



Valorisation des sols médiocres

Organisateurs :

Farimah Masrouri (LAEGO - ENSG)
Yu Jun Cui (CERMES – ENPC)

3 décembre 2008 - CNAM



Historique

- Les premières traces de la fabrication organisée de la chaux remontent à 10 000 ans avant J.C. en Mésopotamie.
- La plupart des peuples de l'antiquité connaissaient la chaux : Perses, Egyptiens, Etrusques, Phéniciens, Grecs, Romains.
- Les Incas et les Mayas ont utilisé la chaux pour leurs constructions.
- Il y a 5000 ans, les moines du Tibet stabilisaient les sols argileux à la chaux avant d'y édifier leurs temples.

<http://bauer.gilbert.free.fr/balades/fouracho.htm>

Historique

En Chine

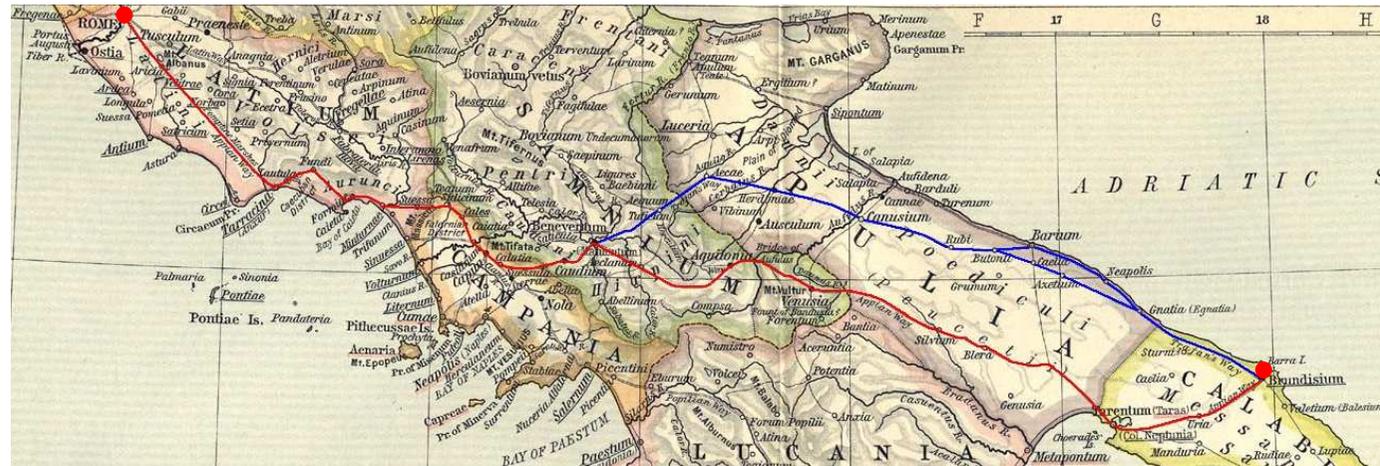
- Fabrication de la chaux :
3000 - 4000 av. J.C. (Civilisation de Yang-Shao)
- Utilisation de la chaux (murs crépis) :
3000 - 4000 av. J.C. (Civilisation de Yang-Chao) et 2300-1950 av. J.C.
(Civilisation de Long-Shan)
- Traitement des sols à la chaux :
1600 - 1046 av. J.C. (Dynastie Shang)
et 1046 - 771 av. J.C. (Dynastie Zhou)
- Grande Muraille de Chine localement
en argile traitée à la chaux

Yang Bing-Yu, Feng Yu-Huai (1998)



Historique

- La **voie Appienne** (Via Appia) est une voie romaine. C'est la première route à avoir été pavée. Construite par le censeur **Appius Claudius Caecus** en **312 av. J.C.** elle joignait alors Rome à Capoue, puis fut allongée pour rejoindre **Brindes** (Brundisium). Son importance est confirmée par le surnom de « Reine des voies » (Regina Viarum) que lui donnaient les Romains.



Parcours de la Voie Appienne (en rouge)

Historique

Le terrassement achevé, on mettait en place différentes couches de matériaux locaux :

- le statumen : c'est la fondation de la voie, formée de blocs de pierres grossières pour une meilleure assise et un meilleur drainage.
- le rudus ou nucleus : c'est une couche de sable ou de graviers étalée sur le statumen pour permettre une égalisation du niveau.
- le summum dorsum : c'est la bande de roulement, formé d'un mélange de sables fins, de graviers, de **chaux** ou de terre. Il devait allier des qualités de souplesse et de dureté.

