

Paris, 03 décembre 2008

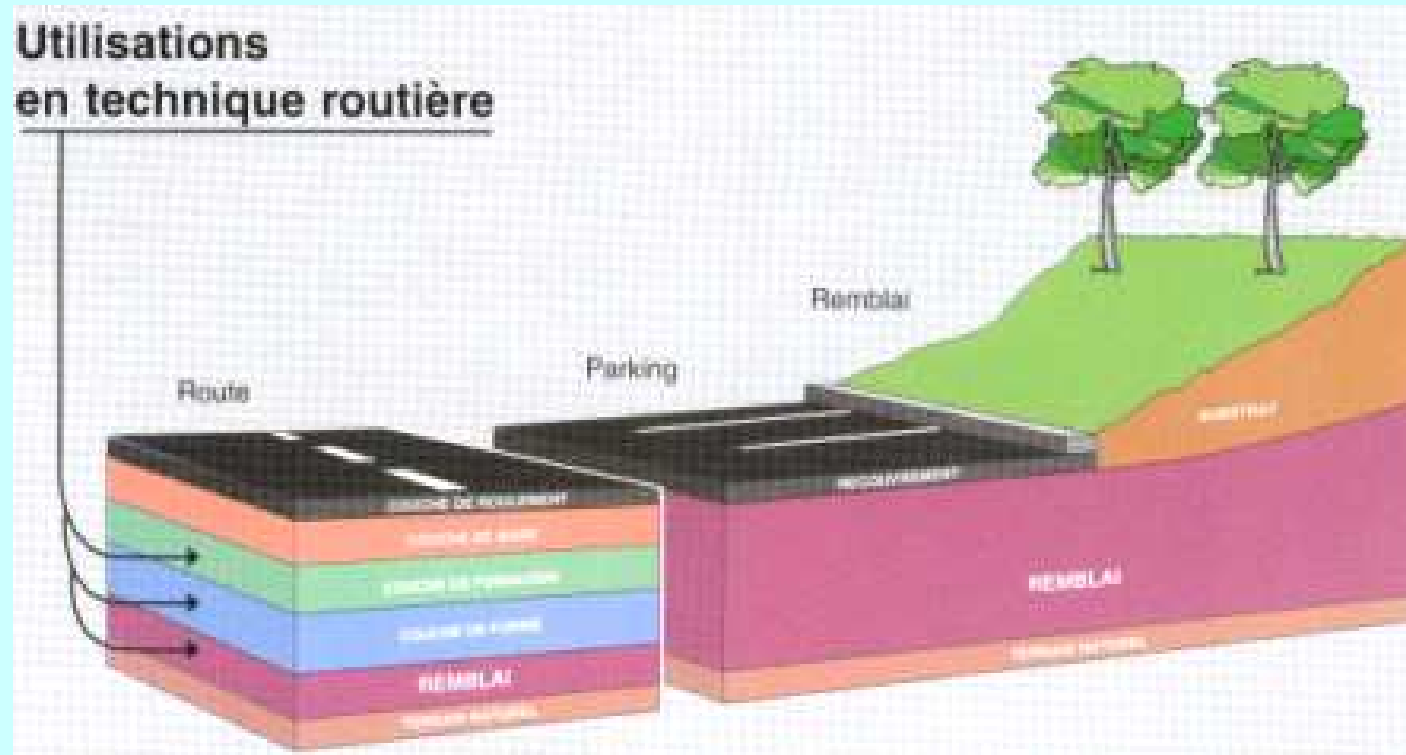
## Valorisation des sédiments marins en Technique routière



Port Ouest de Dunkerque

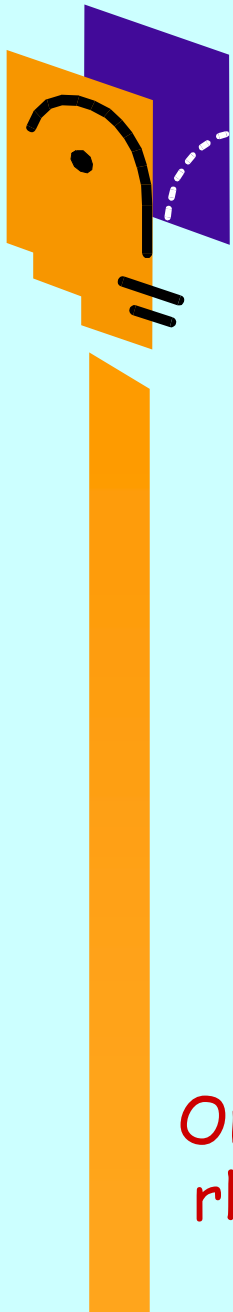
# Possibilité de valorisation

## Réalisation d'une grave routière à base des sédiments



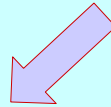
Conditions : critères de pollution, de mise en œuvre, de résistance mécanique, et d'économie.

# Méthodologie générale de valorisation des déchets

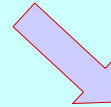


Etude du comportement mécanique des matériaux granulaires

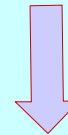
naturels



issus de sous  
produits industriels



Risque environnemental  
due au « relargage » non  
maîtrisé d'espèce polluantes



On cherche à étudier, en particulier, les conséquences rhéologiques et mécaniques en terme de durabilité et d'usage Transfert)

# Schéma d'étude

## ① Caractérisations des sédiments

Analyses chimiques et  
minéralogiques

Potentiel polluant

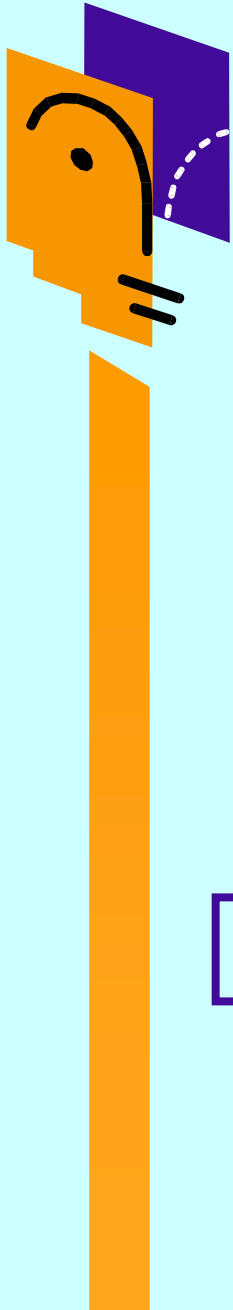
Analyses physiques et  
géotechniques

Possibilités d'emploi en techniques routières

## ② Formulation de la grave routière à base des SPI

## ③ Résultats des performances mécaniques

**VALORISATION**



# Caractérisation du sable de dragage

## Analyses chimiques et minéralogiques

- Spectromètre à Fluorescence X

Détermination quantitative de la composition chimique

CO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	TiO <sub>2</sub>	Total
5,0	79,9	8,7	2,2	0,8	0,8	0,6	0,7	0,2	0,02	0,06	99

- Diffraction aux rayons X

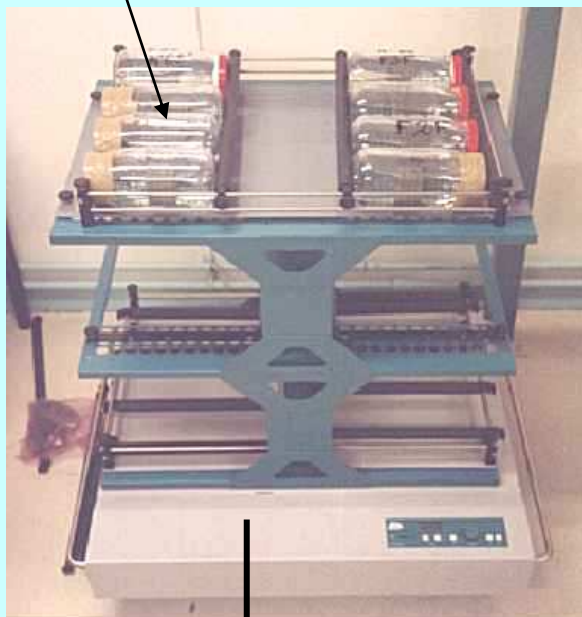
Détermination qualitative de la composition minéralogique

- Quartz en grande quantité
- Calcite CaCO<sub>3</sub>
- Traces de CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, d'alcalins Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O.

# Caractérisation du sable de dragage

## Vérification du caractère non polluant: test de lixiviation X31-210

Sable



Mise en contact de 100 grammes de sable avec 1l d'eau pendant 3×16 h à l'aide d'un agitateur va-et-vient

Analyse de l'eau (= le lixiviat)

en mg/kg	Extraction après 3 ×16h	Valorisation d'un mâchefer
COT	140	<1500
SO4--	<790	<10000
Cr VI	<0.6	<1.5
As	<0.07	<2
Cd	<0.3	<1
Hg	<0.03	<0.2
Pb	<6	<10



# Caractérisation du sable de dragage

---

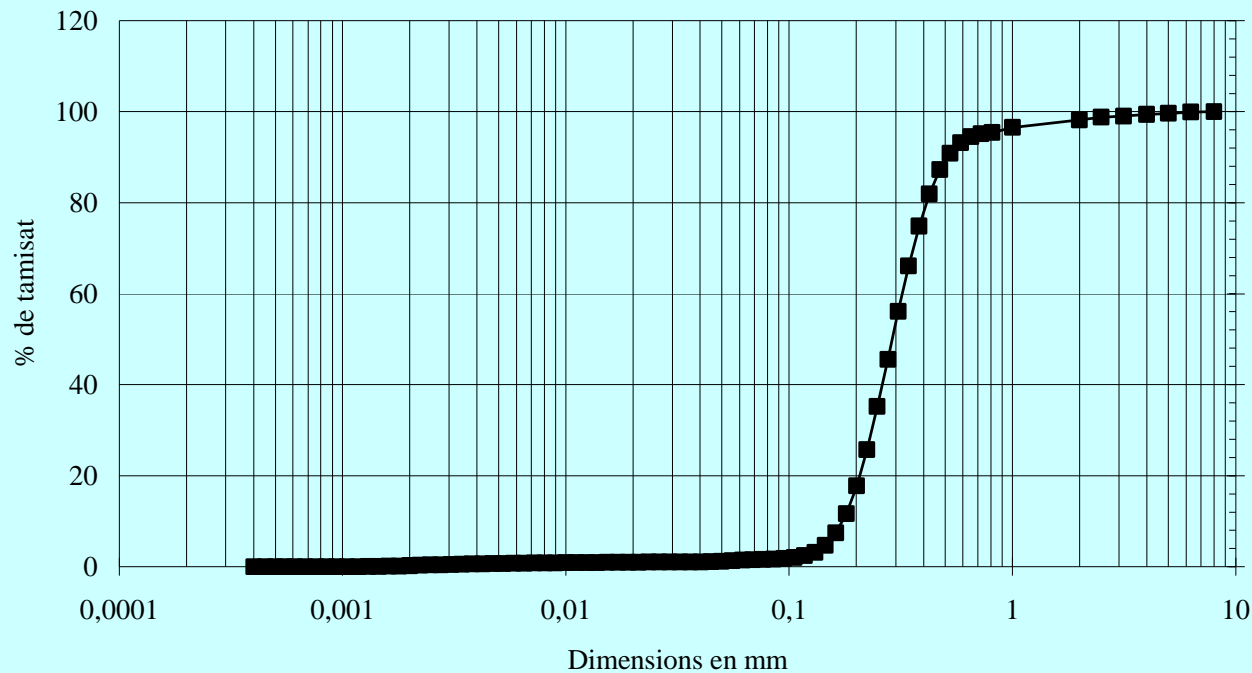
## Analyses physiques et géotechniques

Les paramètres retenus sont définis dans le guide « Réalisation des remblais et couches de forme » (SETRA).

