



Institut Mines-Télécom



**IMT Lille Douai**  
École Mines-Télécom  
IMT-Université de Lille



Laboratoire  
Génie Civil  
et géo-Environnement  
Lille Nord de France

# APPROCHE OPÉRATIONNELLE ET NUMÉRIQUE DE LA VALORISATION DES MATÉRIAUX ALTERNATIFS. EXEMPLE DE RÉALISATIONS À L'ÉCHELLE EUROPÉENNE

PR. MAHFOUD BENZERZOUR

Colloque IMT Énergie renouvelable et ressources, les enjeux de demain : de l'ingénierie aux territoires  
1, 2, 6 avril 2021



**IMT Atlantique**  
Bretagne-Pays de la Loire  
École Mines-Télécom



**IMT Lille Douai**  
École Mines-Télécom  
IMT-Université de Lille



**IMT Mines Albi-Carmaux**  
École Mines-Télécom



**IMT Mines Alès**  
École Mines-Télécom



**Institut Mines-Télécom  
Business School**



**MINES  
Saint-Etienne**  
Une école de l'IMT



**TELECOM  
ParisTech**  
Une école de l'IMT



**TELECOM  
SudParis**  
Une école de l'IMT



**EURECOM**



**InSIC**



**MINES  
ParisTech**



**MINES  
Nancy**



**ensiie**  
Paris-Evry-Strasbourg



**ARMINES**



**CARNOT**  
pour l'innovation  
des entreprises



Réglementations



CO2



Déchets



Ressources



Energies

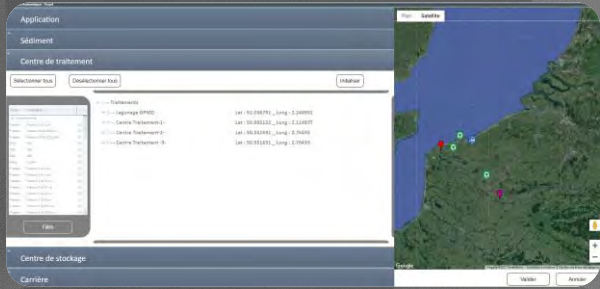
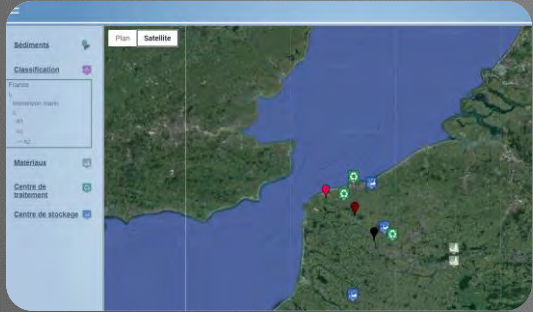


Humain



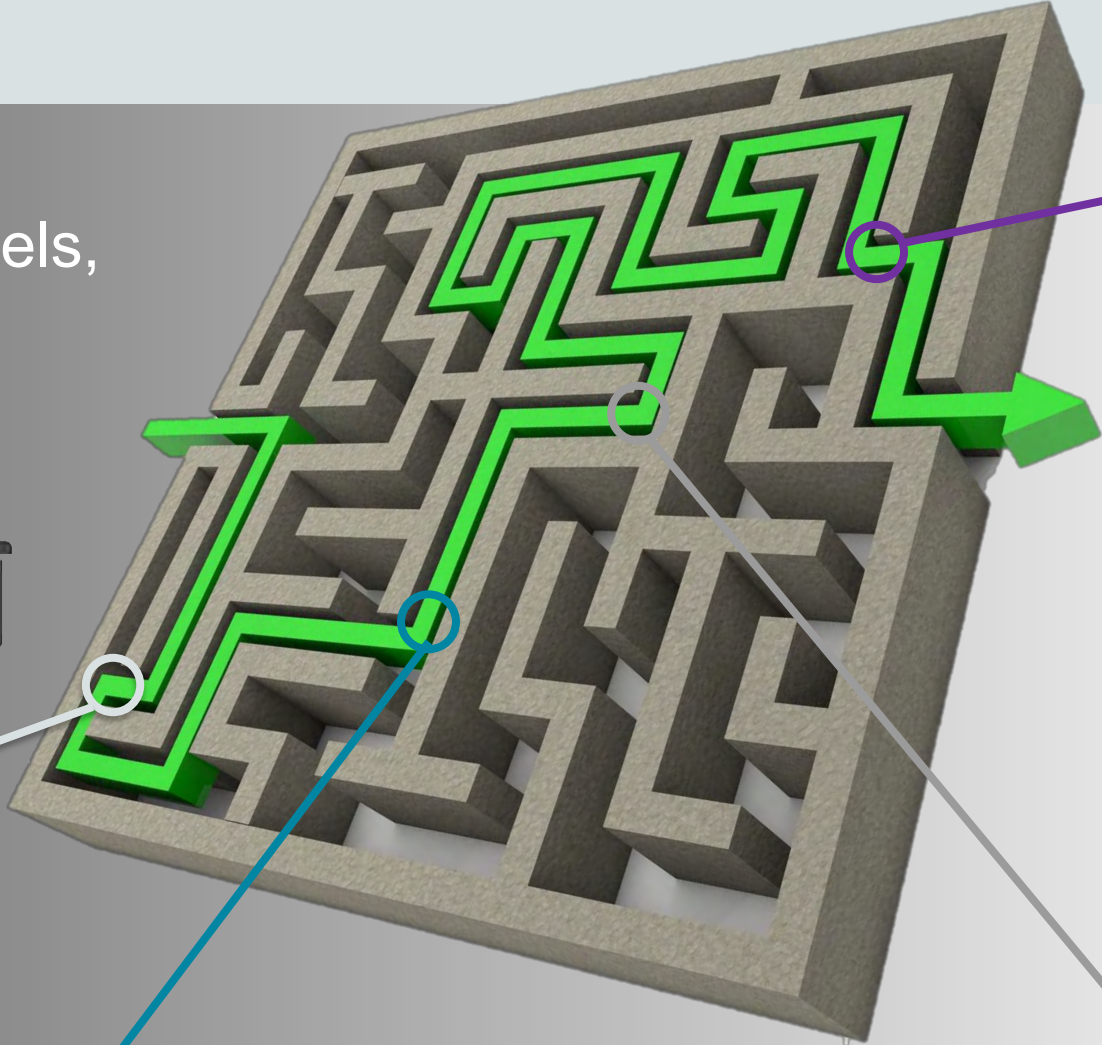


# Développement d'outils numériques opérationnels pour l'optimisation de la valorisation des matériaux alternatifs, ..., déchets





Déchets,  
Sous produits industriels,  
Matières Premières  
Secondaires,  
Matériaux alternatifs,



