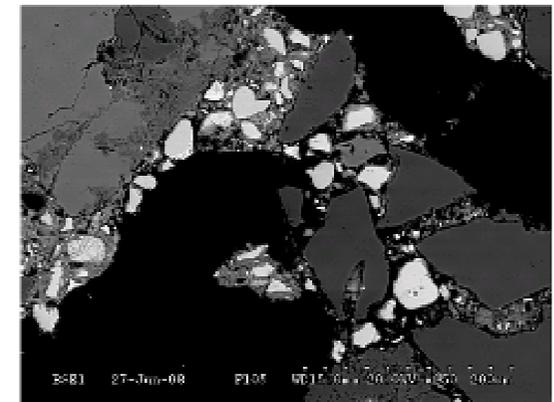


Figure 13. Pavé avec 10% de sédiments en substitution du ciment

Détermination des dosages maximum acceptables: 80kg/m³.

Valorisation des sédiments

- les **pavés**: fabrication industrielle.

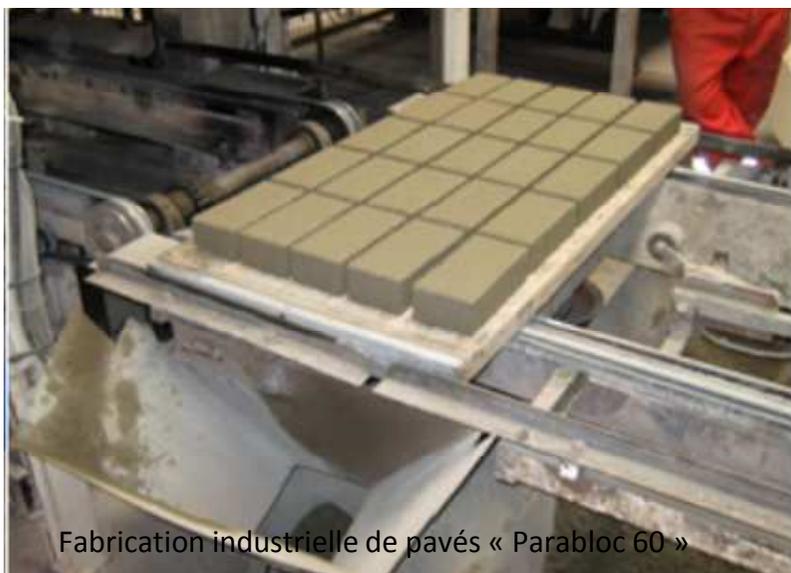
Cinq gâchées de 2T, réalisées sur une presse S1200, sur le site de Tarmac à Harnes (62).

Tableau 23. Proportions des constituants par gâchée

	Témoin	SC1	SC2	SF4	SF5
CEM I 52,5R	12,4%	11,2%		11,8%	
Sédiment 0/2 mm	-	1,2%		4,2%	
Sable 0/4 mm calcaire	48,6%		45,1%		
Sable 0/5,6 mm alluvionnaire	14,0%		14,1%		
Gravillon Calcaire 2/5 mm	24,9%				
Plastifiant	0,03%			0,04%	
Teneur en eau sur béton frais	4,8%	4,8%	5,0%	5,0%	4,95%

Evaluation des performances des pavés conformément à la norme NF EN 1338

	Essais	Résistance minimale au fendage (MPa)	Absorption d'eau (%)	Gel-Dégel Perte de masse (kg/m ²)	Abrasion (mm)
Référence norme produit	NF EN 1338	Moyenne > 3,6	Moyenne ≤ 6, aucun pavé > 6	Moyenne ≤ 1, aucun pavé > 1,5	Moyenne ≤ 23 (classe H)
Témoin	Moyenne	3,7	5,8	≤ 0,1	20,2
	Conformité	oui	oui	oui	oui
SC1 (10% C)	Moyenne	3,7	6,0	≤ 0,1	20,8
	Conformité	oui	non	oui	oui
SC2 (10% C)	Moyenne	3,8	4,5	≤ 0,1	20,0
	Conformité	oui	oui	oui	oui
SF4 (5% C + 7%S)	Moyenne	3,3	5,9	≤ 0,1 (1 pavé > 1,5)	21,0
	Conformité	non	non	non	oui
SF5 (5% C + 7%S)	Moyenne	3,5	5,7	≤ 0,1	21,2
	Conformité	non	non	oui	oui



Fabrication industrielle de pavés « Parabloc 60 »

Valorisation des sédiments



L'incorporation de sédiments dans des matériaux cimentaires a été réalisée sur deux types de matériaux : les **pavés** (production annuelle 4.8 Mm³) et les **bétons autoplaçants**.