Wikipedia



Voie Appienne

Historique



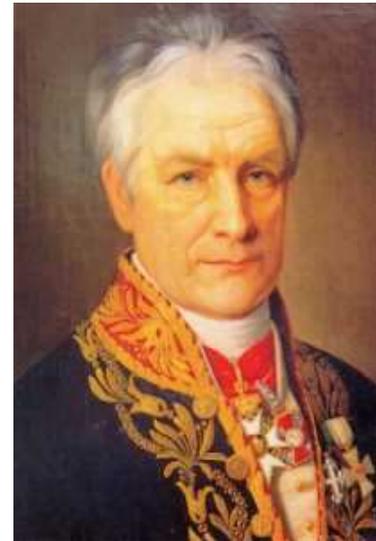
Voie Appienne

Historique

Chaux : au 18ème siècle, l'anglais Black et le français Lavoisier décrivent les réactions chimiques se produisant lors de son élaboration puis les savants Vicat, Debray et Lechatelier compléteront leurs travaux au cours du siècle suivant et feront une approche de ses applications possibles.



Antoine Laurent de Lavoisier
1743-1794



Louis Joseph Vicat
1786-1861



Historique

- La situation actuelle du traitement des sols résulte de :
 - Une culture ancienne
 - La nécessité d'une reconstruction rapide des infrastructures après la 2^{ème} guerre
 - La prise de conscience des objectifs du développement durable :
 - Utilisation raisonnée des ressources naturelles
 - Optimisations économique et environnementale

Puiatti (2005)

Application

Traitement

Amélioration (court terme)

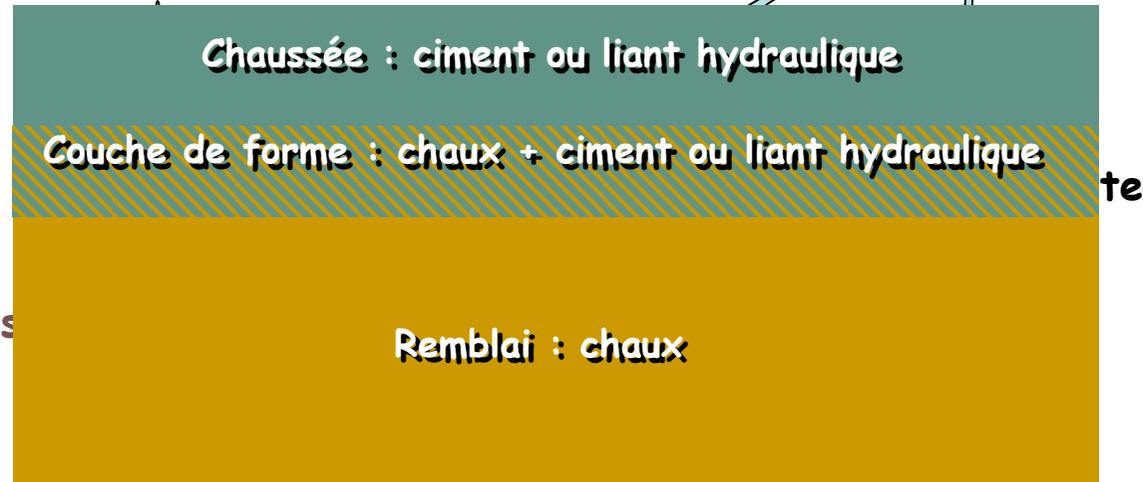
Stabilisation (moyen-long terme)