Réglementations



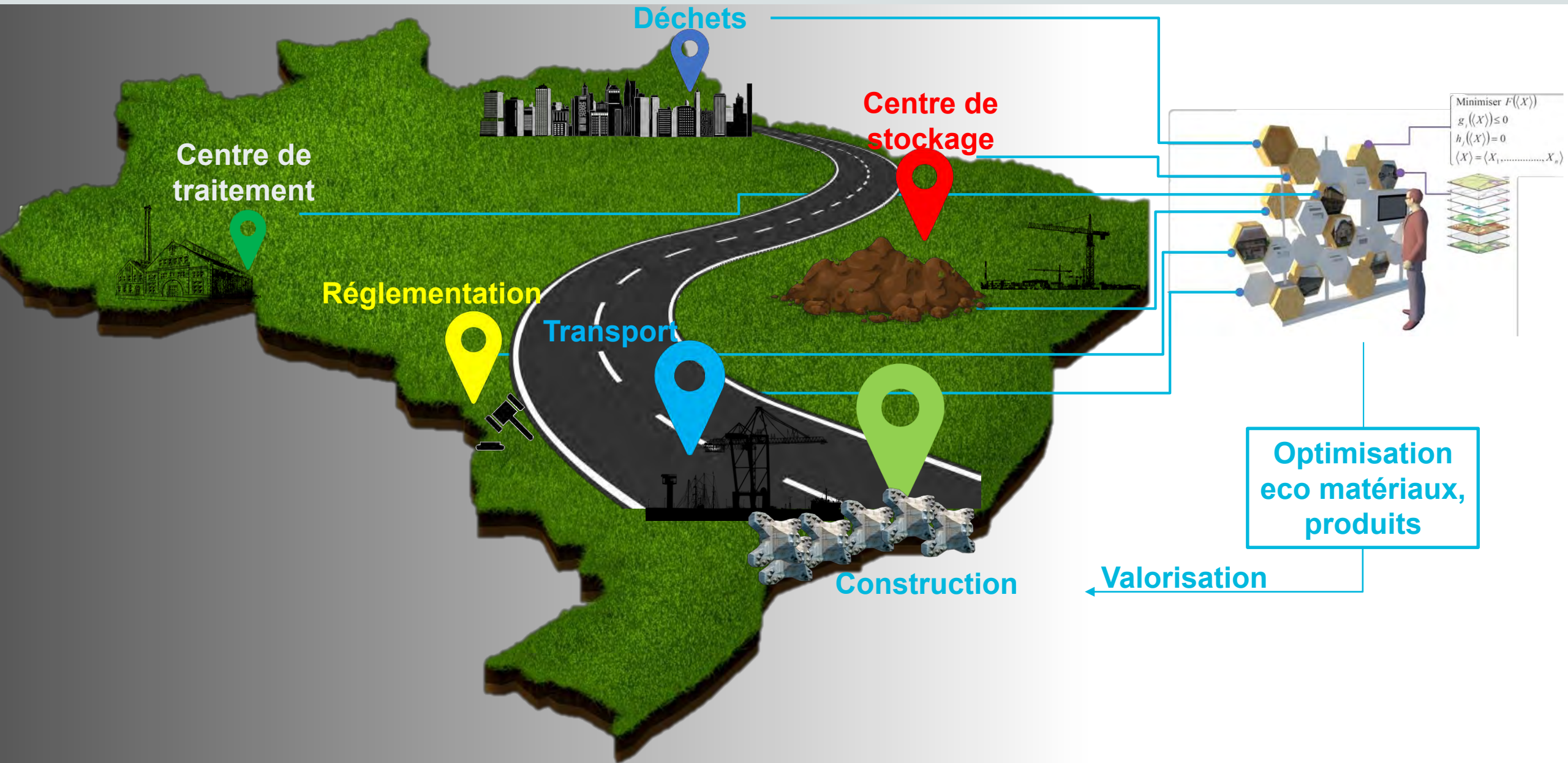
Matériaux, Produits :  
Utilisables

Faisabilité

Coûts

Environnement

# Approche opérationnelle de la valorisation des matériaux alternatifs

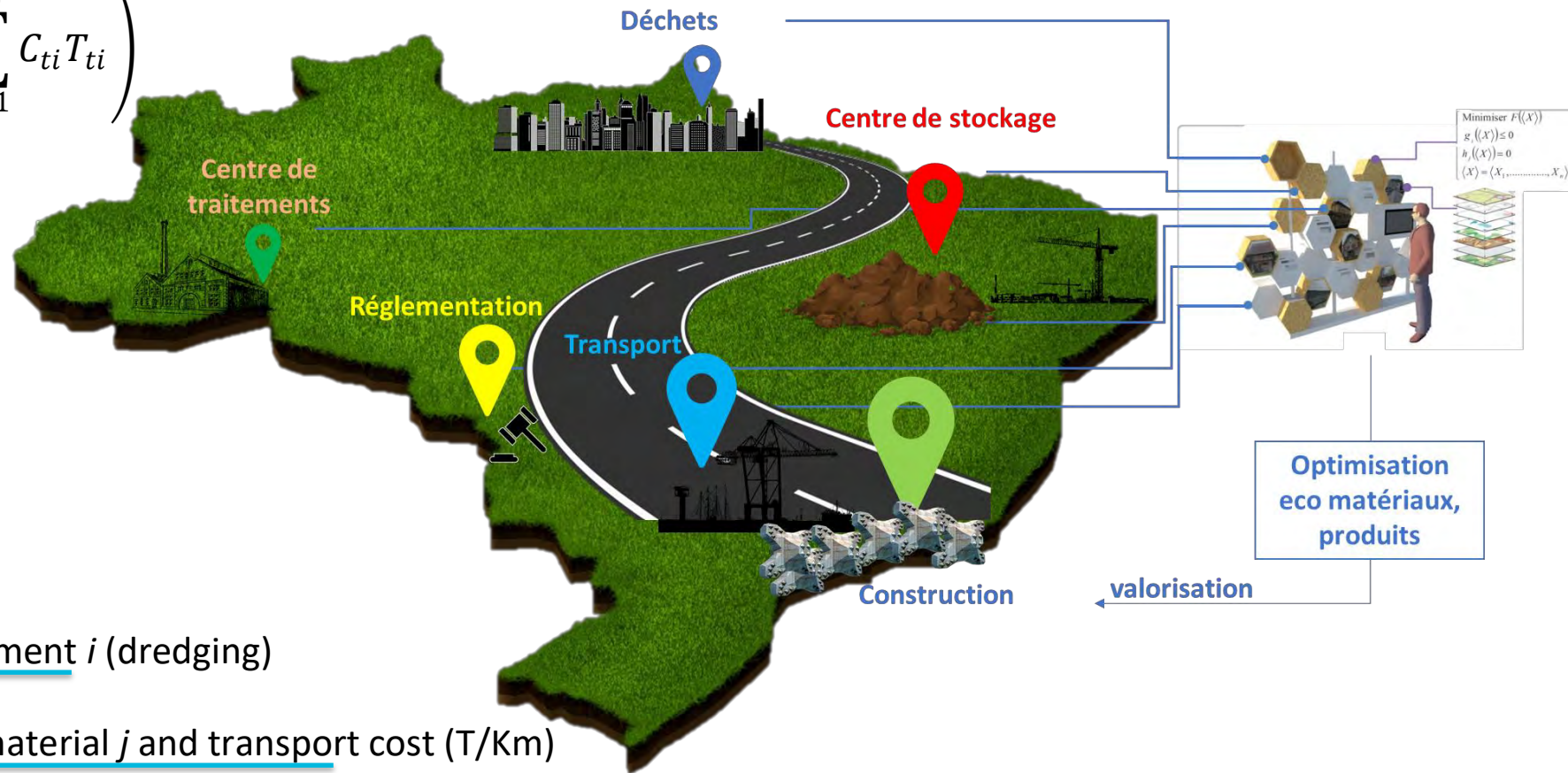




# Approche opérationnelle de la valorisation des matériaux alternatifs

## Modèle mathématique : Fonction objectif

$$\text{Min} \left( \sum_{i=1}^n C_i x_i + \sum_{j=1}^m C_j S_j + \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{|T|} C_{ti} T_{ti} \right)$$