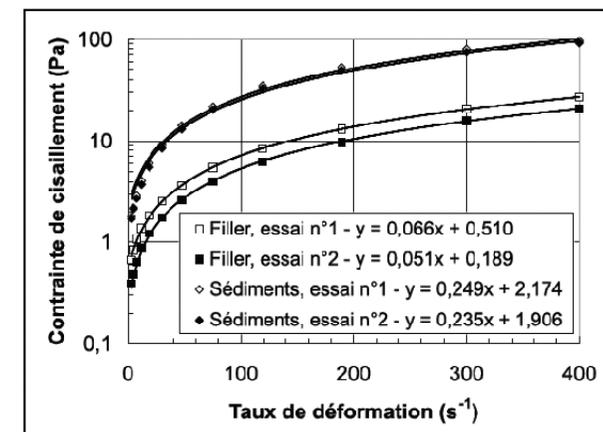
- **Les pavés**
- **Les BAP: formulation.**

Pré étude sur mortier puis réalisation de bétons.

Objectif de la formulation, remplacer les fillers calcaires.

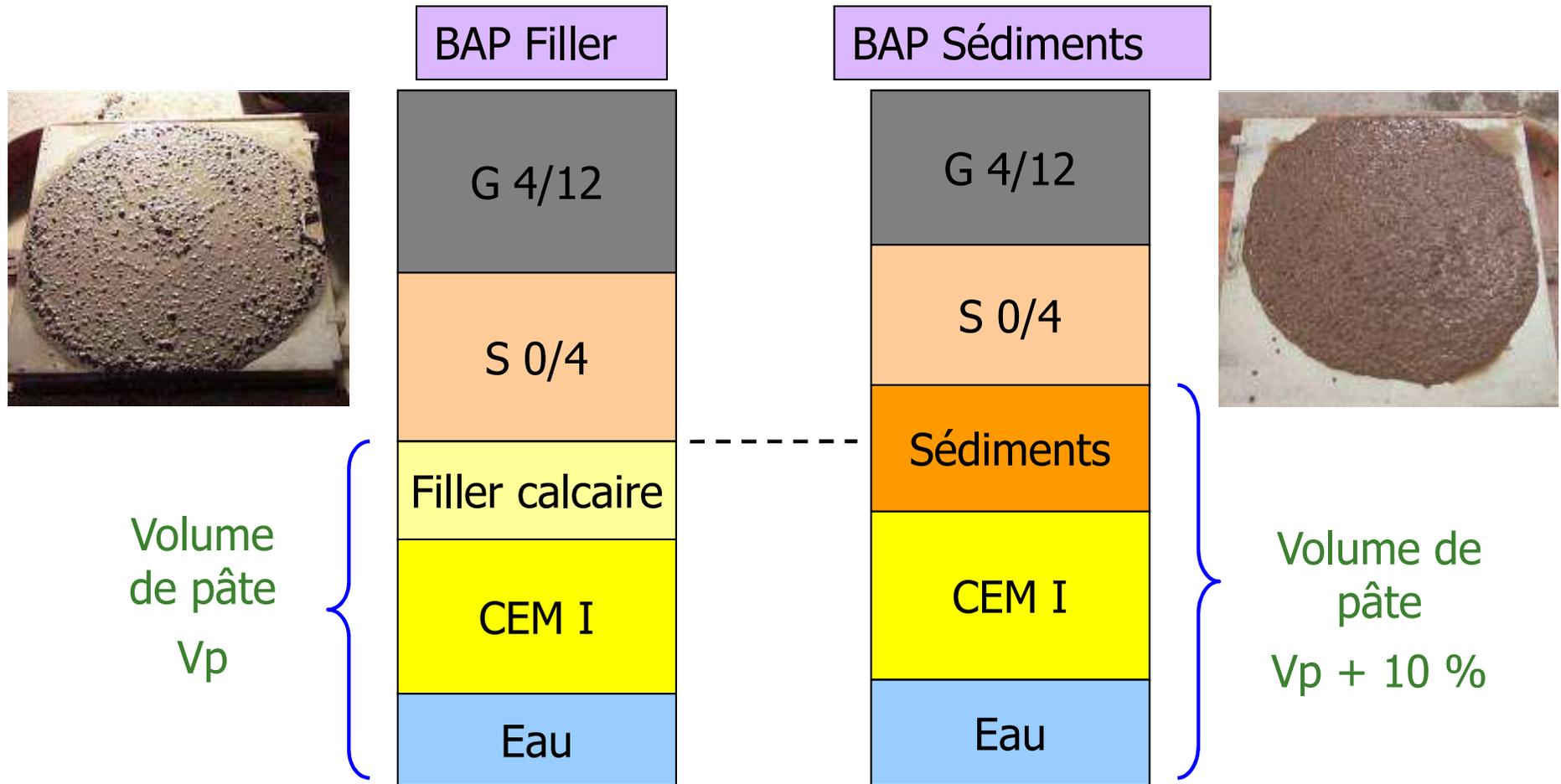
Les analyses granulométriques des sédiments 0/2 mm ont montré qu'ils ne peuvent pas être considérés comme des fillers au sens de la norme EN 12620 (passant à 63 µm inférieur à 70 %). La fraction supérieure à 160 µm est de l'ordre de 60 %. Il n'est donc pas possible de simplement substituer le filler calcaire par les sédiments traités.