Avant
traitement



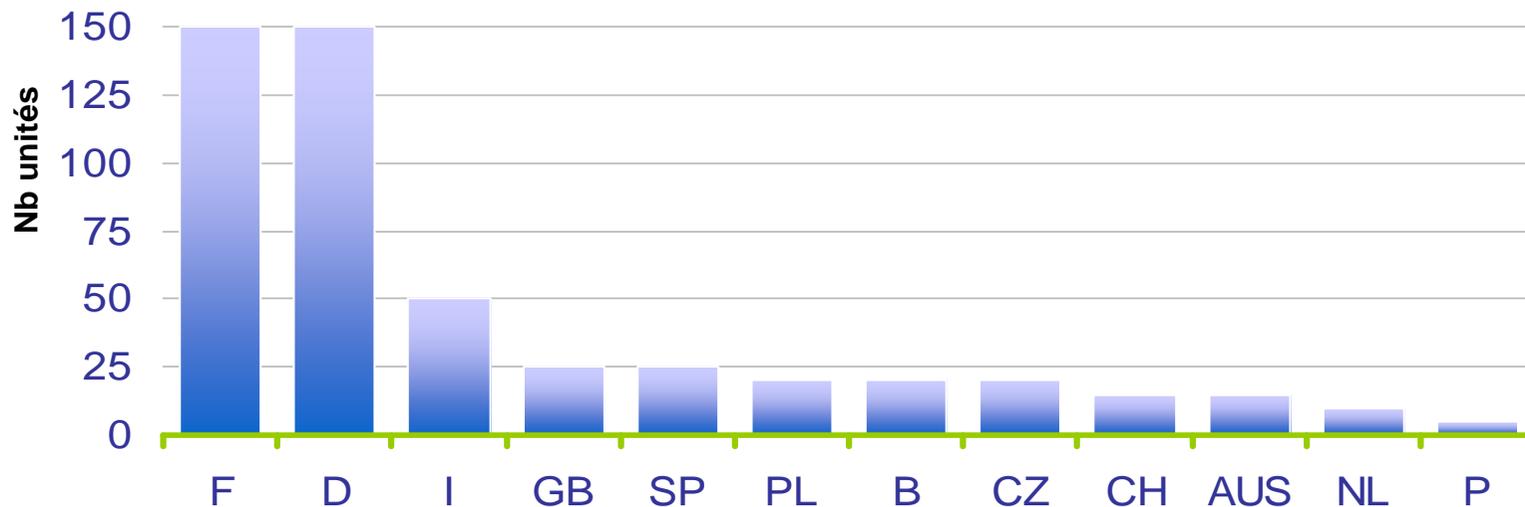
Après
traitement



Puiatti (2005)

Situation actuelle en Europe

- Environ 600 unités de traitement
- Applications :
 - Route, autoroute, infrastructure ferroviaire, aéroport, port...
 - Lotissement, plate-formes commerciale et industrielle.

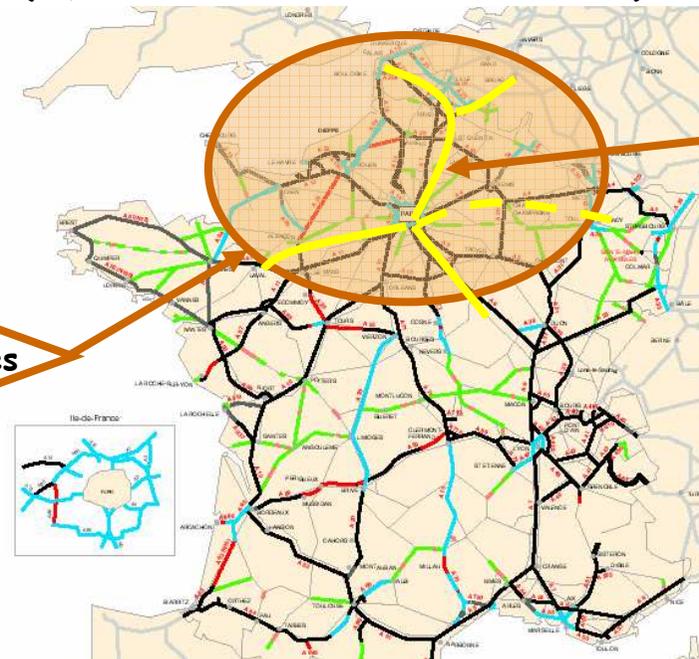


Puiatti (2005)

Situation actuelle en France

- Mouvement des terres :
 - 40 à 50 Mm³/an de sol
- Sols traités à la chaux (1,5 à 2 % - ~ 400 000 T/an) :
 - 15 à 25 Mm³/an
- Sols traités au liant hydraulique (3,5 à 6% - ~ 900 000 T/an) :
 - 6 à 8 Mm³/an
- Bilan :
 - > 1/3 des sols déplacés

Sols fins humides



LGV

Puiatti (2005)

Si les problèmes restent les mêmes ...

Portance

1966



2005



Puiatti (2005)

La technologie a évolué ...

Epandage

1966



Au sac

2005



Contrôlé

Puiatti (2005)

La technologie a évolué ...

Malaxage

1966



Charrue

Puiatti (2005)

2005



Pulvi-mixeur

Les liants sont améliorés...