With:

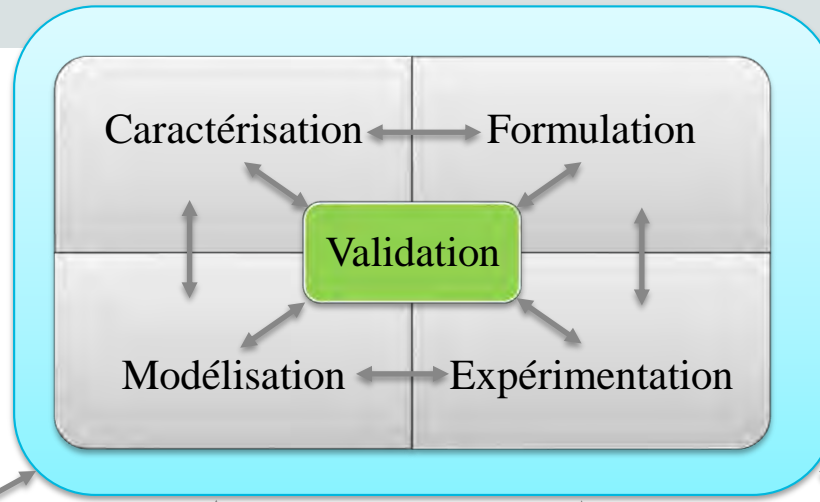
$C_i$  : Operating cost of sediment  $i$  (dredging)

$C_j$  : Purchase cost of the material  $j$  and transport cost (T/Km)

$C_{ti}$  : Cost of treatment  $t$  applied to sediment  $i$  and sediment transport cost (T/Km)

# Approche opérationnelle de la valorisation des matériaux alternatifs

Décision  
complexe  
Multi paramètres



Traitement

Durabilité

Environnement

Coût



Sédiments



Pneus



Fibres VP



Laitier HF



Bauxaline



Mâchefers



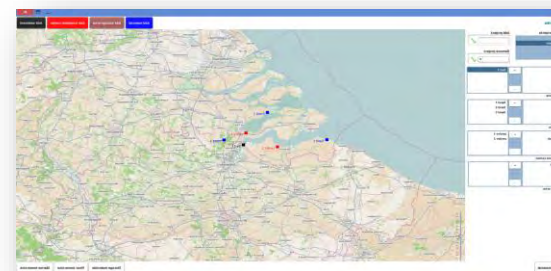
Gravats



Approche numérique



Approche Matériaux



[Benzerzour & co 2014-2020]



# La problématique sédiments

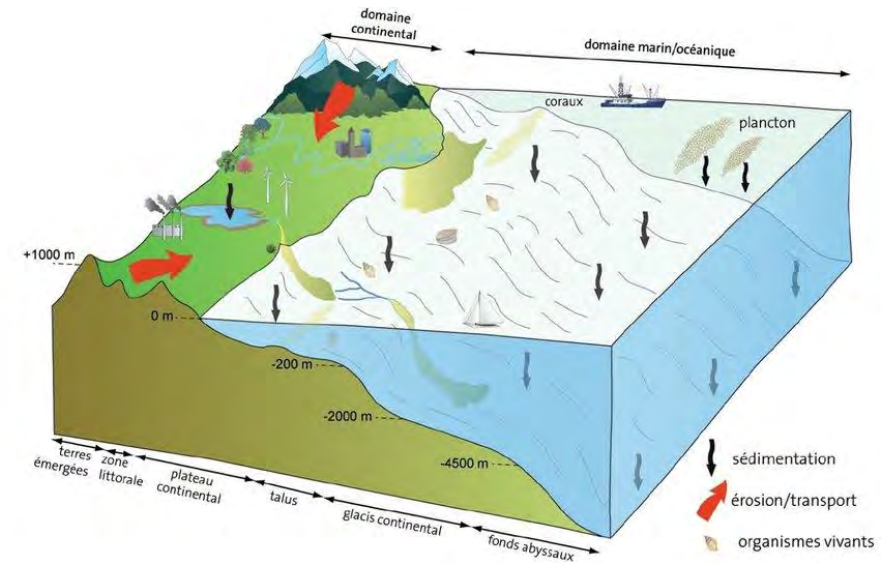
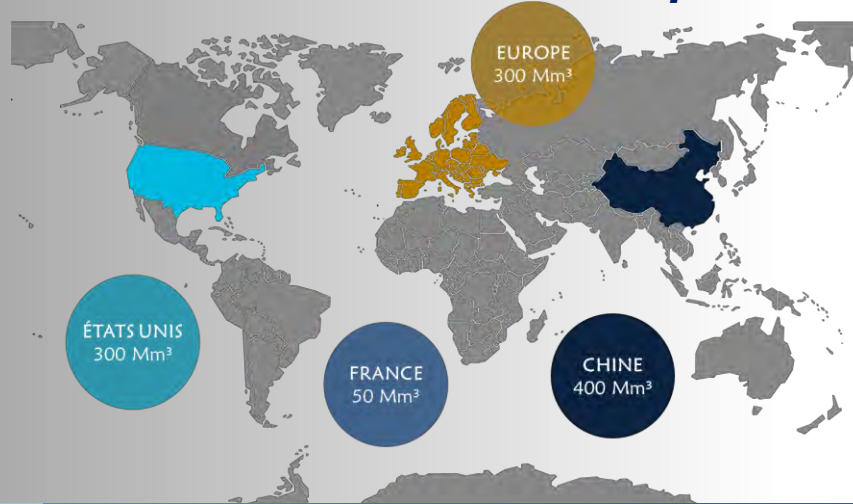
## Besoins :

Transport, (réduction CO<sub>2</sub>),  
Activité maritime et fluviale,  
Activité urbaine (fossés),

## Entretiens :

Dragage, curage  
Stockage,  
Immersion,

Plus de 1 000 000 000 m<sup>3</sup> par an





# Approche opérationnelle de la valorisation des matériaux alternatifs

## Mathematical model : Constraints

### Environmental constraints : Heavy metals

$$e_{si} \left( 1 - \sum_{t=1}^{|T|} \hat{e}_{sit} T_{ti} \right) \leq e_s + (1 - x_i)M$$

### Environmental constraints : Organic matter

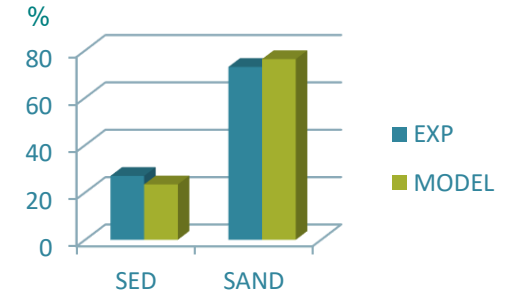
$$e_{Mi} \left( 1 - \sum_{t=1}^{|T|} \hat{e}_{Mit} T_{ti} \right) \leq e_M \left( 1 + \sum_{j=1}^m S_j \right) + (1 - x_i)M$$