- Propriétés physiques : masse volumique absolue = 2.62 t/m<sup>3</sup>  
masse volumique apparente = 1.41 t/m<sup>3</sup>
- Propriétés d'état : teneur en eau w% = 5.5 (NFP 94-049)
- Propriétés de nature :  $\left. \begin{array}{l} \text{propreté } E_{qS} = 82.4 \\ E_{qV} = 93.8 \end{array} \right\} \text{ (NFP 18-598)}$   
VB = 0.1 (NFP 18-592)

# Caractérisation du sable de dragage

## Granulométrie (NFP 94-056)

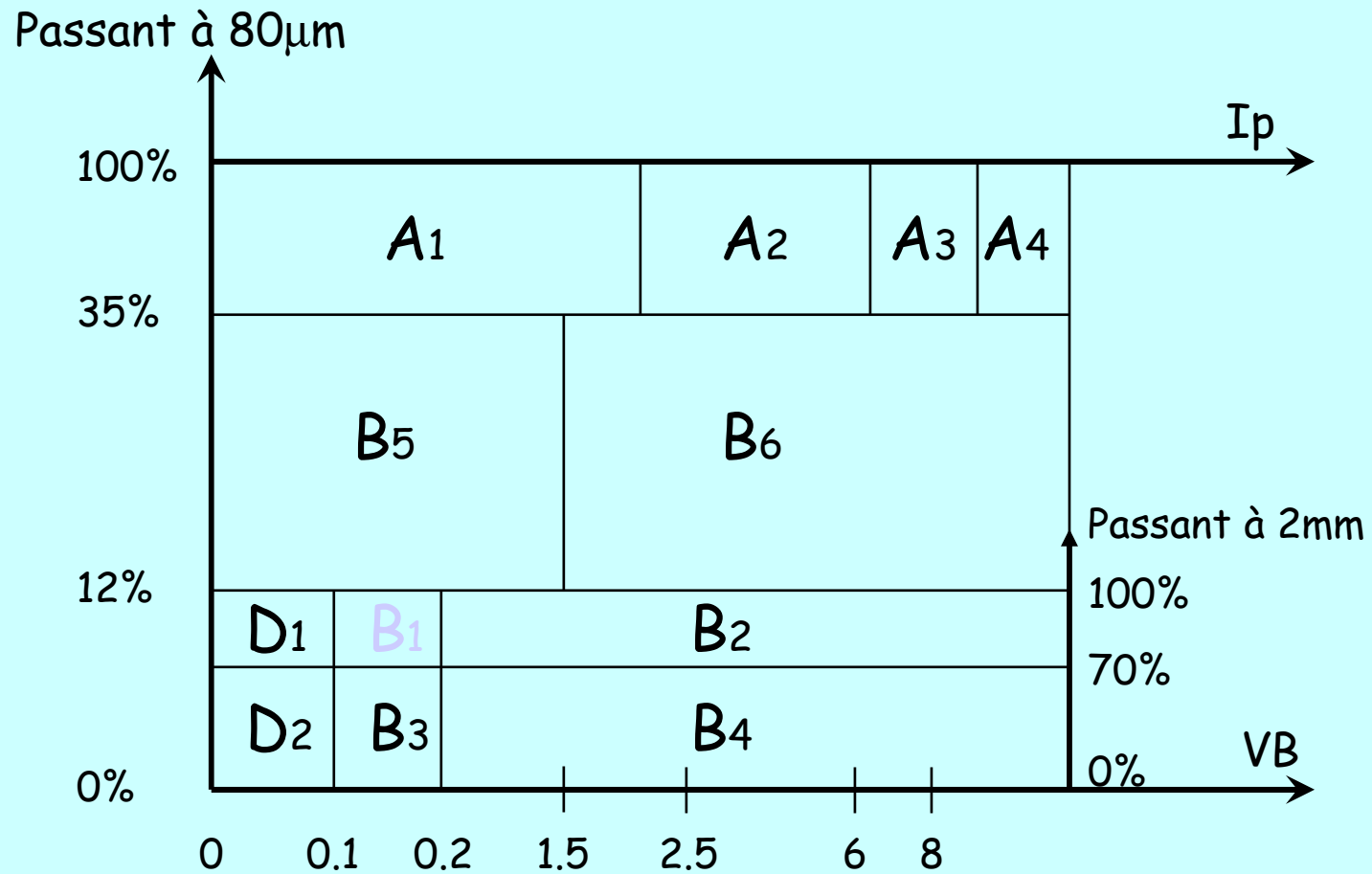


- Module de finesse : 0.9
- Tamisât à 2 mm : 97% (>70% sol à tendance sableuse)
- Tamisât à 80 µm : 2% (<12% matériau sableux, pauvre en fines)



# Caractérisation du sable de dragage

## Classement du sable d'après le guide technique





# Caractérisation du sable de dragage

---

## Conclusions à la vue de ces analyses

- **Sable peu pollué**, pouvant être valorisé en grave routière.
- **Classement B1** : « matériaux sableux généralement insensibles à l'eau. Mais, dans certains cas (extraction dans la nappe...) cette insensibilité devra être confirmée) ».
- **Granulométrie très serrée** : 90% des grains ont un diamètre compris entre 0.1 et 0.5 mm.
  - compacité, IPI, et résistance mécanique du sable seul certainement insuffisants
  - l'utilisation d'un matériau correcteur et un traitement aux liants sont certainement nécessaires.



# Formulation d'une grave à base de sable

---

## Principe d'étude

- Identification des constituants pressentis pour l'étude.
- Recherche des proportions relatives des différents constituants pour atteindre un mélange s'inscrivant dans un fuseau bien défini par des normes.
- Recherche d'un liant et de son dosage permettant d'obtenir des caractéristiques mécaniques en fonction des sollicitations futures de la chaussée.
- Etude du comportement au compactage (essai Proctor modifié) des mélanges susceptibles de répondre à l'objectif visé (Norme NFP 94-093).
- Obtention d'un Indice Portant Immédiat suffisamment élevé (compactabilité et traficabilité).



# Formulation d'une grave à base de sable

---

## Principe d'étude (suite)

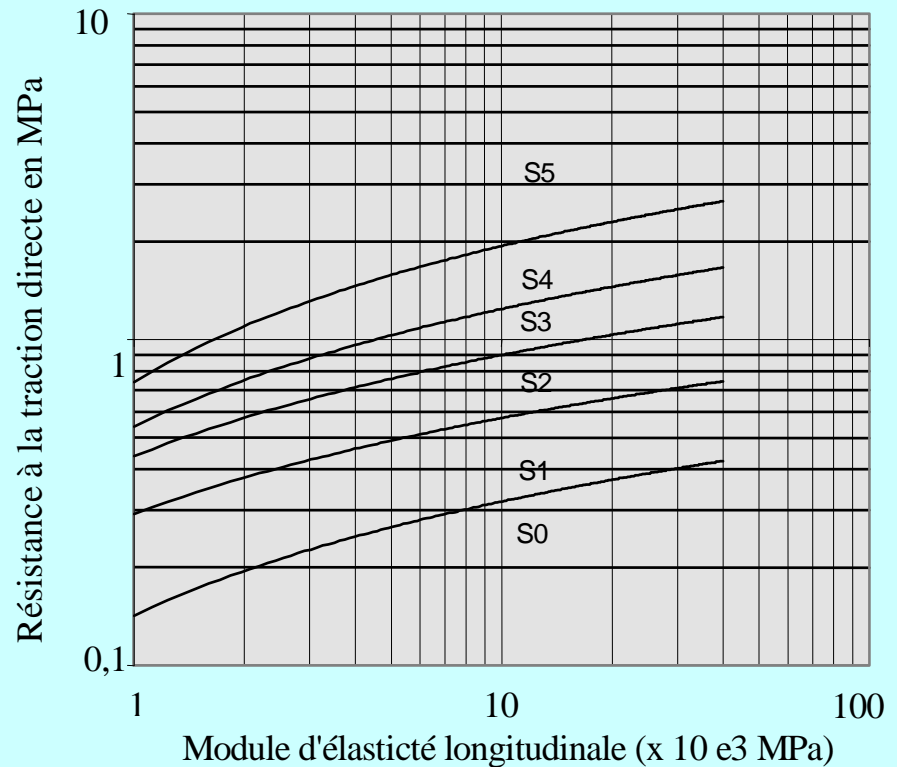
- Moulage d'éprouvettes  $\varnothing 16 \times 32$  cm par vibro-compression, à l'optimum Proctor modifié pour essais de traction directe à différents âges.
- Essai de traction directe après un délai de durcissement dépendant de la nature du liant, avec mesure du module d'élasticité de la grave (Norme NFP 98-114-2).
- Extrapolation des résultats d'essais ci-dessus définis à l'échéance d'un an grâce à des coefficients empiriques donnés par les normes en fonction du liant utilisé.

# Formulation d'une grave à base de sable

## Principe d'étude (suite)

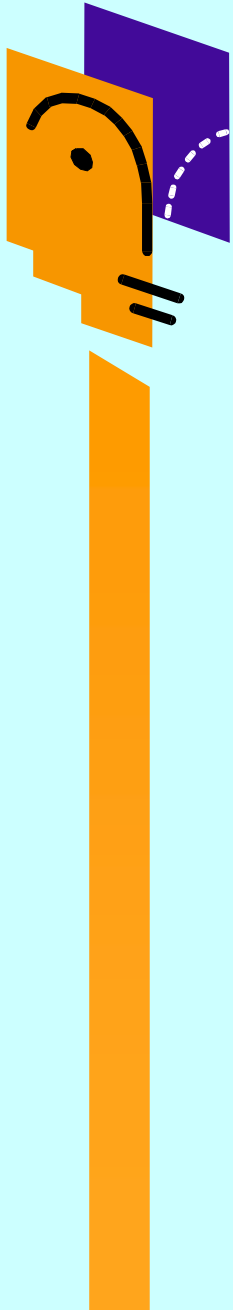
- Classement de la grave obtenue d'après des zones sur un graphique propre à chaque type de grave. (Norme NFP 98-230-2)

Pour un sable traité aux liants hydrauliques



- Etude de sensibilité au voisinage de l'optimum Proctor (variations de la teneur en eau, de la densité, du dosage en liant...).