- Liants hydrauliques routiers
- Liants à faible émission de poussière



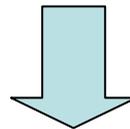
Puiatti (2005)

Stabilisateurs biologiques

- **Enzymes** (sous-produits de la fabrication du sucre)

Principe :

- Réduction du film d'eau adsorbée sur les particules du sol
- Agglomération des substances minérales du sol, accroissement de sa résistance au gel et aux intempéries
- Activation des procédés chimiques et physico-chimiques, qui stabilisent le sol, ce qui augmente d'autant la durée de vie des voies.



Applicable sur une large gamme de sols (fines au moins 5%)



Stabilisateurs biologiques

● Enzymes

Depuis une trentaine d'année essentiellement pour stabiliser les couches de formes des chaussées

Plus de 40 pays dont :

Etats-Unis, Autriche, Inde, Chine, ...

Marques commerciales :

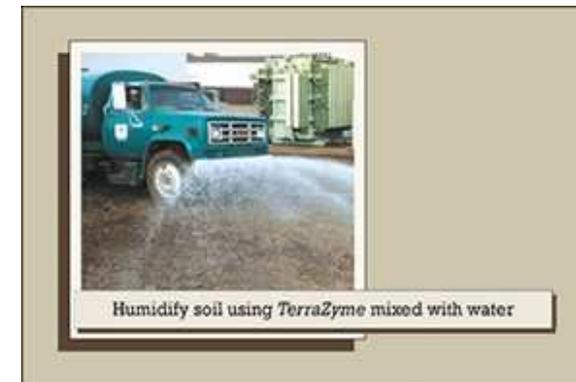
- Terrazyme 11 X
- Permazyme
- EMC squared
- ECOroads

Stabilisateurs biologiques

● Enzymes

Quelques avantages avancés par les fabricants :

- ➔ Economiques
 - Faible coût du produit
 - Réduction de l'entretien des chaussées traitées
- ➔ Modification des propriétés du sol
 - Augmentation de la compacité
 - Diminution de la perméabilité
- ➔ Environnement
 - Non toxique, biodégradable



Mise en œuvre simple et rapide

Stabilisateurs biologiques

● Enzymes

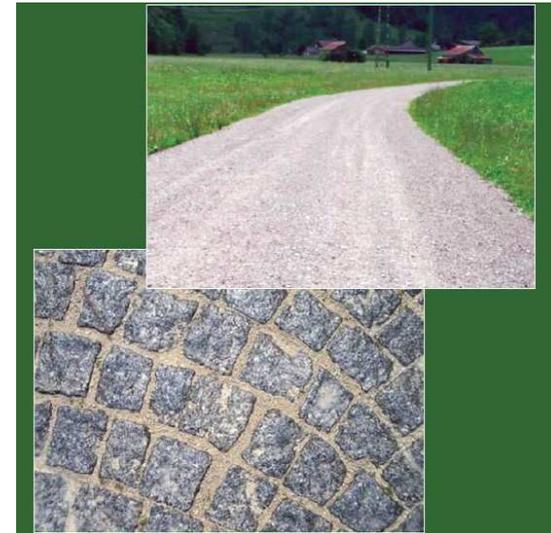
Essais de laboratoire :

- R_c et R_t augmentent mais dans une proportion moindre qu'un traitement à la chaux
- Détérioration rapide des éprouvettes immergées dans l'eau

Confrontation laboratoire et *in situ* :

- Doit être étudié au cas par cas
- La prise dépend de la nature du sol et des conditions climatiques

Manque d'information sur la durabilité des ouvrages traités



Exemple de route non goudronnée et de joints entre pavés traités à la Permazyme



Stabilisateurs biologiques

● Bactéries

Principe :