### Mechanical constraints

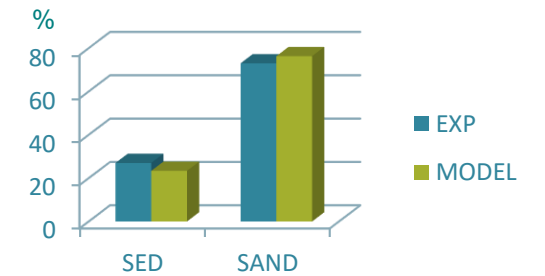
$$\hat{P}_d^{0.4} \left( \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{j=1}^m S_j \right) \leq \sum_{i=1}^n (P_{id} \times x_i) + \sum_{j=1}^m (P_{jd} \times S_j) \leq \hat{P}_d^{0.25} \left( \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{j=1}^m S_j \right)$$

$P_{id}$  ( $P_{jd}$ ) : associated percentage to the diameter  $d$  in sediment  $i$  (material  $j$ )

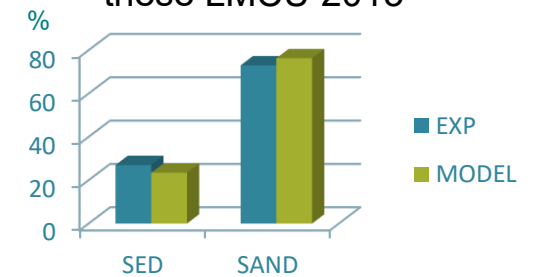
## Validation modèle sur résultats de la Biblio



thèse GPMD 2012



thèse LMCU 2013



thèse PRISMA 2016



# Wikised

WikiSed

interreg  
2004-2006

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

USAR

ALL DOCUMENTS

PROJECT AND STRUCTURE

ANALYSES AND RESEARCH

REGULATIONS

USAR MANUALS

USAR MANUALS

USAR MANUALS

USAR MANUALS

USAR MANUALS

USAR MANUALS

USAR MANUALS

USAR MANUALS

USAR MANUALS

USAR MANUALS

USAR MANUALS

USAR MANUALS

USAR MANUALS

USAR MANUALS

USAR MANUALS

USAR MANUALS

USAR MANUALS

USAR MANUALS

USAR MANUALS

USAR MANUALS

USAR MANUALS

USAR MANUALS

USAR MANUALS

USAR MANUALS

USAR MANUALS

USAR MANUALS

USAR MANUALS

Year	Author	Title
2013	REGINALD B. KOBAYASHI	A REVIEW OF THE MECHANICAL AND LEACHING PERFORMANCE OF STABILIZED SOLEBRED CONTAMINATED SOILS
2010	ROLAND BOUJIN	DRAGAGE ET REJET EN MER
2009	TRIAN NGOC THANH	VALIDATION DE SEDIMENTS MARINS ET FLAVANOL EN TECHNIQUE ROUTIERE
1999	CLAUDE ALZEU ET AL.	DRAGAGES ET ENVIRONNEMENT MARIN
2004	CONSEIL DE DISTRICT DE CARRICK	DREDGING PROTOCOL
2002	STEPHANE LORRAIN	GUIDE D'ÉCHANTILLONNAGE DES SEDIMENTS DU SAINT-LAURENT POUR LES PROJETS DE DRAGAGE ET DE GÈNE MARITIME VOLUME 2 MANUEL DU PRATICIEN DE TERRAIN

# OSMS

USAR

www.wikised.org

www.wikised.org

Enter

MacBook Air



# Application

FRANCE | Route | test Mahfoud

↑ | Editer Projet |

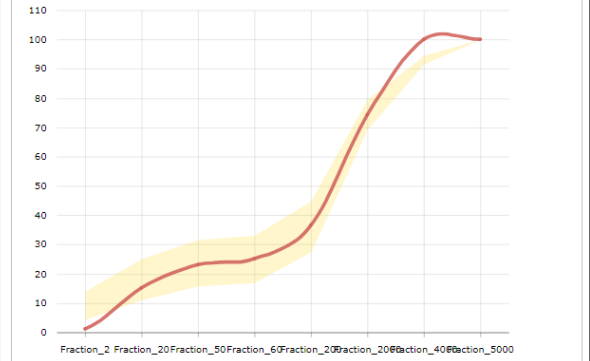
Code	Symbole	Min	Max
<b>Granulometrie</b>			
DMax	DMax	5000	✓
Fuseau Talbot	TALBOU		⊗
<b>Organique</b>			
MO	MO	3	✓
<b>Géotechnique</b>			
IPI	IPI	20	✓
<b>Chimique</b>			
Molybdène	Mo	10	✓
Nickel	Ni	10	✓
Plomb	Pb	10	✓
Antimoine	Sb	0.7	✓
Sélénium	Se	0.5	✓
Zinc	Zn	50	✓
Fluorure	F-	150	✓
Chlorure	Cl-	15000	✓
Sulfate	SO4	20000	✓
Carbone Organique T...	COT	30000	✓
Hydrocarbures Arom...	HAP	50	✓
Polychlorobiphényles	PCB	1	✓
Hydrocarbures Totaux	HCT	500	✓
Arsenic	As	2	✓
Barium	Ba	100	✓
Cadmium	Cd	1	✓
Chrome Tot	Cr Tot	10	✓
Cuivre	Cu	50	✓
Mercur	Hg	0.2	✓