# Présentation des essais



Essai Proctor :  
comportement  
au compactage



Mesure IPI : mesure de la  
stabilité immédiate



- . Caractérisation de l'aptitude à être porté à une densité élevée (compactabilité)
- . Mesure de la déformation au jeune age



Traction directe :  
détermination de la  
classe de résistance

# Rappels sur les caractéristiques à obtenir

## Critères de compactabilité

Chaussée

Couche de base

Couche fondation

Couche de forme

IPI moyen = 45, IPI mini= 35

IPI moyen = 35, IPI mini= 25

Pas d'indication

## Critères de résistance mécanique

Chaussée

Couche de base

Couche fondation

Couche de forme

Classe  $\geq S_2$

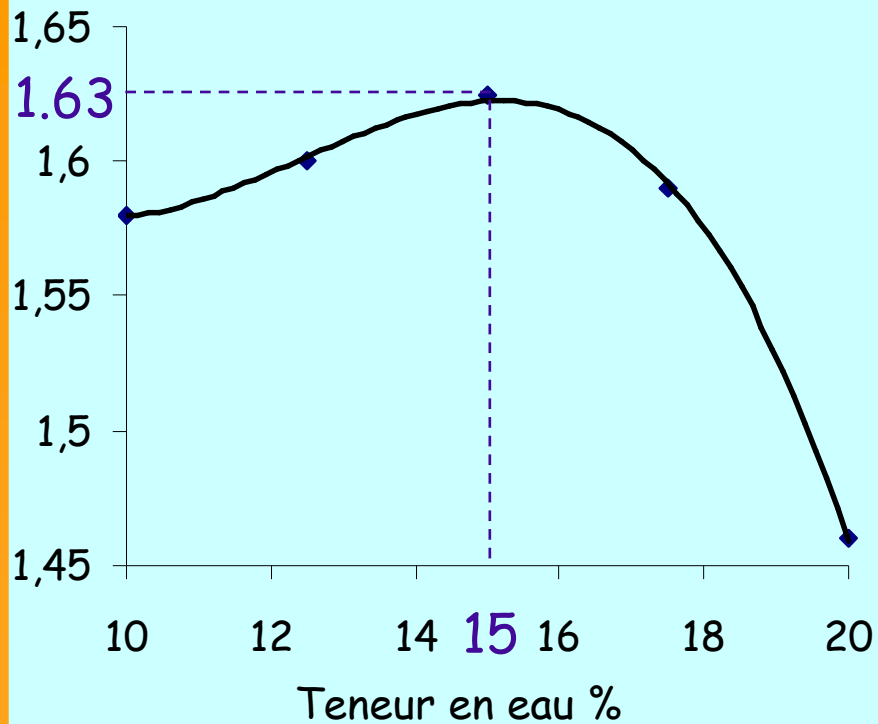
Pas d'indication

# Résultats sur sable seul

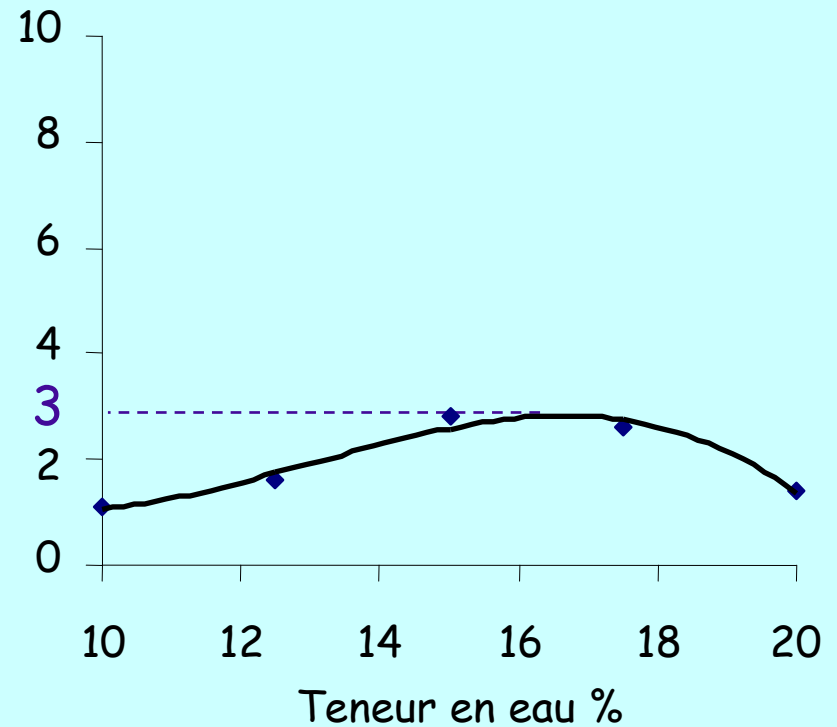
● Courbe Proctor Modifié

● Courbe IPI

Densité sèche (t/m<sup>3</sup>)



IPI



**Il faut faire appel à des matériaux correcteurs**



# Résultats obtenus sur les différentes formulations

- Tableau récapitulatif

	Sable dragage %	Sable du Boulonnais 0/4 %	Ciment CLK %	Cendres volantes %	Filler Boulonnais %	Boulonnais 0/15 mm %	W optimum %	Densité sèche max	I.P.I max
A	100						15	1,63	3
B	72	21	7				10	1,84	33
C	67	20	4	9			11,9	1,90	15
D	60	30	10				8,9	1,95	55
E	52	40	8				8,6	2,01	58
F	62	20	8		10		10,3	1,92	28
G	71		4			25	11	1,80	8
H	45	45	10				8,1	2,00	32
J	55	25	10				8,2	1,84	13

- Dosage en liant : entre 5 et 7% pour un sable fin, jusque 10% pour un sable moyen.
- Fil directeur de la démarche : acquisition d'un IPI satisfaisant.



## Premières conclusions sur les formulations

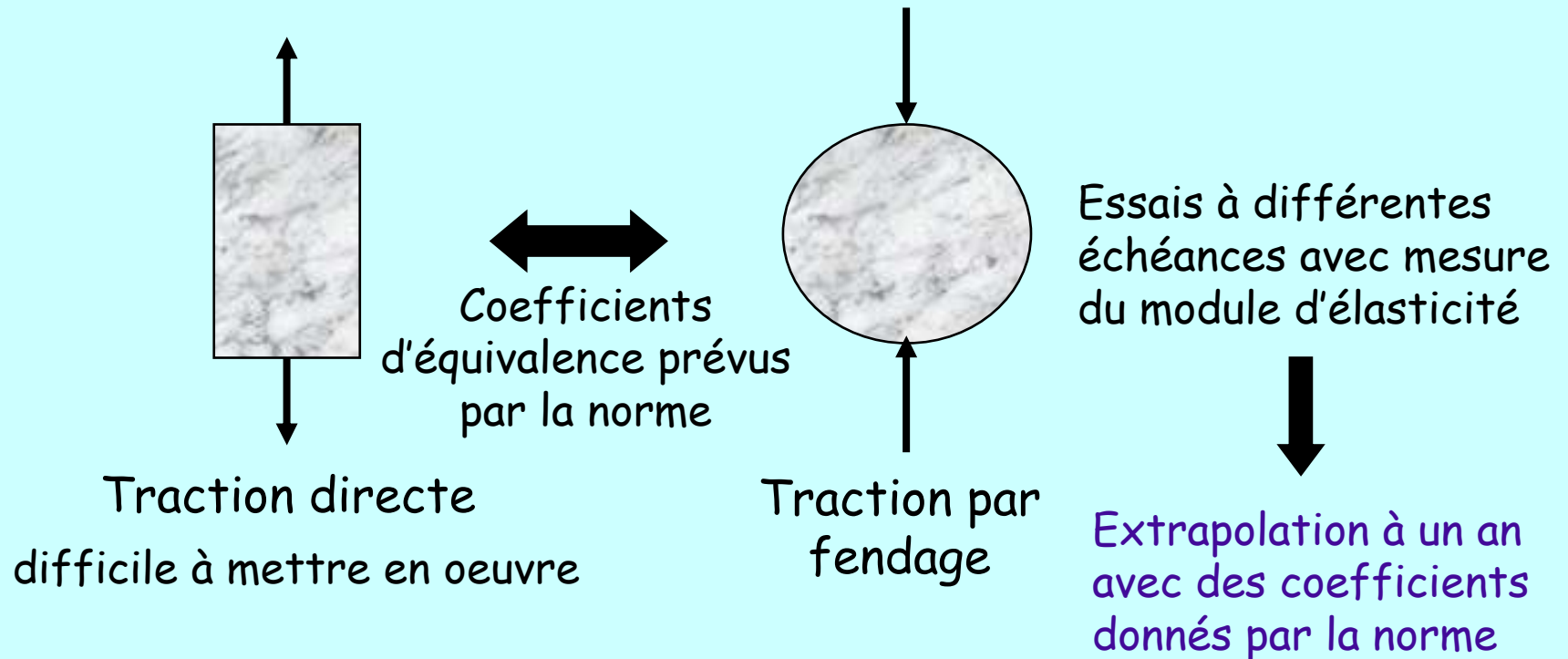
---

- Intérêt de l'ajout d'un sable 0/4 mm en tant que correcteur granulaire à la fois en densité sèche et sur l'IPI. Les sensibilités à l'eau (petite variation de la teneur en eau) sont peu différentes.
- La sensibilité à l'eau diminue si on utilise des fines, mais dans ce cas, on n'atteint pas des résultats aussi bons que ceux obtenus par les meilleures formulations à base de 0/4 du Boulonnais.
- 3 formules se distinguent:
  - E : 52% de sable de dragage, 40% de sable 0/4 mm, 8% de CEM III/C,
  - D : 60% de sable de dragage, 30% de sable 0/4 mm, 10% de CEM III/C,
  - B : 72% de sable de dragage, 21% de sable 0/4 mm, 7% de CEM III/C.
- **Remarque:** privilégier la revalorisation du sable à l'inscription dans le fuseau granulométrique recommandé pour les graves 0/20 mm.

# Recherche des performances mécaniques

- Moulage par vibro-compression d'éprouvettes  $\phi 16$  et h32 avec une zone centrale réduite.