*Il est **nécessaire d'augmenter le volume de pâte du BAP de référence d'environ 10 %** pour assurer le caractère autoplaçant du BAP avec sédiments. Cela revient ainsi à substituer une partie du liant par la fraction fine (< 160 µm) et une partie des granulats par la fraction grossière.*



Valorisation des sédiments

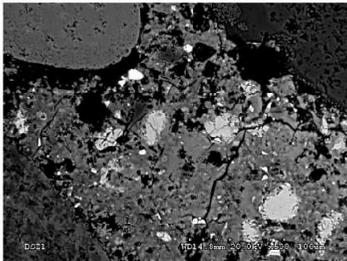
■ Les BAP: formulation.



⇒ Objectifs : fluidité et stabilité des bétons à l'état frais

Valorisation des sédiments

■ Les BAP: caractérisation.



Observation MEB et sonde EDS: désagrégation des plus gros grains de sédiments, le BAP-SED présente une meilleur hydratation et une macroporosité plus faible.

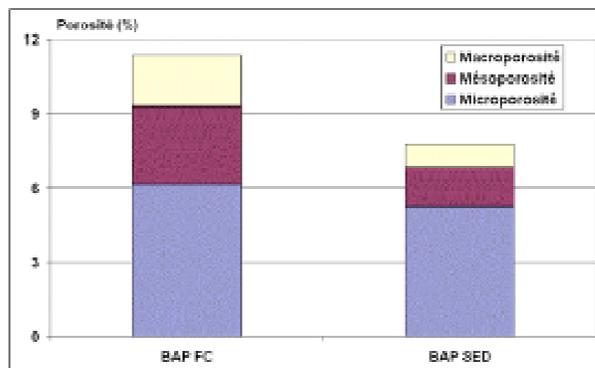
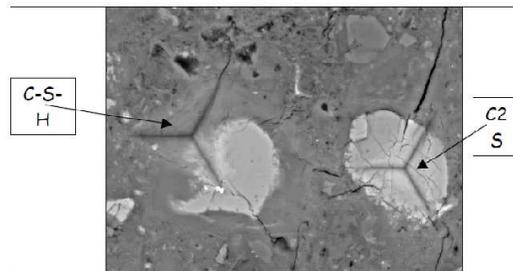


Figure 39. Porosité totale et macro-, méso- et microporosité



Caractérisation micromécanique (nano indentation):

- moyenne BAP-SED Hydrate ("C-S-H") = 27.5 GPa
- moyenne BAP-FC Hydrate ("C-S-H") = 23.0 GPa

Ceci est cohérent avec la réduction de la macro-porosité de la pâte de ciment du BAP-SED comparativement au BAP-FC.

Valorisation des sédiments

■ Les BAP: résistance, durabilité et comportement thermique.

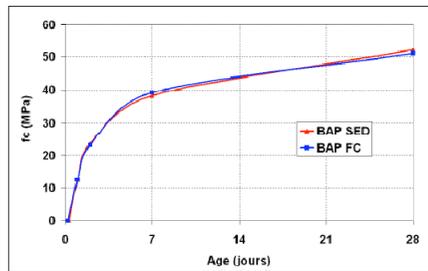


Figure 52. Evolution de la résistance moyenne en compression

Résistance en compression uni axiale: pas d'effet notable.

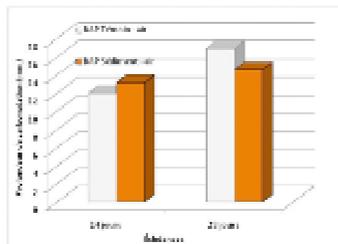
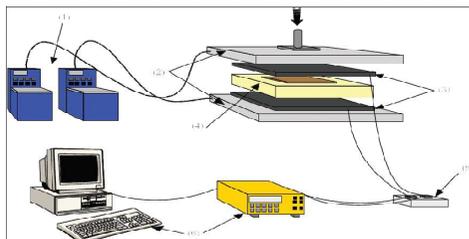


Figure 53. Conditions de carbonatation dans l'essai

Sensibilité à la carbonatation: résultats similaires.



Comportement thermique: peu d'influence sur la conductivité thermique et la chaleur volumique.

Valorisation des sédiments

■ Les BAP: étude expérimentale du retrait et du risque de fissuration.

- *Retrait plastique*
- *Temps de prise*
- *Retrait libre*
- *Sensibilité à la fissuration (essai à l'anneau)*