Enregistrer Exécuter

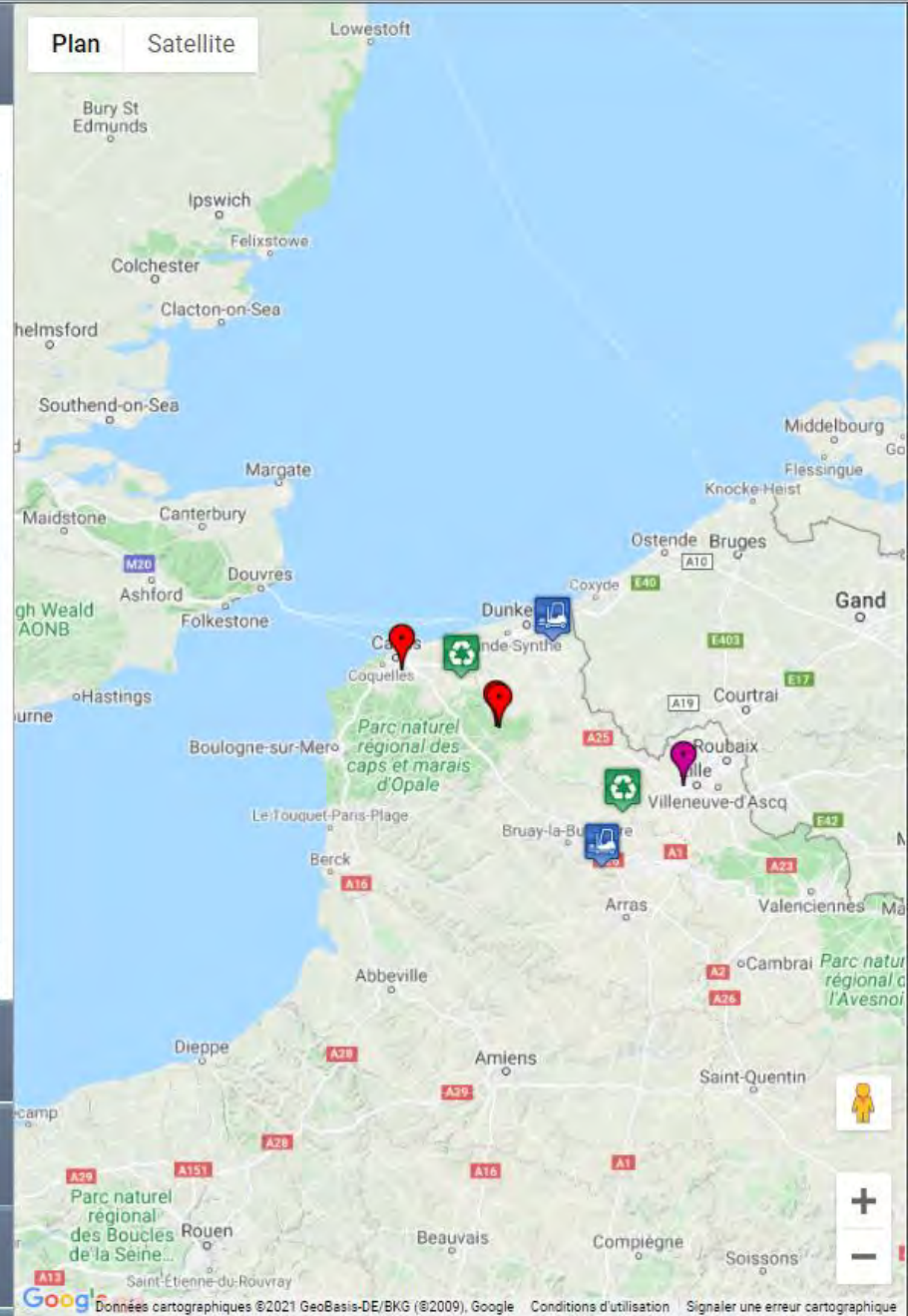
Nouveau matériau				33.9(€)
<b>Sédiments</b>				<b>%</b>
A2	5.0	100.0	0.15	Coût(€)
<b>Traitements</b>				Coût(€)
Centre Traitement-1				0.0
Paramètres				Initial Cible
<b>Transport</b>				Début Fin Coût(€)
Transport marin				Initial Cible 1.28
<b>B2</b>				25.65 100.0 0.76
<b>Traitements</b>				Coût(€)
Centre Traitement-1				1.28
Paramètres				Initial Cible
<b>Transport</b>				Début Fin Coût(€)
Transport marin				Initial Centre Traitement 1.32
Transport marin				Centre Traitement Cible 5.34
<b>Matériaux</b>				% % Max Coût(€)
M1	24.46	100.0	2.93	

Nouveau matériau GTR

## Graphe de granulométrie



Code	Symbole	Valeur	Min	Max
<b>Granulometrie</b>				
DMax	DMax			
Fuseau Talbot	TALBOU			
<b>Organique</b>				
MO	MO	1.09		3
<b>Géotechnique</b>				
IPI	IPI	14.08		20
<b>Chimique</b>				
Arsenic	As	0.37		2
Barium	Ba	0		100
Cadmium	Cd	0.03		1
Chrome Tot	Cr Tot	0.88		10
Cuivre	Cu	0.8		50
Mercur	Hg	0.04		0.2
Molybdène	Mo	0		10
Nickel	Ni	0.52		10
Plomb	Pb	1.91		10



Sédiment

Centre de traitement

Centre de stockage

Carrière

Valider Anuler



# Chaire

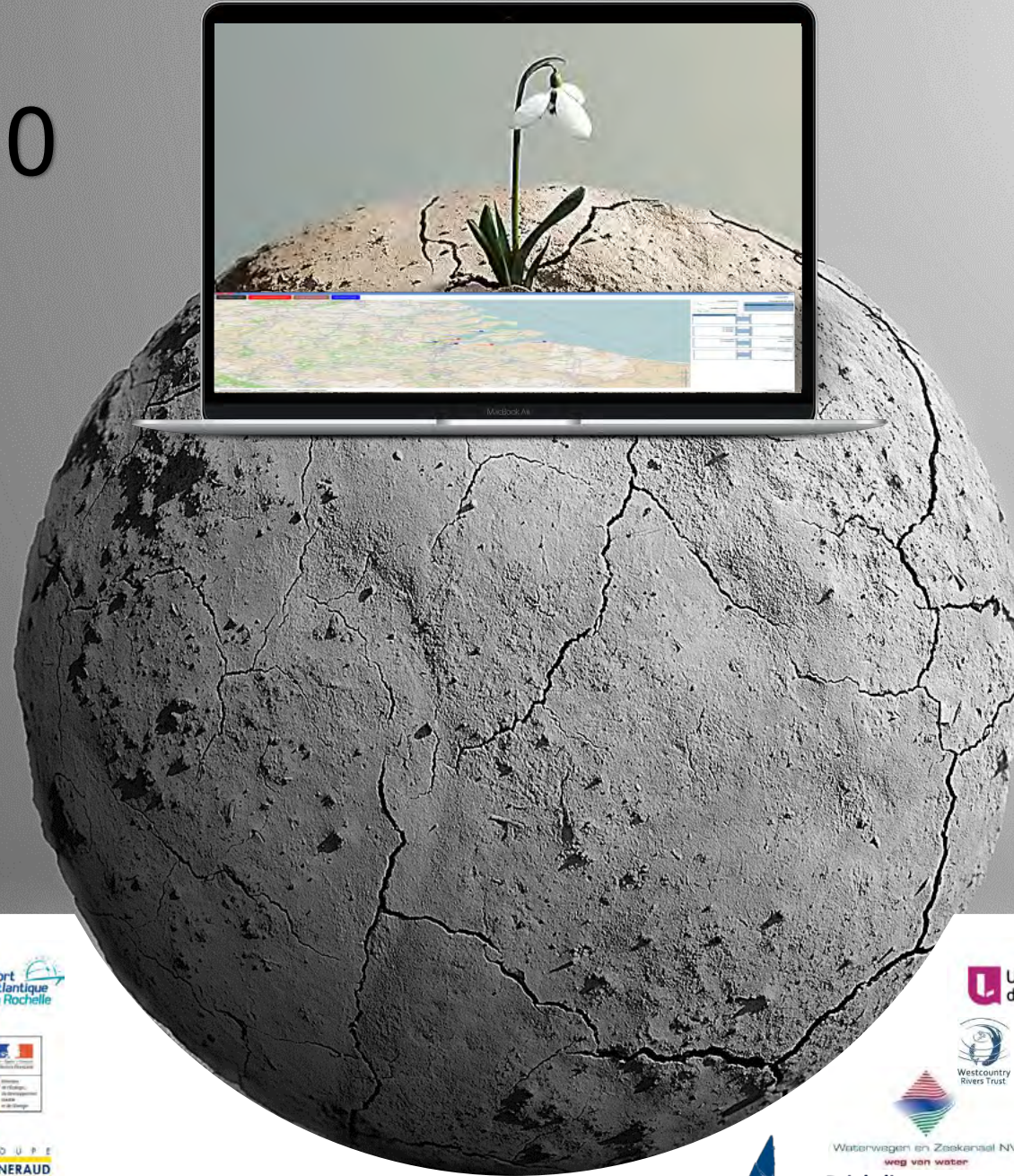
# ECOSSED-D4.0

2019 – 2024

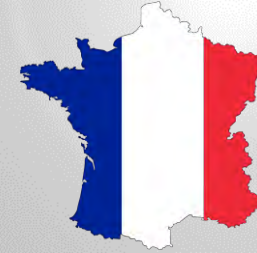


Titulaire: Pr Nor Edine Abriak  
IMT Lille Douai

Démarche  
Sédimentaires



2015 – 2020



**Interreg**   
2 Seas Mers Zeeën  
**USAR**  
European Regional Development Fund

**Interreg**   
North-West Europe  
**SURICATES**  
European Regional Development Fund

**Dunkerque**  **PORT**  
**IMT Lille Douai**  **ESSE**  
**COLAS**  **NORD ASPHALTE**  **Baudoulet**  **vmf**  **Port Atlantique La Rochelle** 