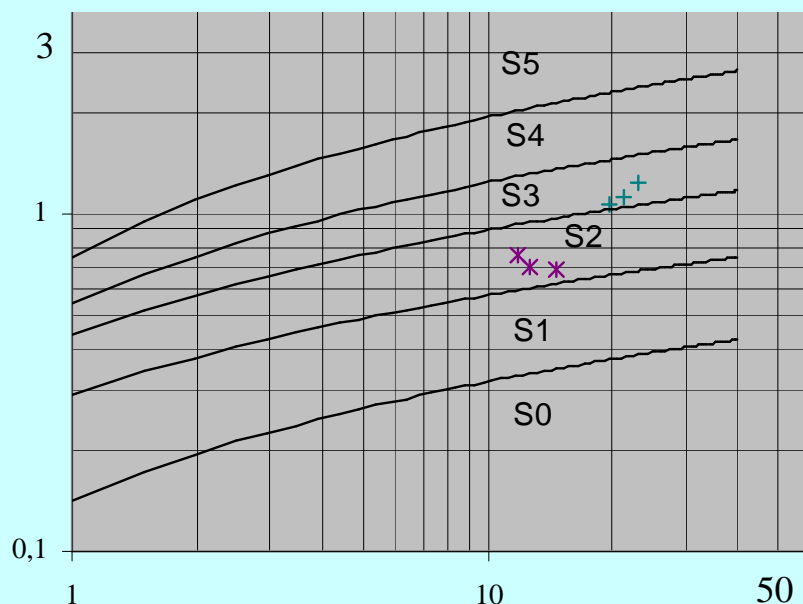
- Essais de traction (NFP 98-114-2) :



## Résultats des performances mécaniques

- Une approche rapide (éprouvette  $\phi 5$  et  $h10$  obtenues en compression statique) a montré que le mélange à base de 40% de sable de dragage et 8% de ciment pouvait être éliminé.

- Pour les deux autres mélanges:



— Mélange 60/30/10

— Mélange 72/21/7

- Résultats à analyser d'un point de vue mécanique et d'un point de vue économique. La classe S2 est suffisante donc la formule 72/21/7 est plus avantageuse.

# Sensibilité aux paramètres

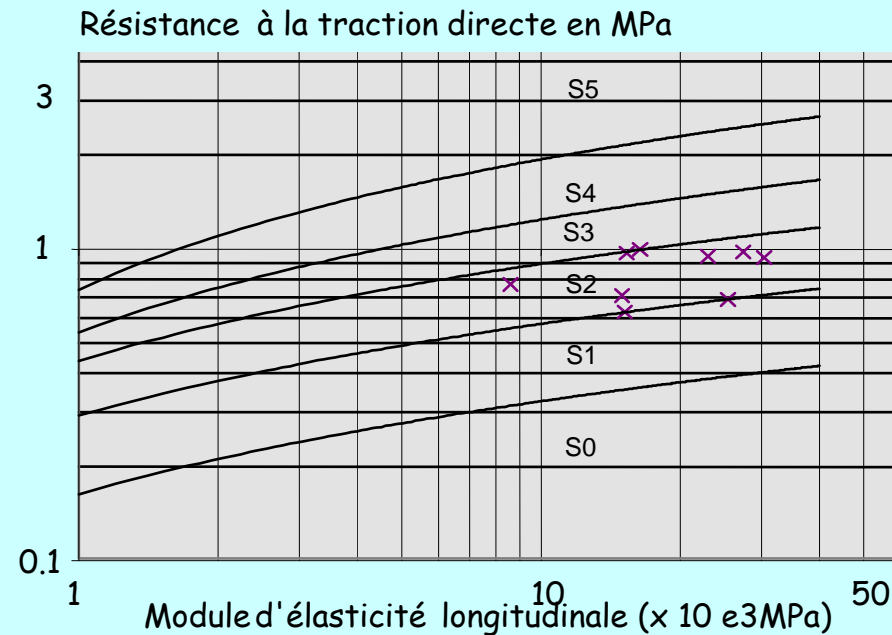
## ● Etudes réalisées

$$\gamma_d = 0.95 \times \gamma_{dref}$$
$$\gamma_d = 1.02 \times \gamma_{dref}$$

$$l = 0.8 \times l_{iant}$$
$$l = 1.2 \times l_{iant}$$

$$W = W_{ref} - 1\%$$
$$W = W_{ref} + 0.5\%$$

## ● Résultats



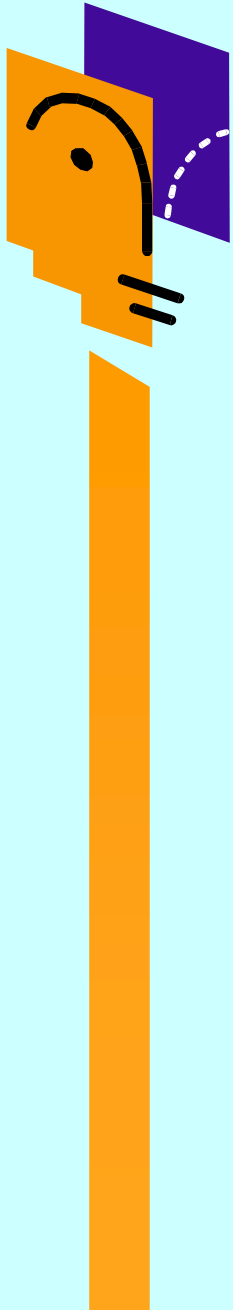
Faible sensibilité aux paramètres :  
tous les résultats restent en classe S2

# Conclusions à l'étude

---

## Un résumé de l'étude

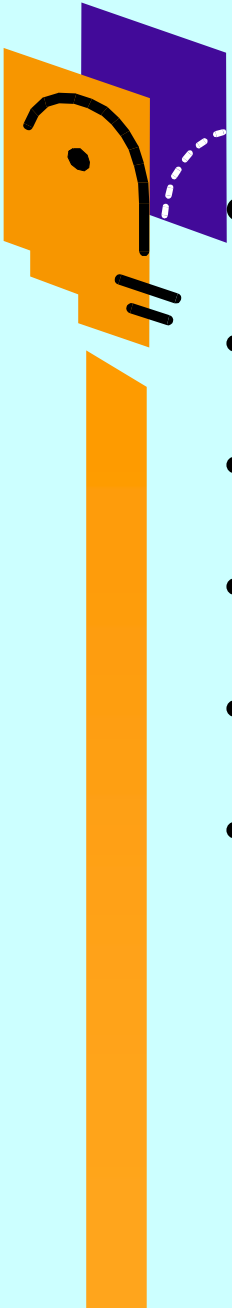
- **Un constat** : le Port Autonome de Dunkerque dispose annuellement d'une quantité considérable de sable extrait de l'avant-port pour éviter son ensablement.
- **Une possibilité de valorisation** : la fabrication d'une grave routière à utiliser dans la structure d'assise d'une chaussée.
- Cette étude montre **la faisabilité** d'un tel projet et propose une formulation répondant aux principaux critères requis (pollution, mise en œuvre, résistance, économie).
- **Perspectives** : voir les possibilités d'utilisation de liants routiers moins onéreux (exemple: liant ROC AS).



***Planche expérimentale  
du Port Autonome de Dunkerque***

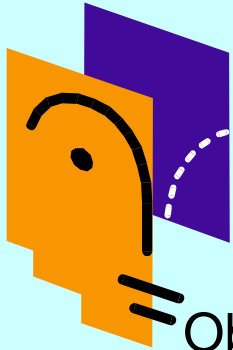


# PLAN

- 
- 
- **Présentation**
  - **Chantier**
  - **Campagne d'essais à 180 j**
  - **Campagne d'essais à 285 j**
  - **Déflexions**
  - **Poursuite du suivi**



# PRESENTATION



Objectif : Valider l'étude en laboratoire de la valorisation des sédiments marins peu pollués en technique routière

Lieu de prélèvement : Port Autonome de Dunkerque

Formulation choisie (proportion en laboratoire visées) :  
32,4% de sédiments (comprenant 63,3% de particules inférieures à 63  $\mu\text{m}$ ), 60,2% de sable de dragage, 1,85% de chaux et 5,55% de ciment

Teneur en eau optimale = 11,6%

Masse volumique sèche optimale = 1960  $\text{kg/m}^3$

# PRESENTATION



Dépôt de sédiments



Planche expérimentale

Port Ouest

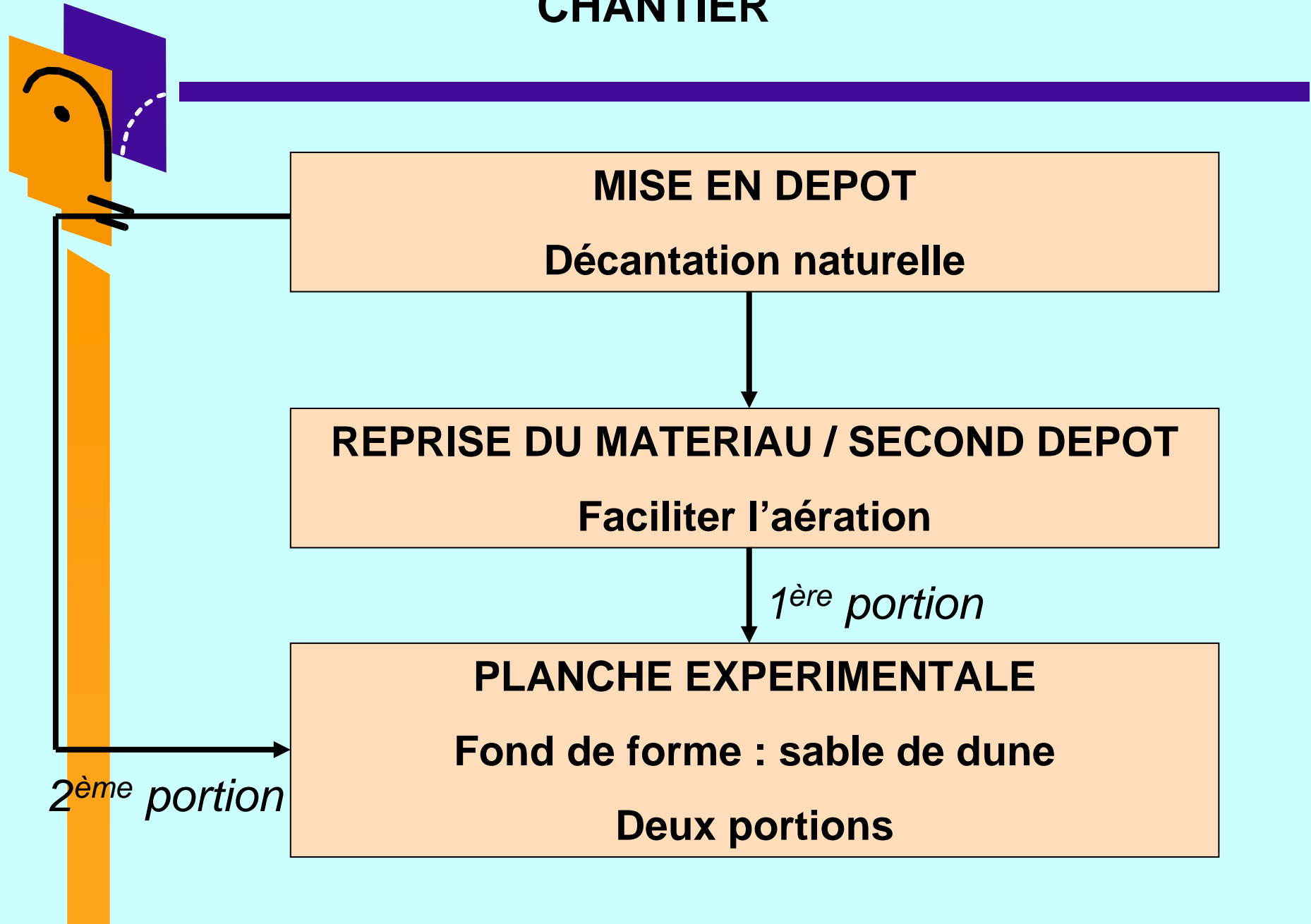


Surface estimée du dépôt :  
300-400 m<sup>2</sup>

Mise en dépôt : fin juin 2005

Réalisation de la planche  
expérimentale : 4-6 octobre 2005

# CHANTIER



# CHANTIER

## Chantier : 4 au 6 octobre 2005

- Phase 1 = démolition (J1)
- Phase 2 = mélange sédiments + sable (J2)
- Phase 3 = traitement à la chaux (J2)
- Phase 4 = traitement au ciment (J3)
- Phase 5 = Enduit gravillonné (J3)