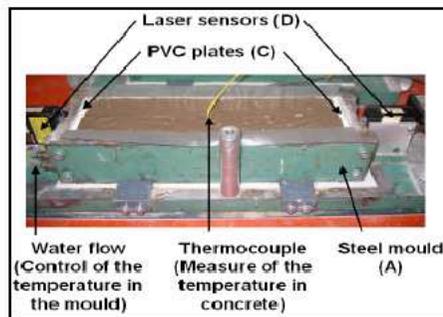


Figure 42. Montage de retrait plastique

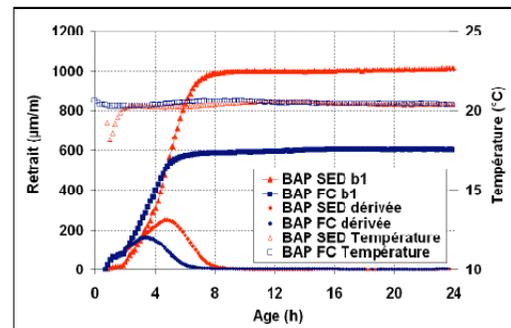


Figure 47. Evolution du retrait plastique, de sa dérivée et de la température

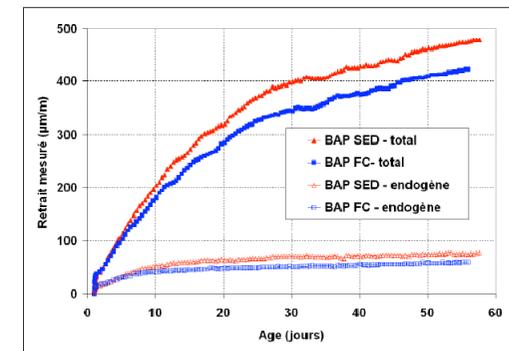


Figure 53. Evolution du retrait total et endogène

Retrait plastique plus élevé ($> 1000 \mu\text{m}/\text{m}$ à 24 h) que celui du BAP avec des fillers calcaires suite à une période de prise plus longue.

Valorisation des sédiments

■ Les BAP: étude expérimentale du retrait et du risque de fissuration.

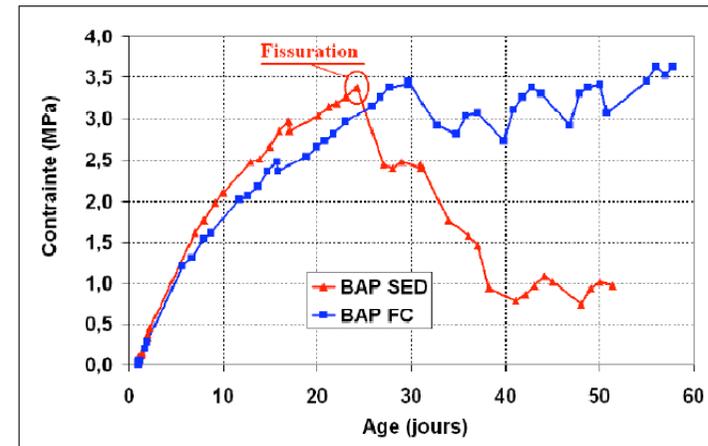
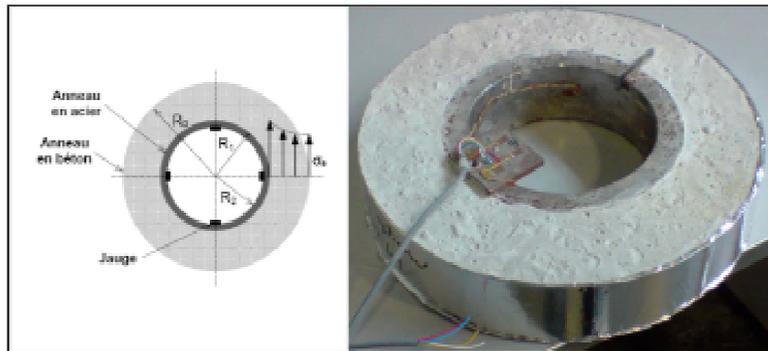


Figure 58. Evolution des contraintes de l'anneau en acier

A long terme, le **risque de fissuration est légèrement plus élevé** pour le BAP avec sédiments en comparaison au BAP avec fillers calcaires. Ce comportement est probablement dû au fait que son **retrait se caractérise par une cinétique d'évolution plus rapide et que sa rigidité est plus élevée.**

Cette analyse ne prend pas en compte la capacité de relaxation des contraintes du matériau et l'évolution de sa rigidité.

Afin d'estimer correctement cette plus grande sensibilité à la fissuration des bétons avec sédiments par rapport à un BAP avec fillers calcaires, il semble intéressant de souligner que l'âge de fissuration du BAP SED (24 jours) avoisine celui d'un béton avec une teneur en laitier de haut-fourneau supérieure ou égale à 50%.

-
- ◇ Le contexte et le procédé Novosol
 - ◇ Le projet SEDIBET
 - ◇ Contexte normatif
 - ◇ Valorisation des sédiments
 - ◇ Evaluation environnementale
 - ◇ Analyse socio-économique
 - ◇ Conclusions et perspectives

Evaluation environnementale

Problème de caractérisation des nouveaux matériaux: objectif, permettre une évolution des normes pour faciliter la valorisation.