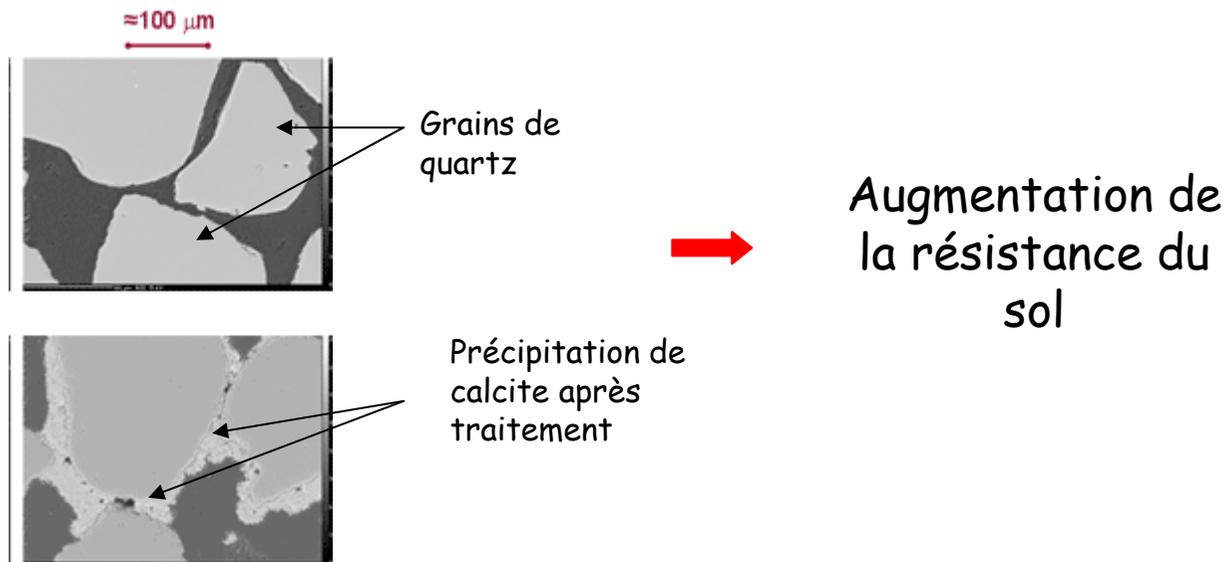
Activer une **uréase*** naturellement présente dans le sol (*Bacillus Pasteuri*) en apportant de l'urée accompagnée de calcium afin d'induire la formation de cristaux de calcite

** est une enzyme qui catalyse la réaction de transformation de l'urée en dioxyde de carbone et ammoniac.*

Stabilisateurs biologiques

● Bactéries

- Diminution locale du pH
- Précipitation de calcite à partir du Ca^{2+} autour des bactéries et cimentation des grains du sol





Stabilisateurs biologiques

● Bactéries

A l'heure actuelle, seuls des sols sableux et des tourbes ont été traités de cette façon

Peu d'essais in situ réalisés

Amélioration dépend de nombreux facteurs :

- Des concentrations en réactifs et en bactéries
- De la température
- De l'oxygénation du sol
- ...



Stabilisateurs biologiques

● Bibliographie

Traitement des sols à l'aide d'enzymes :

<http://www.terrazyme.com>
<http://www.perma-zyme.at/de/index.html>

Etudes qualitatives de comparaison *in situ* de stabilisateurs non conventionnels

http://www.cflhd.gov/techDevelopment/completed_projects/materials/seedskadee/_documents/O1_road_stabilizer_product_performance_seedskadee_nwr.pdf
<http://atfiles.org/files/pdf/SoilStabilizersTrails.pdf>

Traitement des sols par bactéries :

<http://www.smartsoils.nl/>
<http://www.sil.ucdavis.edu/projects-bsi.htm>
http://www.smartsoils.nl/files/files_org/2007_Whiffin_Van_Paassen_Harkes_Geomicrobiology_concept.pdf

DeJong, J.T., Fritzes, M.B., and Nüsslein, K. November 2006 "Microbial Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.



Valorisation des sols médiocres

Introduction <i>F. Masrouri & Y.J. Cui</i>	13h30-13h40
Traitement à la chaux <i>V. Lelong</i> (Lhoist)	13h40-14h
Traitement au ciment <i>J. Abdo</i> (Cimbéton)	14h-14h20
Point de vue des terrassiers <i>D. Gandille</i> (Guintoli) & <i>P. Chardard</i> (Eiffage)	14h20-14h40
Questions environnementales liées au traitement des sols <i>A. Julien</i> (LCPC Nantes)	14h40-15h
Questions & discussion	15h-15h20
Pause	15h20-15h40



Valorisation des sols médiocres

Réutilisation des sédiments

N. Abriak (Mines de Douai) 15h40-16h

Comportement physico-chimique des sols traités

D. Deneele (LCPC Nantes) 16h-16h20

Géotechnique des sols traités

O. Cuisinier (LAEGO-ENSG) 16h20-16h40

Présentation générale du projet TerDOUEST (Terrassement Durable, OUvrages En Sols Traités)

E. Manier (SNCF) 16h40-17h

Questions & discussion 17h-17h30