**Homogénéisation du mélange sédiments + sable**



**Malaxeur Épandeur**



**Traitement à la chaux et au ciment**

# CHANTIER



**Traitements à la chaux et au ciment**



**Compactage**



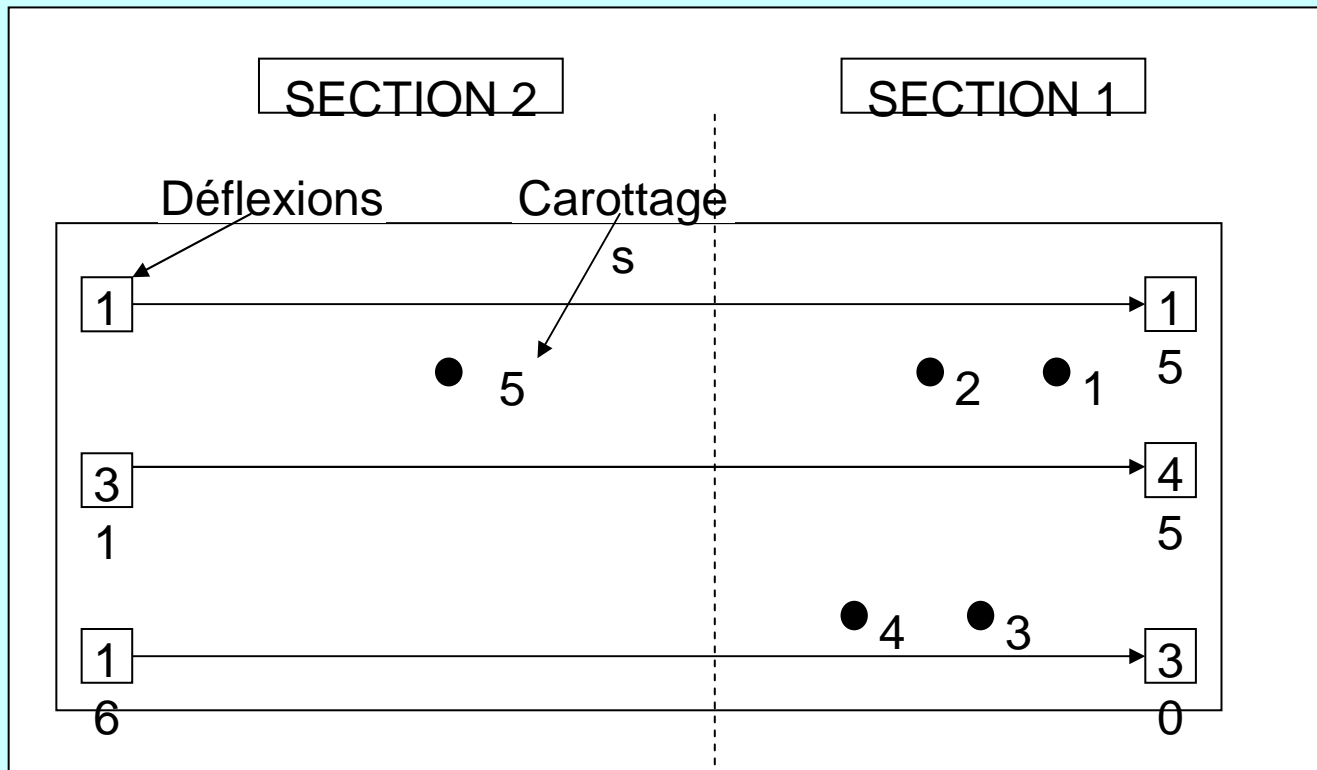
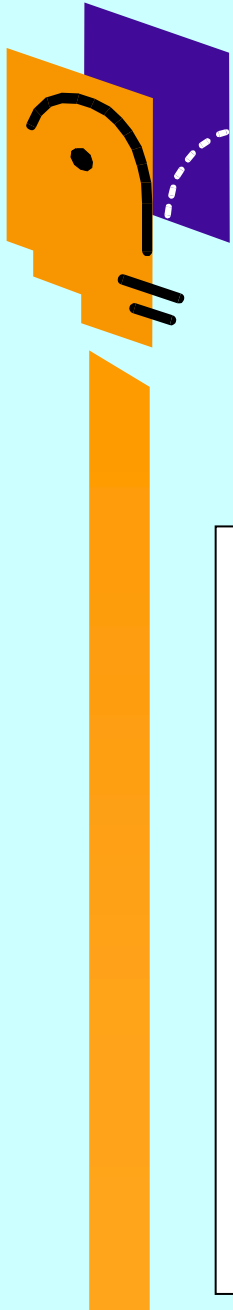
**Enduit gravillonné**

Mesures au gamma densimètre

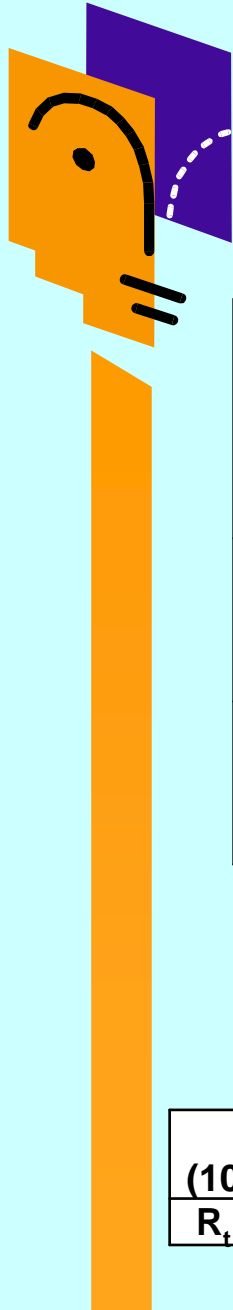
- ✓  $w$  entre 8,4 et 11,4 %
- ✓  $\rho_d$  entre 1,82 et 1,96 t/m<sup>3</sup>

—————→ Bon niveau de densité

# CAMPAGNE D'ESSAIS A 180 JOURS



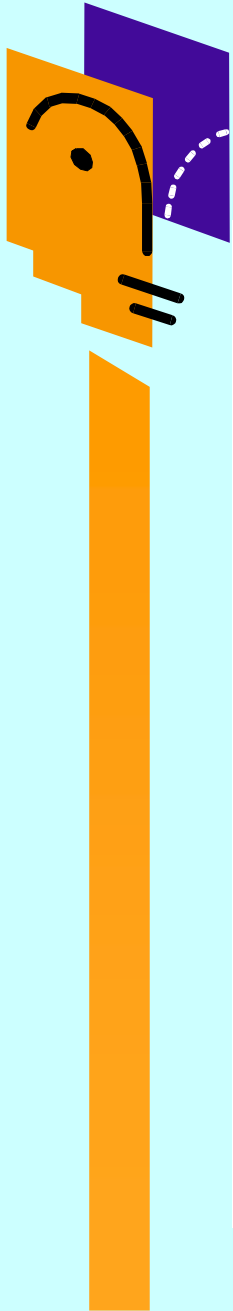
## CAMPAGNE D'ESSAIS A 180 JOURS



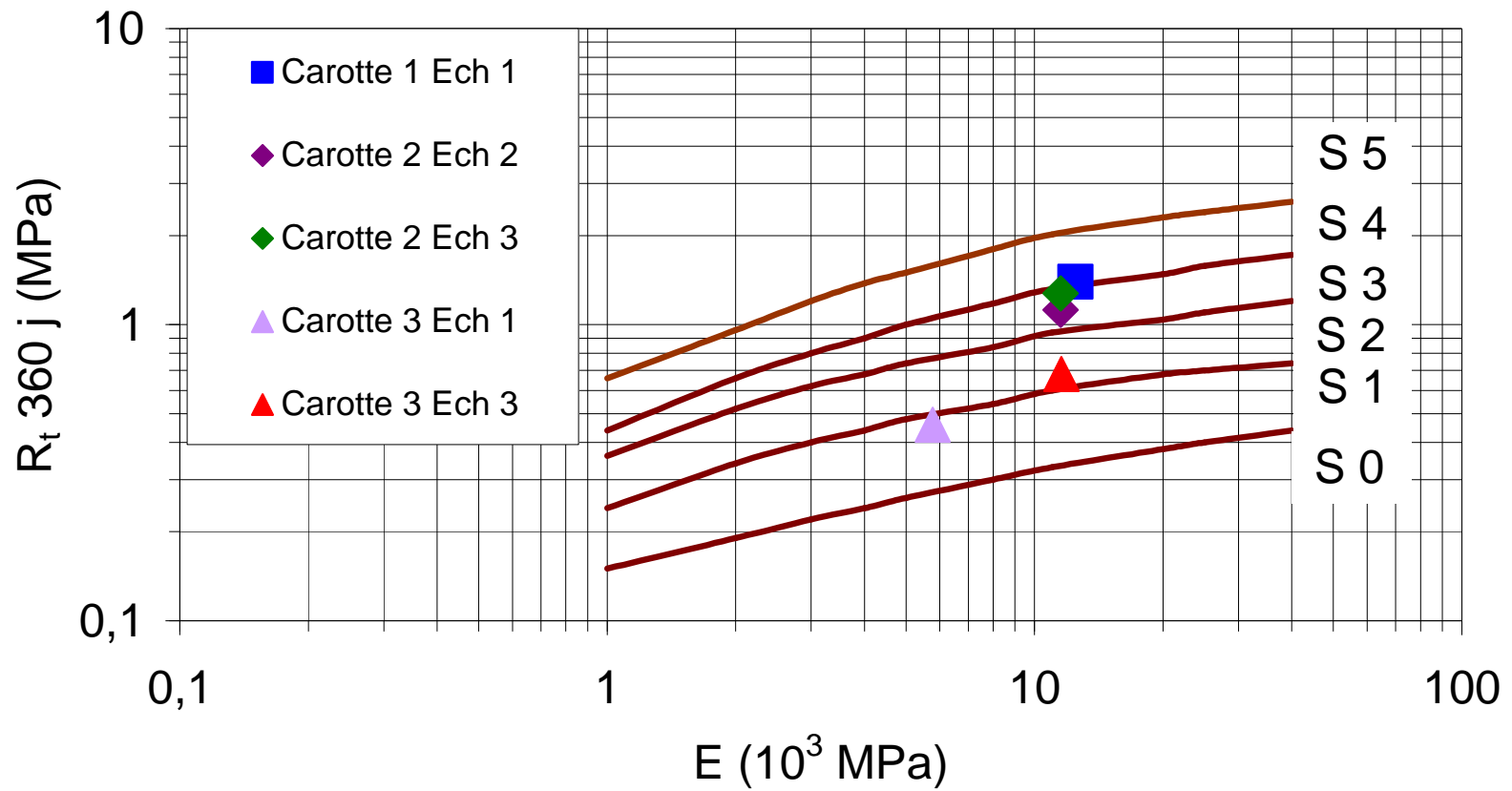
		h (cm)	Ø (cm)	Masse (g)	w (%)	ρ <sub>d</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Compacité (%)
Carotte 1	Ech 1	7,5	4,9	301,0	5,7	2012,4	75,9
	Ech 2	Cassée					
	Ech 3	9,5	4,8	362,0	Pas de mesur e	1991,3 (avec w% <sub>C11</sub> )	75,1
Carotte 2	Ech 1	Cassée					
	Ech 2	9,1	4,7	341,6	8,5	1994,1	75,2
	Ech 3	9,3	4,7	346,9	8,3	1985,2	74,9
Carotte 3	Ech 1	8,0	4,7	292,8	9,2	1931,7	72,9
	Ech 2	9,3	4,8	349,1	10,9	1967,2	74,2
	Ech 3	8,2	4,7	306,0	10,2	1951,4	73,6