Exemple de la valorisation en technique routière:

Guide méthodologique Version de travail du SETRA de Mars 2010:

« Acceptabilité de matériaux alternatifs en techniques routières: évaluation environnementale. »

Définition de 5 niveaux d'investigation:

- ✓ *niveau 0: étude documentaire,*
- ✓ *niveau 1: essais de lixiviation et analyse de contenu total,*
- ✓ *niveau 2: essais de percolation,*
- ✓ *niveau 3: réalisation et suivi d'un plot expérimental,*
- ✓ *niveau 4: production d'une étude spécifique.*

Réalisation d'une route "test" : La construction d'une route test (100 m²) dont l'assise de chaussée (épaisseur de 25cm) a été réalisée en sable-ciment incorporant des sédiments fluviaux (30 %) traités par le procédé NOVOSOL a débuté en décembre 2005, conformément au schéma de principe N°6.

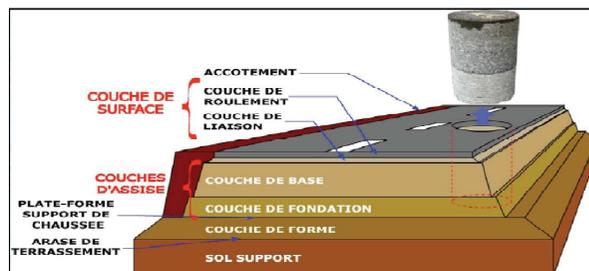


Figure 5. Vue de la route expérimentale terminée

Evaluation environnementale

■ Analyse chimique et minéralogique.

Quantification chimie totale (FluoX), minéralogie (DRX), essais de lixiviation...

■ Mise au point d'un essai de caractérisation environnementale par percolation sur monolithe.

Objectif: améliorer la représentativité des essais environnementaux et réduire les délais de caractérisation.

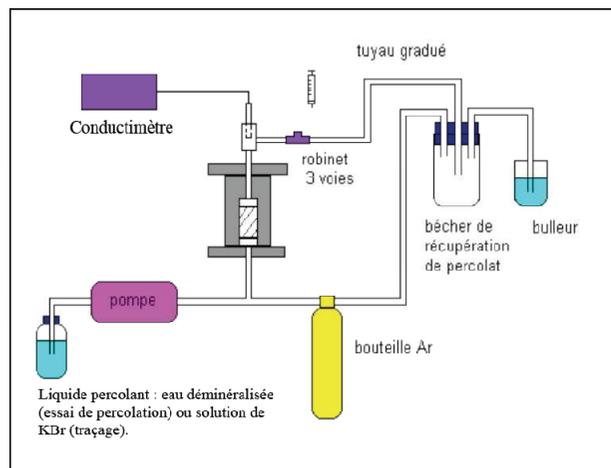


Figure 89 Schéma de principe du dispositif expérimental permettant la réalisation des essais de percolation et de traçage non réactif

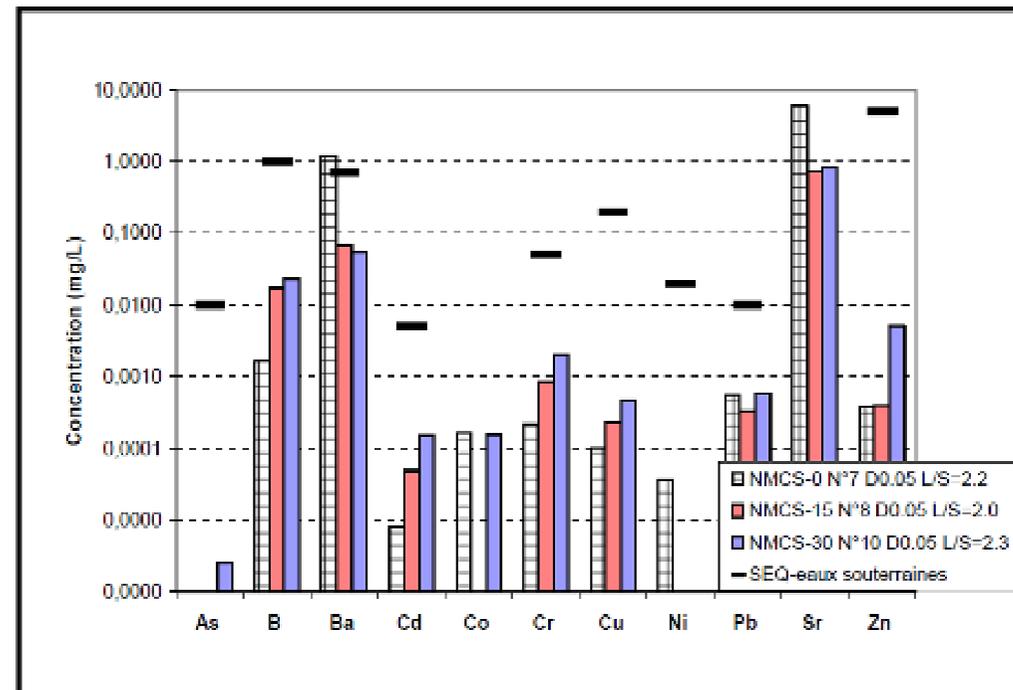


Figure 5-47. Concentration moyenne des éléments traces lors d'essai de percolation sur trois formulations NMCS pour un même débit d'injection (0.05 mL/min)

Evaluation environnementale

- **Analyse chimique et minéralogique.**

Quantification chimie totale (FluoX), minéralogie (DRX), essais de lixiviation...