**EQIOM**  **GUINTOLI**  **neo-eco Recycling**  **MEL**  **GROUPE GAGNERAUD** 

**Nord**  **JEAN LEFEBVRE**  **BIOSYNERGIE**  **MEL**  **AGENCE DE L'EAU** 

**Hauts-de-France**  **BDS**  **AGENCE DE L'EAU** 

**Université de Lille**  **CORK INSTITUTE OF TECHNOLOGY**  **Deltares**  **University of Strathclyde** 

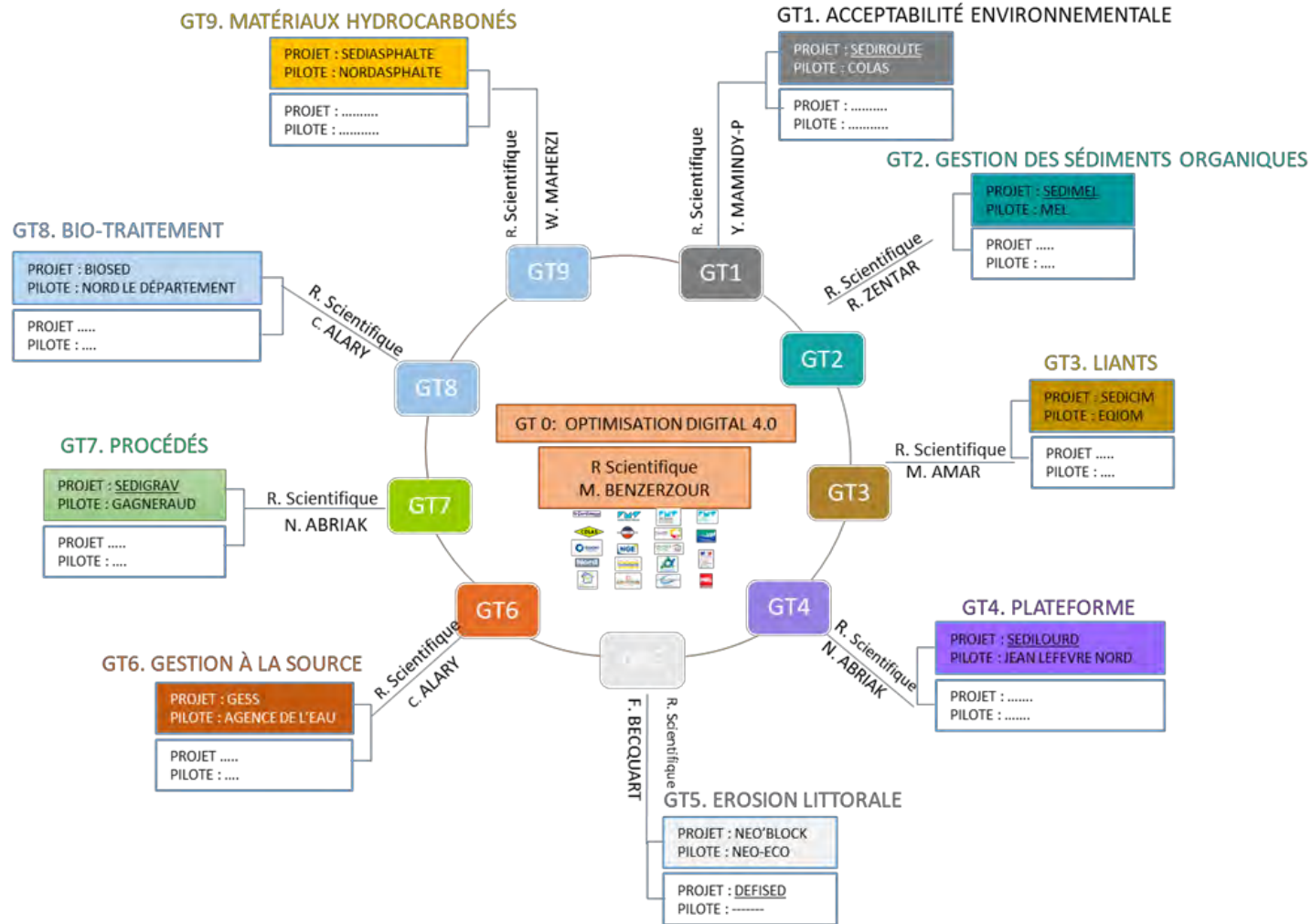
**Westcountry Rivers Trust**  **Port of Rotterdam**  **UCC**  **ixsane**  **brgm** 

**Brightlingsea Harbour Commissioners**  **Scottish Canals**  **ARMINES**  **IMT Lille Douai**  **team2** 





# Chaire ECOSED-D4.0 : source de données



Projet en cours : Exemple

Projet en montage : Exemple



# Approche opérationnelle de la valorisation des MA

## Développement en cours et perspectives

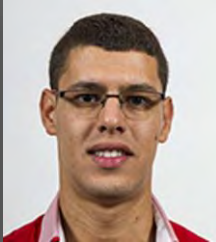
14

Modélisation des contraintes opp de la valorisation des sédiments



Interreg  
2 Seas Mers Zeeën  
USAR  
European Regional Development Fund

Thèse  
A. ZERAOUI



OSMS.....