	Carotte 1	Carotte 2		Carotte 3		Total		Tous sauf Carotte 3 Ech 1	
	Ech 1	Ech 2	Ech 3	Ech 1	Ech 3	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
E (10 <sup>3</sup> MPa)	12,47	11,5	11,5	5,78	11,56	10,57	2,7	11,7	0,471
R <sub>t</sub> (MPa)	1,4	1,12	1,27	0,46	0,68	0,98	0,4	1,12	0,31

# CAMPAGNE D'ESSAIS A 180 JOURS

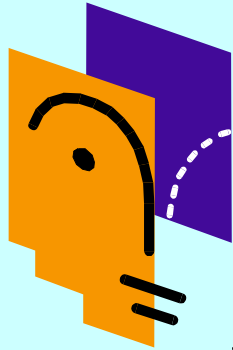


Avril 2006





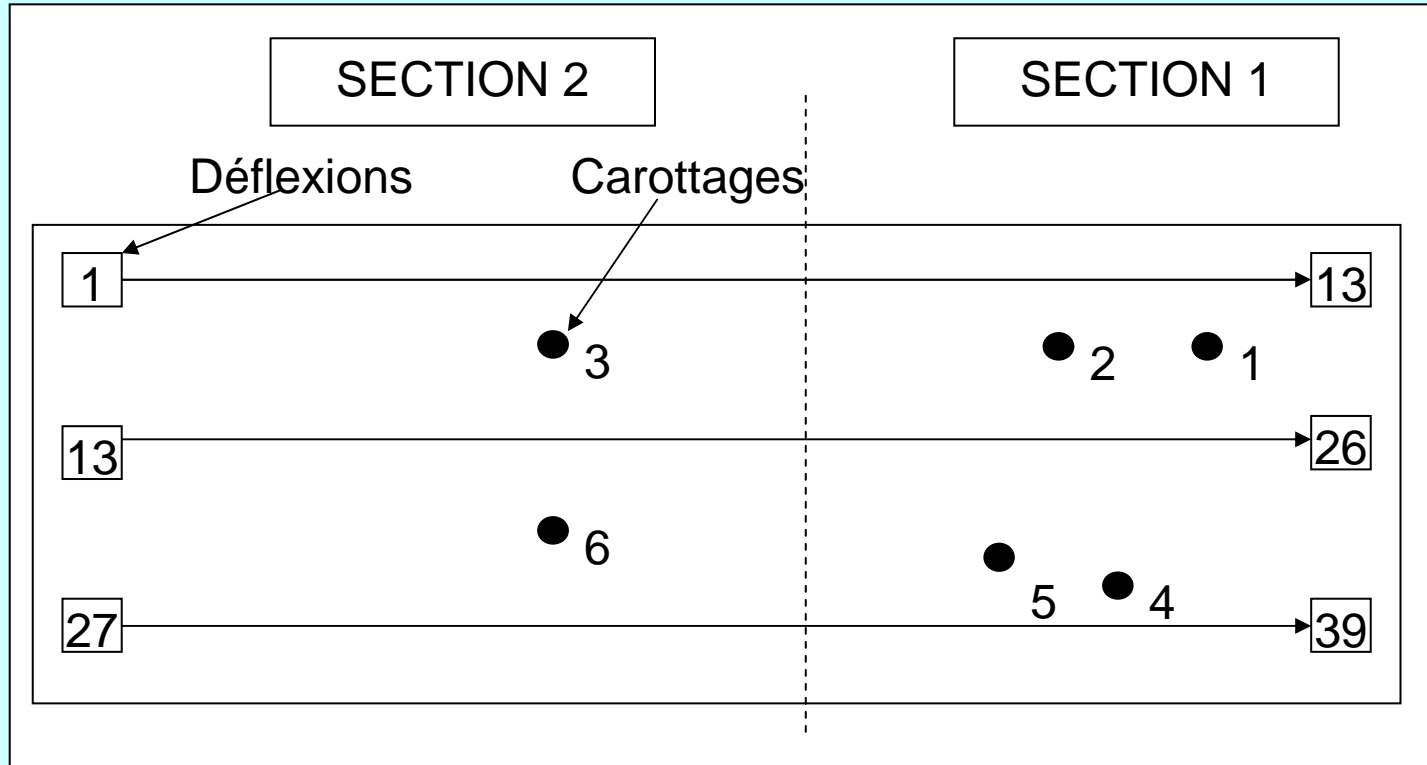
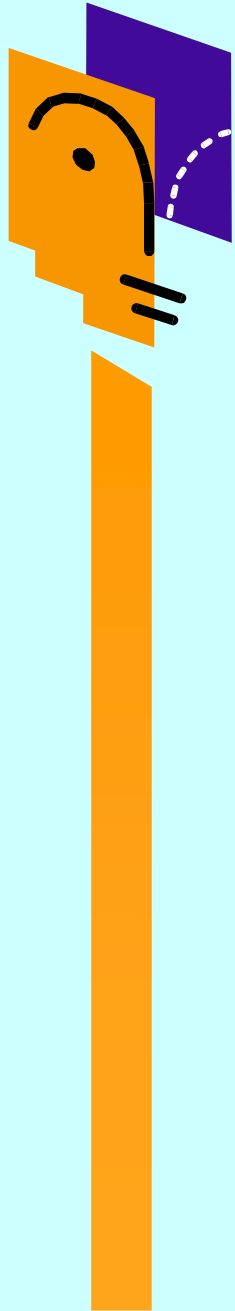
# CAMPAGNE D'ESSAIS A 180 JOURS



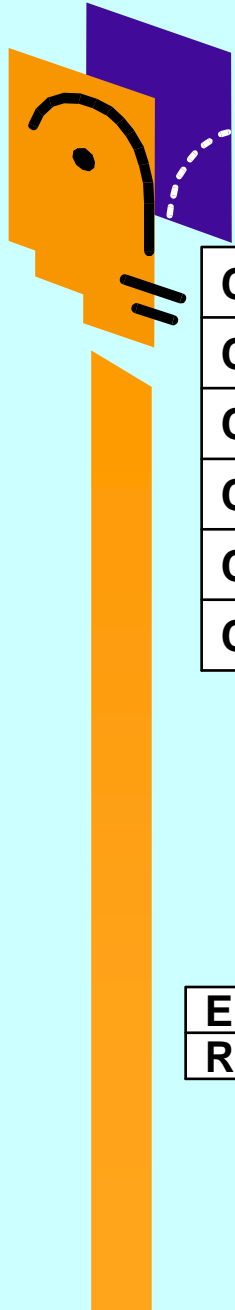
		Proportion (mg/kg de la masse sèche)						
		As	Ba	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo
Section n 1	Echantillon monolithique	0,024	0,017	< 0.01	< 0.01	0,16	< 0.01	0,017
	Echantillon broyé	0,036	0,020	< 0.01	0,013	0,9	<b><u>0,018</u></b>	0,012
Section n 2	Echantillon broyé	0,027	0,013	< 0.01	0,378	0,112	<b><u>0,011</u></b>	0,022
<b>Seuils correspondant à la limite classe 3 - classe 2</b>		<b>&lt; 0.5</b>	<b>&lt; 20</b>	<b>&lt; 0.04</b>	<b>&lt; 0.5</b>	<b>&lt; 2</b>	<b>&lt; 0.01</b>	<b>&lt; 0.5</b>
<b>Seuils correspondant à la limite classe 2 - classe 1</b>		<b>&lt; 2</b>	<b>&lt; 100</b>	<b>&lt; 1</b>	<b>&lt; 10</b>	<b>&lt; 50</b>	<b>&lt; 0.2</b>	<b>&lt; 10</b>

		Proportion (mg/kg de la masse sèche)							
		Phenols	Ni	Pb	Sb	Se	Zn	Fluorures	Carbone Organique Total
Section 1	Echantillon monolithique	< 0.5	0,04	< 0.01	< 0.01	0,013	0,017	2,4	34,1
	Echantillon broyé	< 0.5	0,32	0,02	0,011	0.01	0,06	<b><u>11</u></b>	223,8
Section 2	Echantillon broyé	< 0.5	0,169	0,054	0,023	0,012	0,31	7,5	102
<b>Seuils correspondant à la limite classe 3 - classe 2</b>		<b>&lt; 1</b>	<b>&lt; 0.4</b>	<b>&lt; 0.5</b>	<b>&lt; 0.06</b>	<b>&lt; 0.1</b>	<b>&lt; 4</b>	<b>&lt; 10</b>	<b>&lt; 500</b>
<b>Seuils correspondant à la limite classe 2 - classe 1</b>		<b>&lt; 50</b>	<b>&lt; 10</b>	<b>&lt; 10</b>	<b>&lt; 0.7</b>	<b>&lt; 0.5</b>	<b>&lt; 50</b>	<b>&lt; 150</b>	<b>&lt; 800</b>