- **Mise au point d'un essai de caractérisation environnementale par percolation sur monolithe.**

Objectif: améliorer la représentativité des essais environnementaux et réduire les délais de caractérisation.

- **Nécessité de mettre en œuvre une modélisation couplée géochimie-transport.**

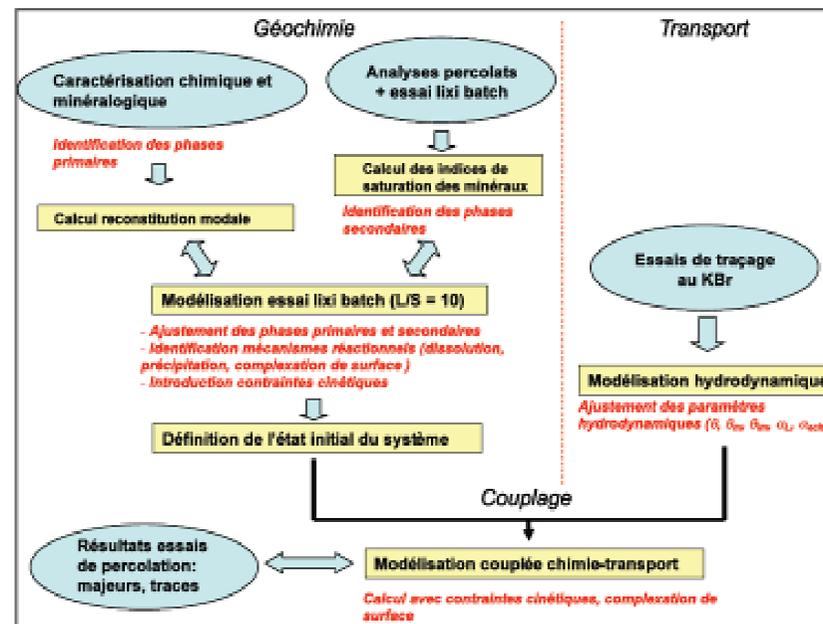


Figure 96. Représentation schématique de la démarche adoptée pour la modélisation géochimie-transport

-
- ◇ Le contexte et le procédé Novosol
 - ◇ Le projet SEDIBET
 - ◇ Contexte normatif
 - ◇ Valorisation des sédiments
 - ◇ Evaluation environnementale
 - ◇ Analyse socio-économique
 - ◇ Conclusions et perspectives

Analyse socio-économique

Faisabilité de la filière de valorisation: intérêt environnementale, économique, acceptation par le public.

Définition des contraintes socio-économiques: logistique, acceptabilité des sites...

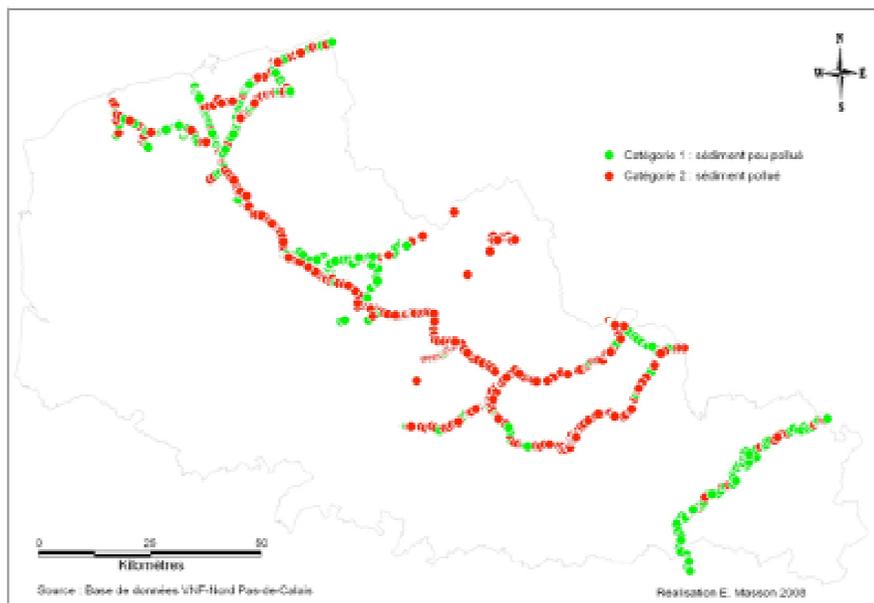


Figure 101. Localisation et statut des échantillons prélevés en voie navigable VNF