C: Ciment

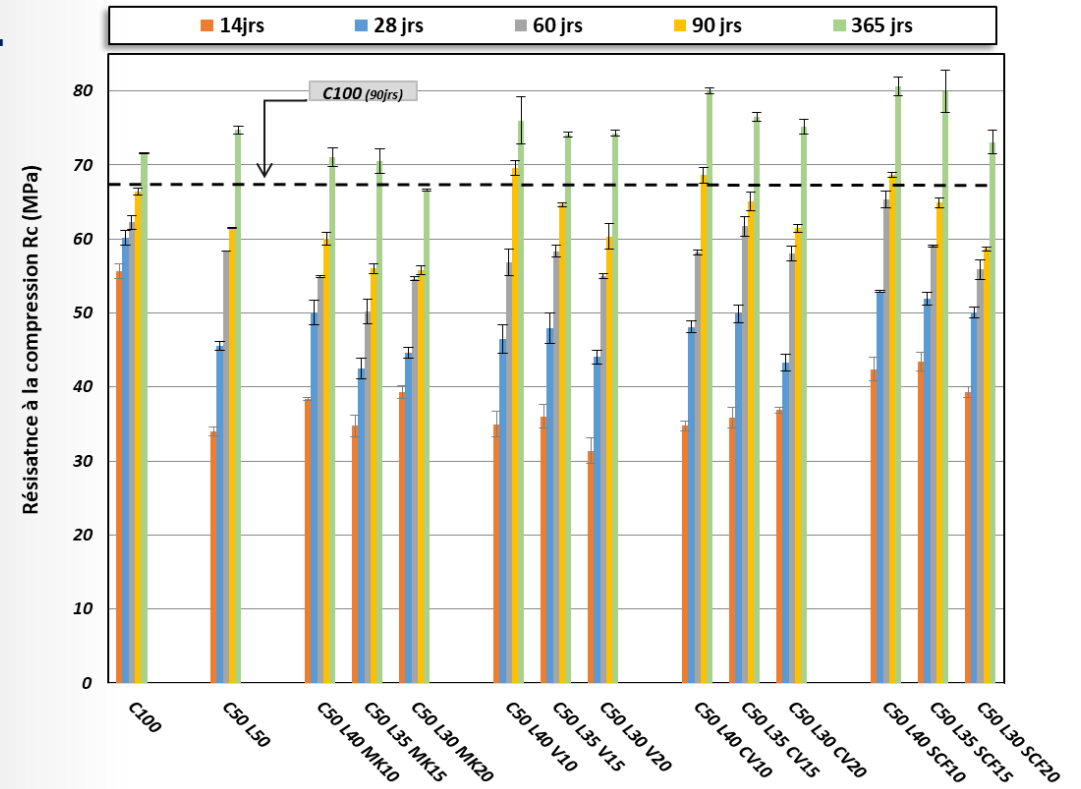
L: Laitier

MK: Métakaolin

V: Verre

CV: Cendres Volantes

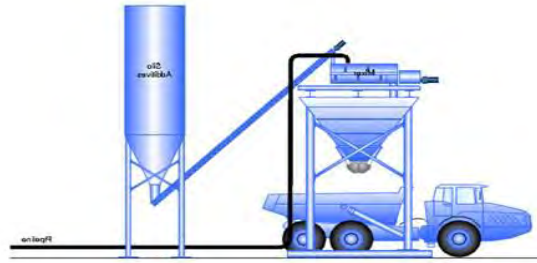
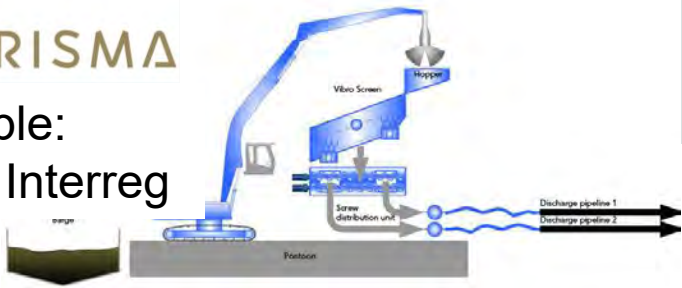
SF: Sédiment traité par calcination flash



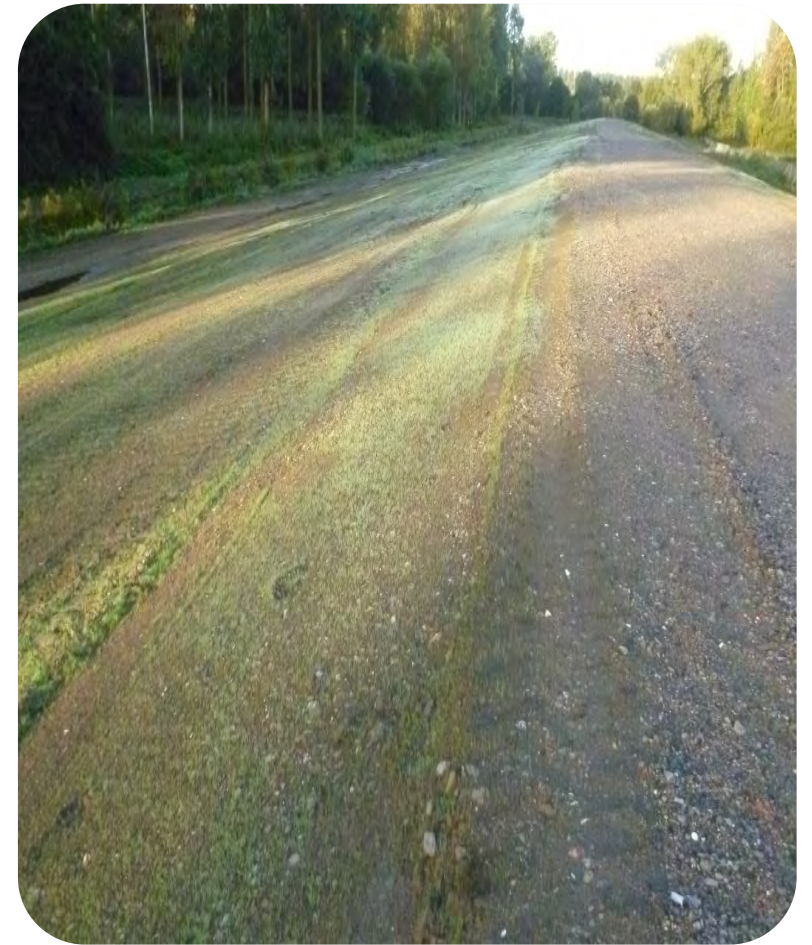
Formulation	Résistance moyenne prédite (MPa)	Intervalle de confiance à 95 % (MPa)	Résistance à la compression moyenne mesurée expérimentalement (± écart-type) (MPa)
C50 L35 MK15	57,82	[56,14 - 59,50]	56,01 (0,69)
C50 L35 V15	64,52	[60,54 - 68,49]	64,66 (0,25)
C50 L35 CV15	64,69	[61,24 - 68,15]	65,08 (1,32)
C50 L35 SFC15	63,83	[60,75 - 66,91]	64,90 (0,70)



Exemple:  
Projet Interreg











Route



Protection érosion



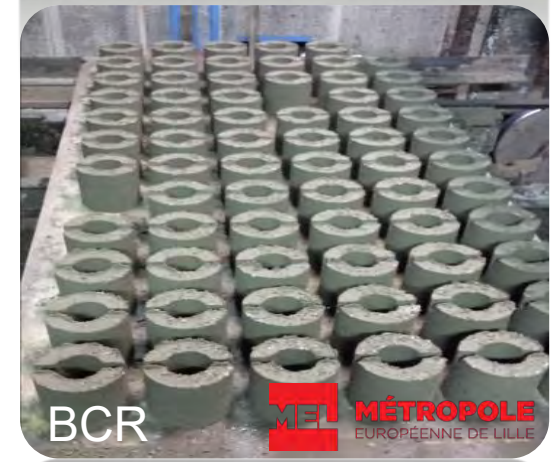
Géotunnel UK



Digue Anvers



Géotube



BCR



Granulats artificiels



Mobilier urbain



Béton autocompactant



*Approche opérationnelle de la valorisation  
des MA*

*Développement en cours et perspectives*

*Exemple sédiments*





# Approche opérationnelle de la valorisation des MA

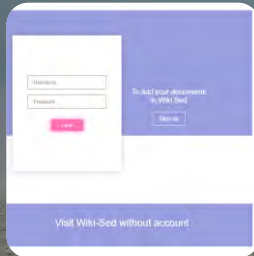
## Développement en cours et perspectives

WIKISED.....