# CAMPAGNE D'ESSAIS A 285 JOURS



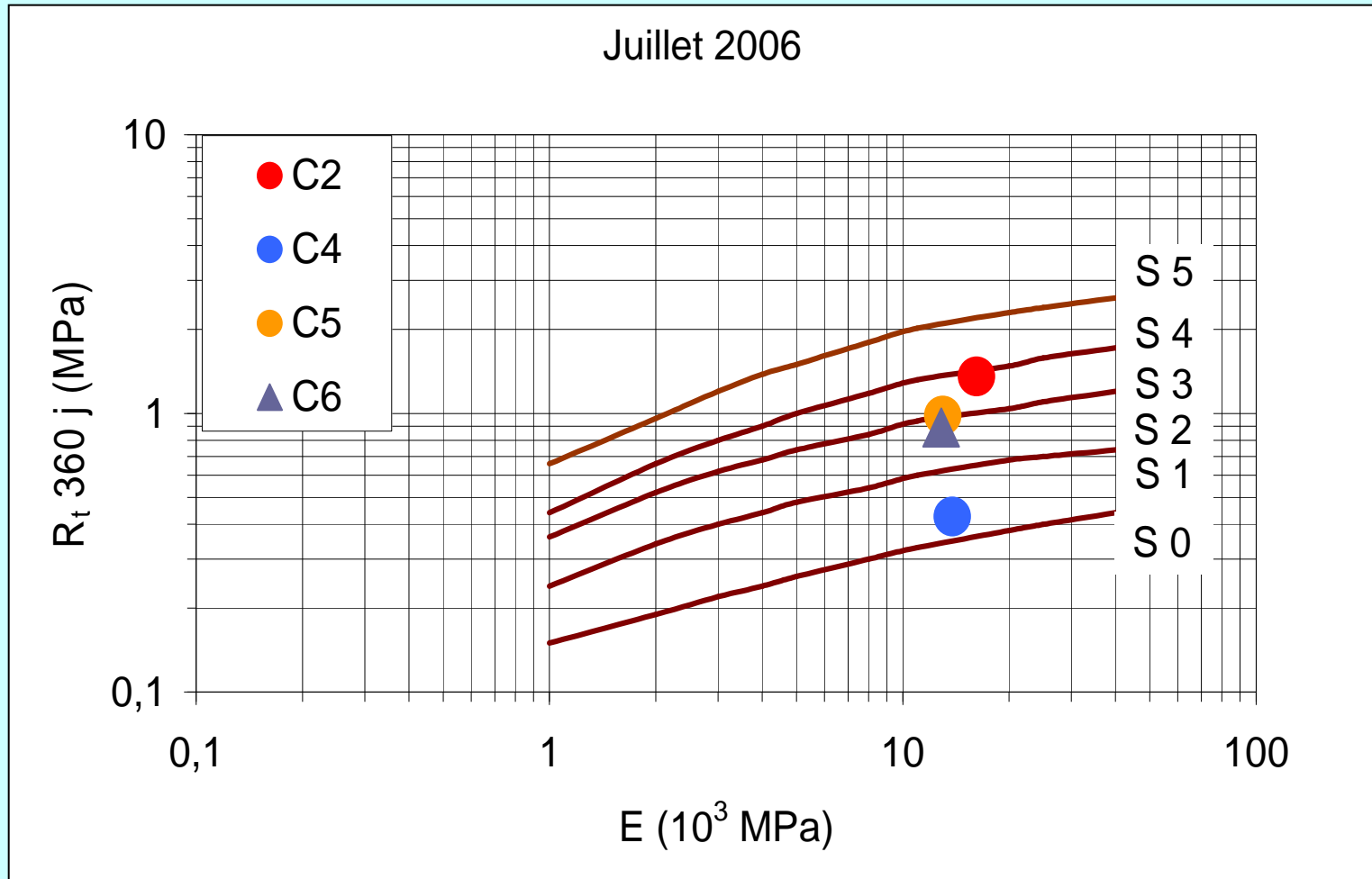
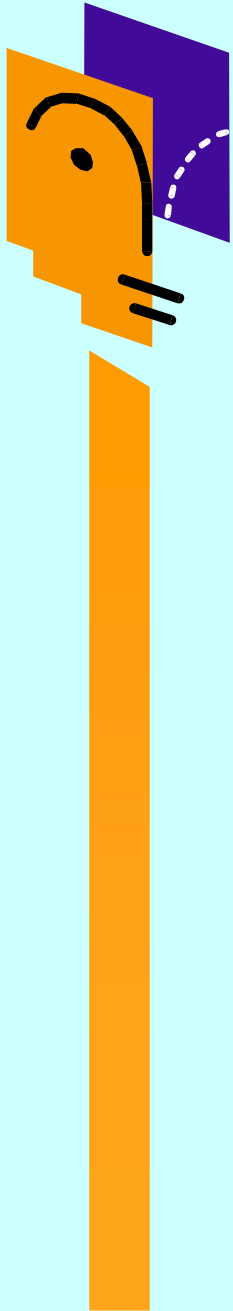
## CAMPAGNE D'ESSAIS A 285 JOURS



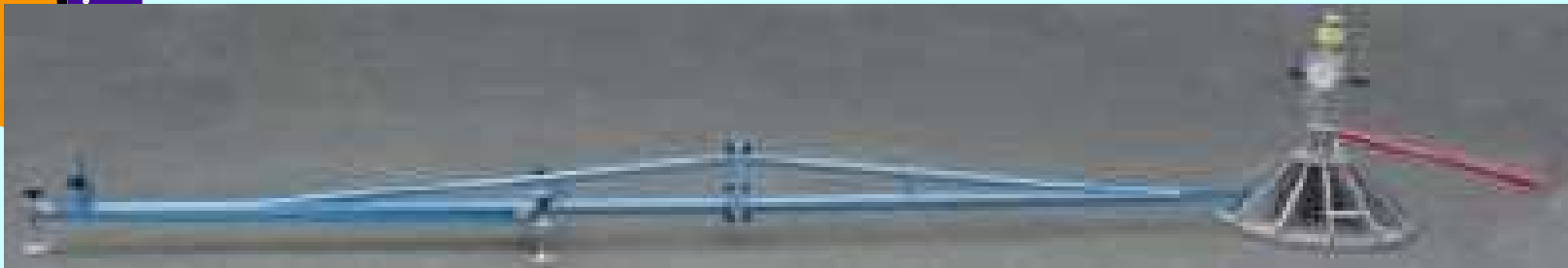
	h (cm)	Ø (cm)	Masse (g)	w (%)	$\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	Compacité (%)
<b>Carotte 1</b>	11,0	9,1	1604	9,8	2032,0	76,7
<b>Carotte 2</b>	18,0	9,3	2627,1	9,6	1984,9	74,9
<b>Carotte 3</b>	18,4	9,2	2641,1	9,4	1977,3	74,6
<b>Carotte 4</b>	18,1	9,1	2548,1	10,2	1950,2	73,6
<b>Carotte 5</b>	12,4	9,2	1804,3	10,3	1991,0	75,1
<b>Carotte 6</b>	15,1	9,2	2143,3	9,1	1933,8	73,0

	<b>Section 1</b>			<b>Section 2</b>
	<b>Carotte 2</b>	<b>Carotte 4</b>	<b>Carotte 5</b>	<b>Carotte 6</b>
<b>E (10<sup>3</sup> MPa)</b>	16,17	13,80	12,97	12,84
<b>R<sub>t</sub> (MPa)</b>	1,36	0,43	0,98	0,89

# CAMPAGNE D'ESSAIS A 285 JOURS



# DEFLEXIONS

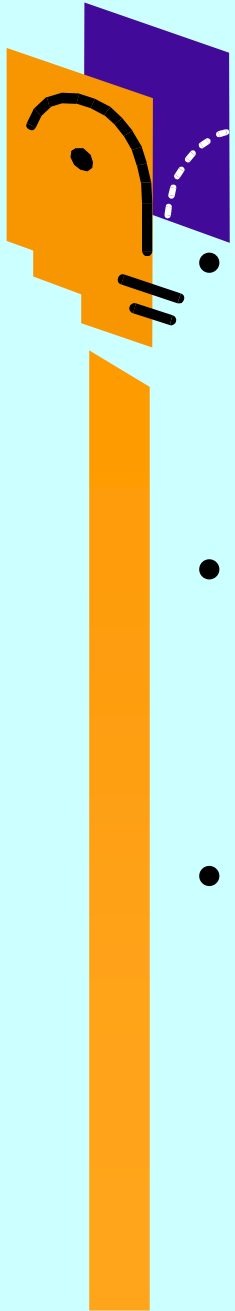


[www.cebtp-solen.com](http://www.cebtp-solen.com)

## Résultats des mesures

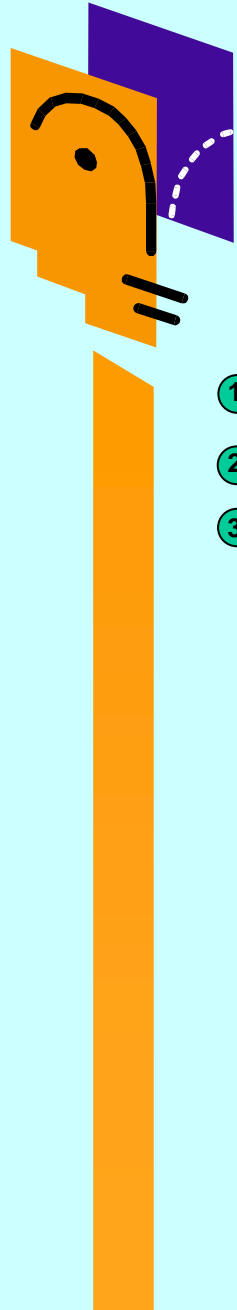
	180 jours	285 jours
Nombre de mesures	45	39
Valeur moyenne	23/100	16/100
Ecart type	14/100	10/100
Déflexion caractéristique	50/100	35/100

## POURSUITE DU SUIVI



- Essais environnementaux en cours sur les carottes de juillet
- Prélèvements des carottes et déflexions réalisés cette semaine
- Etude mécanique et environnementale sur ces carottes

# Les partenaires industriels et Scientifiques



PAD - VNF

Sables

Limons

- ① Univ. Artois - Univ. Sherbrooke
- ② ULCO - Univ. Sherbrooke
- ③ Univ. Lille - Univ. Artois

BAUDELET – EXTRACT- SITA – INERTEC-  
ONYX – OPALE Environnement

C. Boulonnais – Lhoist – ITALCEMENTI – VBC3000

## Budgets

- ① 720 KEuro
- ② 560 KEuro
- ③ 200 KEuro

Béton de  
sable

Grave  
routière

Coulis

Granulat  
artificiel

COLAS-ENVIMAT-  
SCETAURROUTE

ENVIMAT – PAD

COLAS-ENVIMAT

VBC3000-PAD-  
ITALCEMENTI-ENVIMAT

# SEDIMATERIAUX

- 
- POUR UNE GESTION DURABLE DES
  - SEDIMENTS CONTAMINES

*Un projet de coopération qui allie innovation, pertinence économique et développement durable dans le domaine des nouvelles technologies environnementales.*

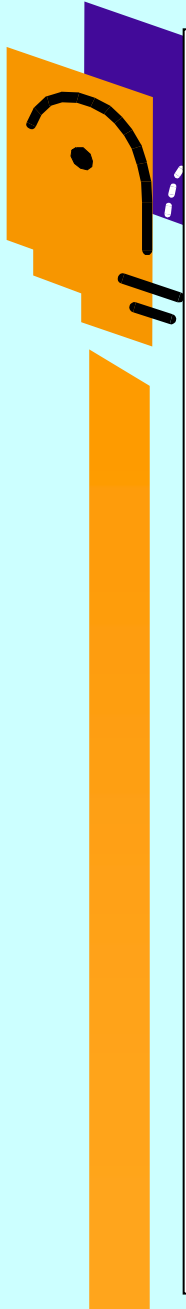


### Le projet SEDIMATERIAUX permettra :

- de répondre aux attentes des Maîtres d'Ouvrages en réalisant des opérations de dragage bloquées, parfois depuis plusieurs années.
- de valider les filières-solutions dont il sera possible de généraliser la mise en œuvre.