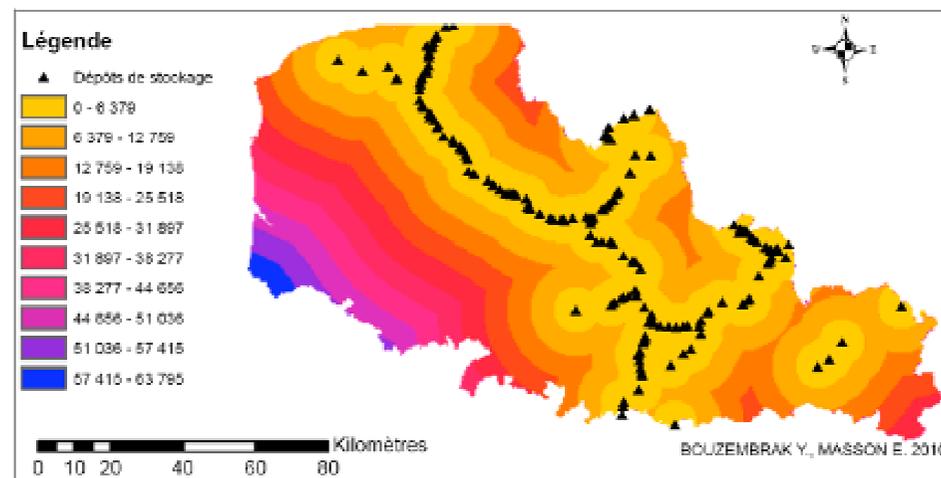


Figure 106. Eloignement des terrains de dépôts VNF (source : VNF, 2006)

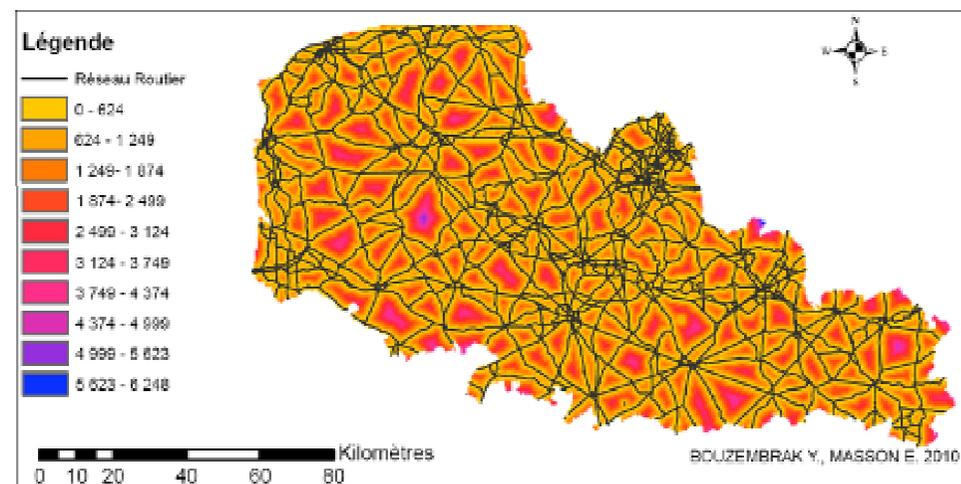


Figure 108. Eloignement au réseau routier (Source IGN BD Carto, 2006)

Analyse socio-économique

Définition des sites utilisables. Analyse du cycle de vie.

Débouche sur une étude de faisabilité au niveau régional de la mise en place de la filière.