WIKIBIOBASED



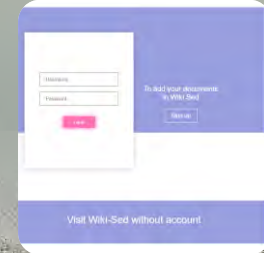
WIKIRUBBLE



WIKIGLASS



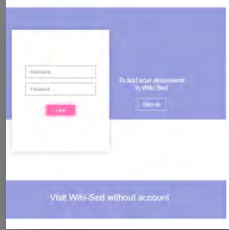
WIKIPLAST



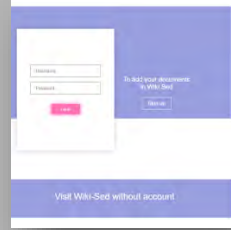


## Développement en cours et perspectives

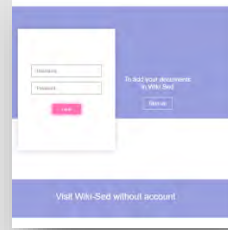
OBMS



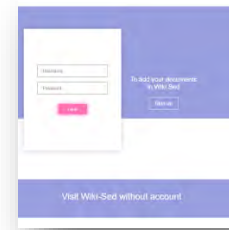
OGMS



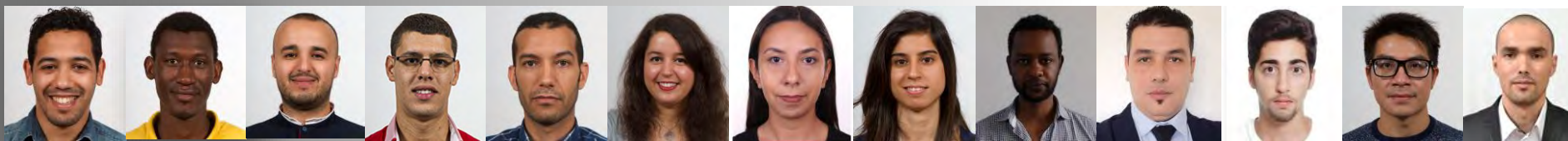
ORMS



OPLASTMS



<p>Durabilité des matrices cimentaires à base de sédiments de dragage</p> <p>UdeS</p> <p>Thèse A. Safhi</p>	<p>Formulation expérimentale par la méthode DMMA</p> <p>Thèse P. OUEDRAOGO</p>	<p>Valorisation Matrices polymériques</p> <p>Thèse I. ENNAHAL</p>	<p>Modélisation des contraintes opp de la valorisation des sédiments</p> <p>interreg 2 Seas Mers Zeeën USAR</p> <p>Thèse A. ZERAOUI</p>	<p>Valorisation du verre dans une matrice cimentaire</p> <p>AGENCE DEL'EAU L'Europe S'engage en France</p> <p>Thèse A. BOUCHIKHI</p>	<p>Modélisation de la compacité granulaire</p> <p>l'Europe S'engage en France</p> <p>P. Doc S. Benturkia</p>	<p>Impression 3D Covolorisation sed – A. lin- FVPR</p> <p>UNIVERSITY OF BALIKESIR</p> <p>PHD J. Daher</p>	<p>Valorisation terres excavées en industrie cimentaire</p> <p>ANDRA</p> <p>MAA J. Kleib</p>	<p>Traitement déchets: approche environnementale</p> <p>NORD ASPHALTE</p> <p>P. Doc A. Mahmat Ahmet</p>	<p>Covolorisation béton célaire</p> <p>Hauts-de-France</p> <p>thèse H. El mouaden</p>	<p>Valorisation par calcination et flash calcination</p> <p>EQUIOM GASIFURE CASE</p> <p>thèse C. Duc Chinh</p>
---	--	---	---	--	--	---	--	---	---	--




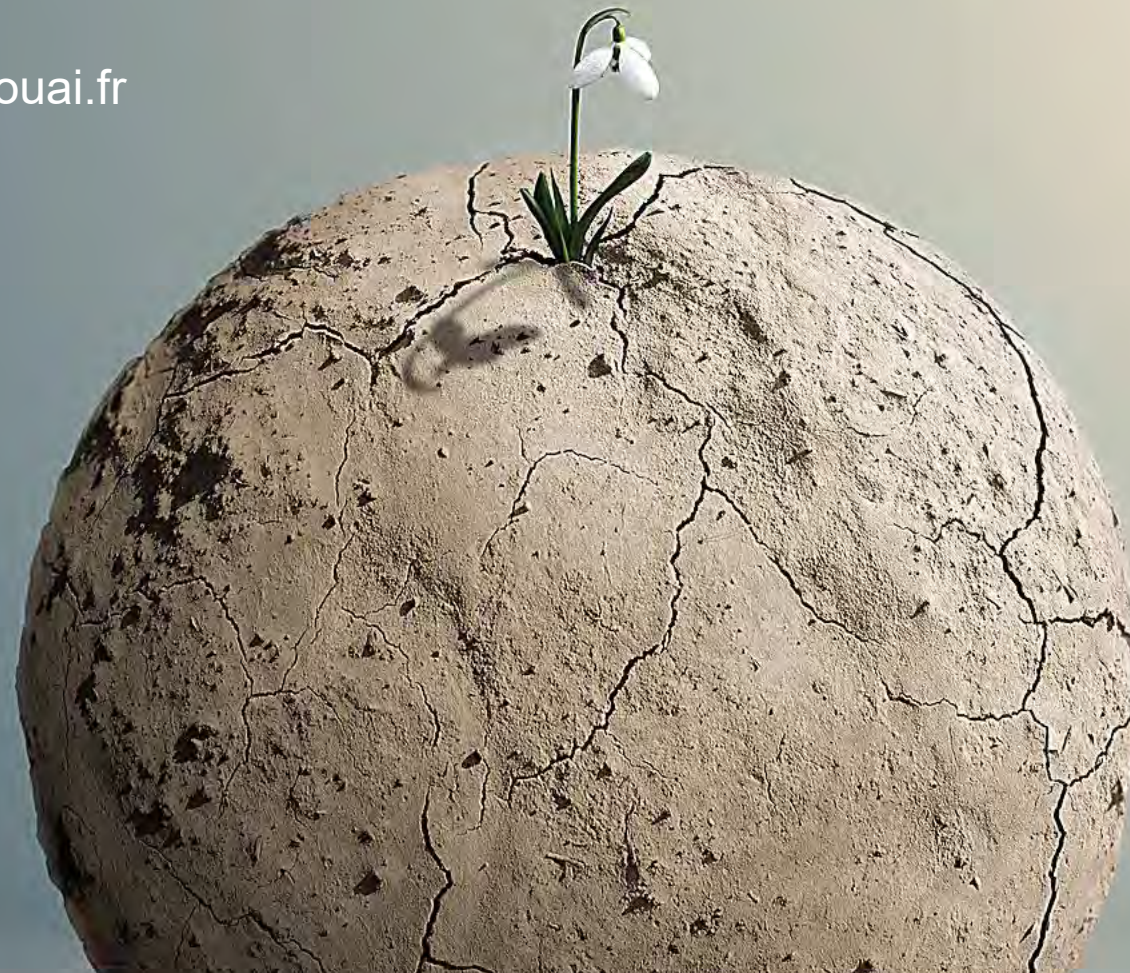
thèse - post doc (2020 2021)



Contact:  
mahfoud.benzerzour@imt-lille-douai.fr



Merci



Approche opérationnelle et numérique de la valorisation des matériaux alternatifs. Exemple de réalisations à l'échelle européenne  
Pr. Mahfoud Benzerzour

Colloque IMT Énergie renouvelable et ressources, les enjeux de demain : de l'ingénierie aux territoires  
1, 2, 6 avril 2021