### Ses conclusions :

Les éléments nécessaires pour structurer les grandes lignes de la **réglementation européenne**



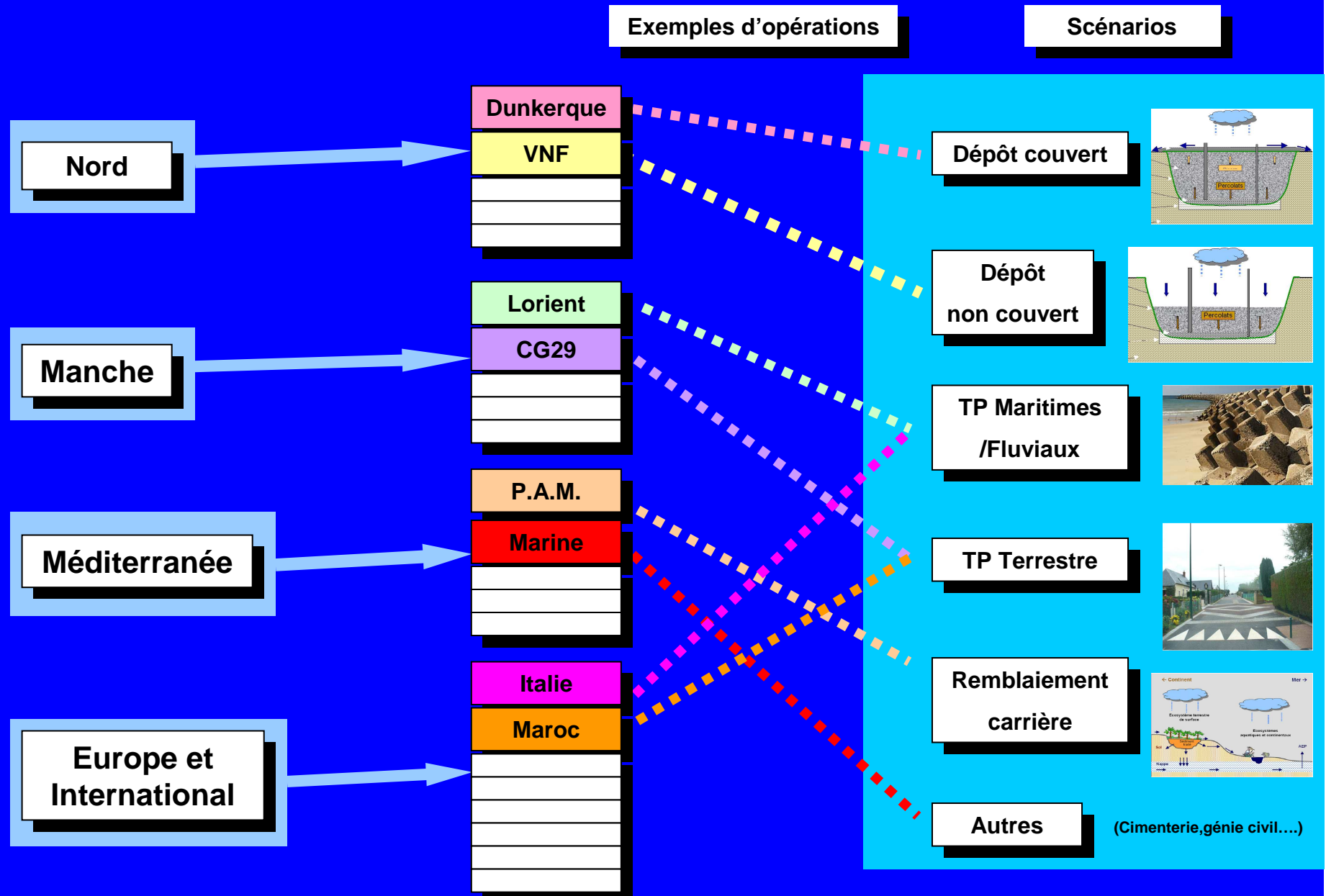
### Le projet SEDIMATERIAUX permettra :

- de répondre aux attentes des Maîtres d'Ouvrages en réalisant des opérations de dragage bloquées, parfois depuis plusieurs années.
- de valider les filières-solutions dont il sera possible de généraliser la mise en œuvre.

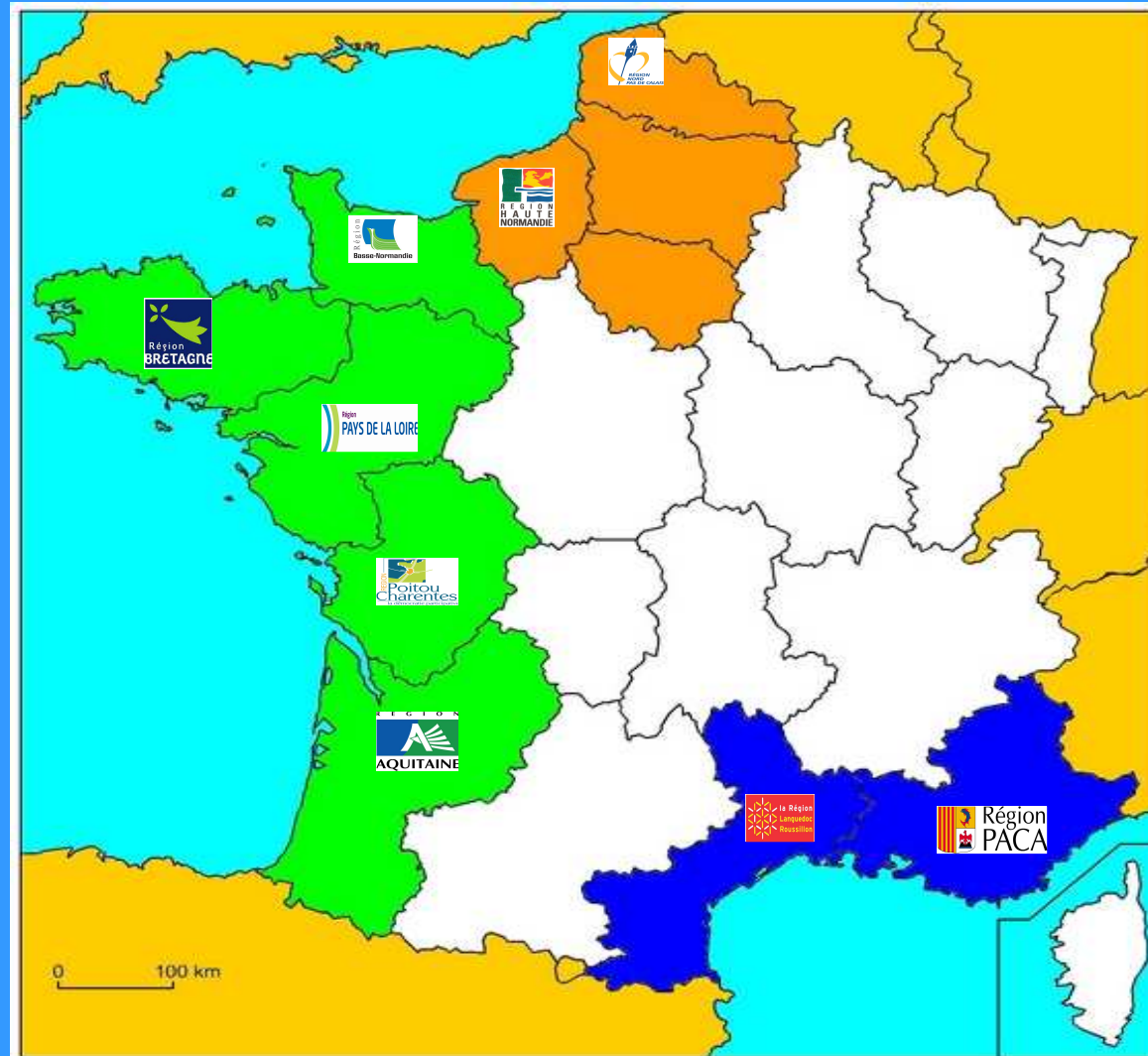
### Ses conclusions :

Les éléments nécessaires pour structurer les grandes lignes de la **réglementation européenne**

# SEDI.MATERIAUX : Coordination scientifiques d'opérations de travaux



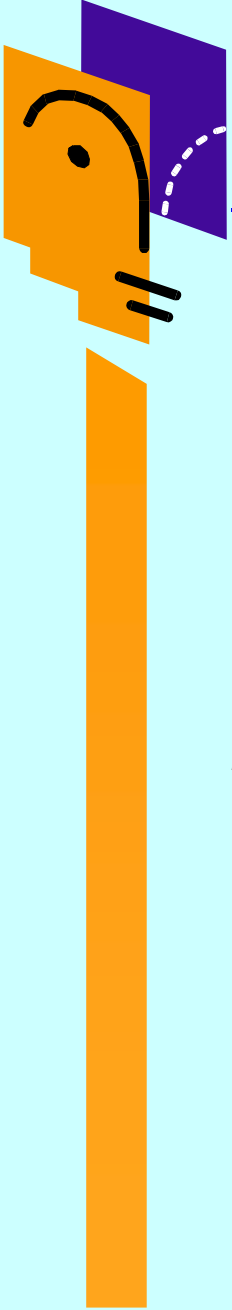
## APPROCHE PARTENARIALE SUR UNE PROBLEMATIQUE COMMUNE.



## Sédiments : les ports partenaires



## Sédiments : Estimations financières suivant partenariat



Les montants nécessaires à la réalisation de ce projet sont importants et impliqueront une grande qualité de l'ingénierie financière à mettre en œuvre :

### **Estimation de référence pour env. 20 opérations: 60 M€**

- 8 à 10 M€ pour les aspects études scientifiques (financements de laboratoires publics exclusivement).

*A échelonner sur 5 ans suivant planning exécution.*

- 8 à 10 M€ pour le volet investissement - travaux de traitement ( financements de MOUV publics maritimes ou fluviaux ).

*A échelonner sur 2 ans en phase travaux en fin d'opération.*

### **Sources multiples de financement :**

Agences de l'eau, Ademe, ONEMA, DRAST, Régions, Europe Interreg, Europ autres programmes...

# ORGANISATION GENERALE SEDIMATERIAUX