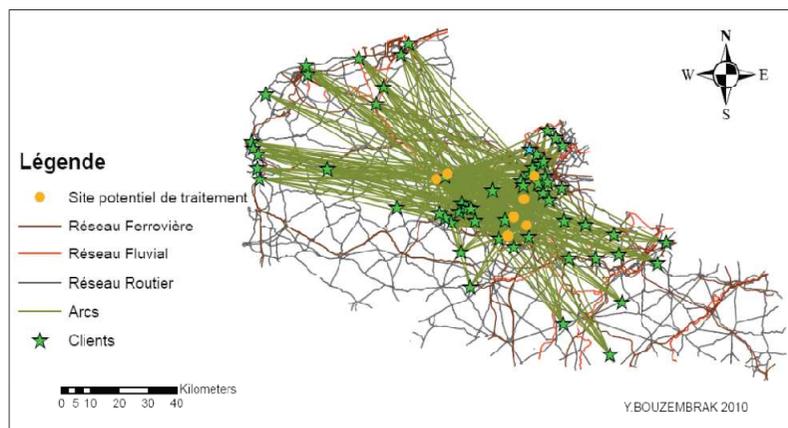


Figure 123. Arcs entre les sites de traitement et les clients

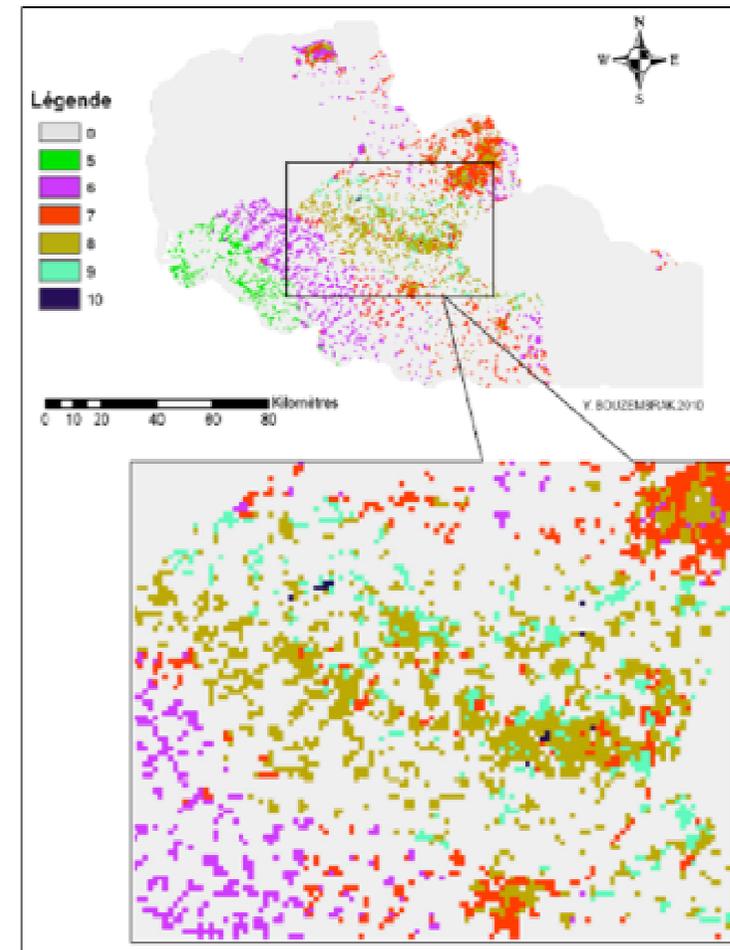


Figure 113. Localisation des sites des traitements (scénario 1)

-
- ◇ Le contexte et le procédé Novosol
 - ◇ Le projet SEDIBET
 - ◇ Contexte normatif
 - ◇ Valorisation des sédiments
 - ◇ Evaluation environnementale
 - ◇ Analyse socio-économique
 - ◇ Conclusions et perspectives

Conclusions et perspectives

- Mise en évidence de la faisabilité de la mise en œuvre de la filière « pavés »: conformité par rapport à la norme NF EN 1338, jusqu'à 80kg/m³.
- Faisabilité de la filière BAP: raffinement et diminution de la porosité, amélioration de la compacité de la pâte, conservation des caractéristiques mécaniques et de durabilité. L'étude des déformations différées de ce matériau montre que son utilisation au jeune âge nécessitera probablement l'utilisation de produits de cure afin d'éviter tout risque de fissuration.
- Faisabilité technique de la valorisation. Intérêts environnemental et économique avérés.
- **Le sédiment traité doit acquérir le statut de produit.**

→ Les verrous ne sont pas techniques.

Conclusions et perspectives

- Mise en évidence de la faisabilité de la mise en œuvre de la filière « pavés »: conformité par rapport à la norme NF EN 1338, jusqu'à 80kg/m³.
- Faisabilité de la filière BAP: raffinement et diminution de la porosité, amélioration de la compacité de la pâte, conservation des caractéristiques mécaniques et de durabilité. L'étude des déformations différées de ce matériau montre que son utilisation au jeune âge nécessitera probablement l'utilisation de produits de cure afin d'éviter tout risque de fissuration.
- Faisabilité technique de la valorisation. Intérêts environnemental et économique avérés.
- **Le sédiment traité doit acquérir le statut de produit.**

→ Les verrous ne sont pas techniques.

- Lancement d'une étude (Sédivalor 1) dans la région Nord- Pas de Calais pour tester la faisabilité d'une filière industrielle: elle s'accompagne d'une étude juridique (recherche du statut des sédiments) et d'une étude du montage économique de la filière.
- Poursuite des essais de caractérisation environnementale par percolation sur monolithe: nécessité de réduire les coûts et les délais de caractérisation qui sont un frein à l'industrialisation.

Merci pour votre attention

Projet SEDIBET



Liste des participants au projet SEDIBET

GeM (Ecole Centrale de Nantes):

- A. DARQUENNES
- E. ROZIERE
- A. LOUKILI (Correspondant ECNantes)

BRGM :

- H. VIGIER-GAILHANOU
- F. BODENAN
- P. PIANTONE (Correspondant BRGM)

LAMTI (Université de Béthune):

- E. ANT CZAK
- D. DEFER (Correspondant Univ Béthune)

ARMINES (Ecole des Mines de Douai):

- C. GARDES
- D. DAMIDOT (Correspondant EM Douai)

USTL :

- H. ALI AOUI
- H. MELIN
- E. MASSON
- O. BLANPAIN (Correspondant USTL)

SOLVAY :

- K. HARDY
- P. FERRIN
- G. DEPELSENAIRE (Correspondant SOLVAY)

CERIB :

- K. MEHIRI
- S. DEHAUDI (Correspondant CERIB)

LML (Ecole Centrale de Lille):

- Y. HAN
- M. SAMARA
- F. AGOSTINI
- F. SKOCZYLAS (Correspondant ECLille)
- Z. LAFHAJ (Coordinateur SEDIBET)

