

Traitement des sols aux liants hydrauliques : aspects géotechniques et physico- chimiques des perturbations de la solidification

Lucile SAUSSAYE

Travail de thèse réalisée sous la direction de **Mohamed BOUTOUIL**

et co-encadrée par **Fabienne BARAUD** et **Lydia LELEYTER**

ESITC Caen FR-14610 EPRON / UCBN UR ABTE EA-4651 FR-14032 Caen

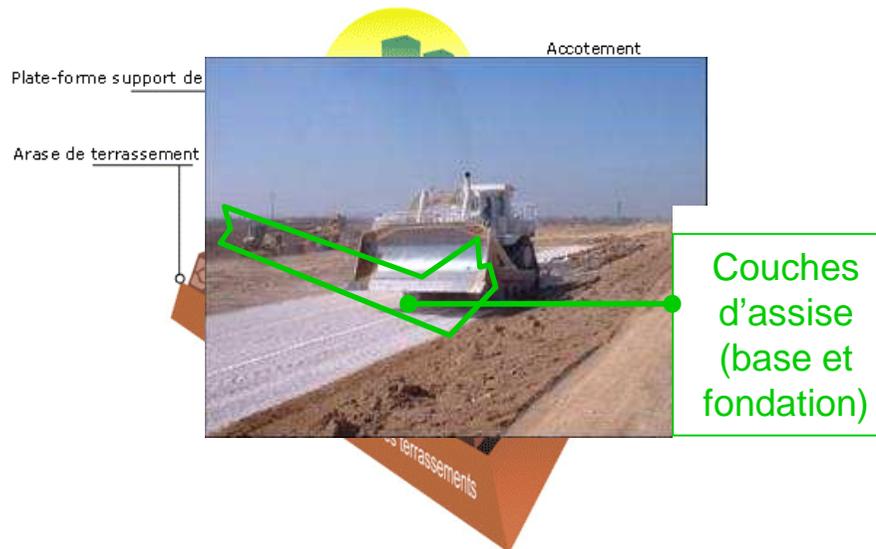
- I. Contexte et problématique**
- II. Objectifs et enjeux**
- III. Méthodologie**
- IV. Résultats et analyses**
- V. Conclusions et perspectives**

✓ Exemple des terrassements : valorisation des sols en place

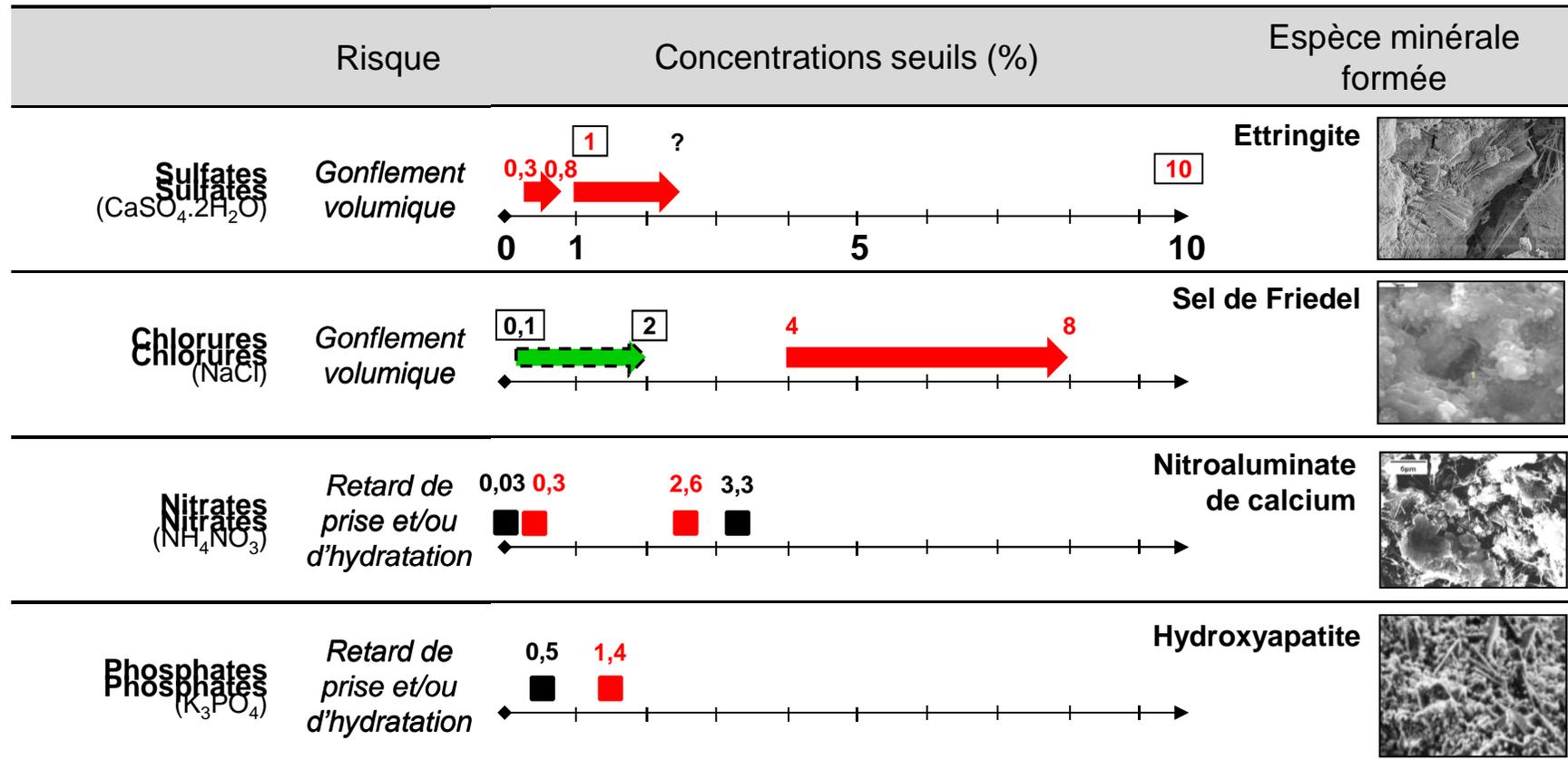
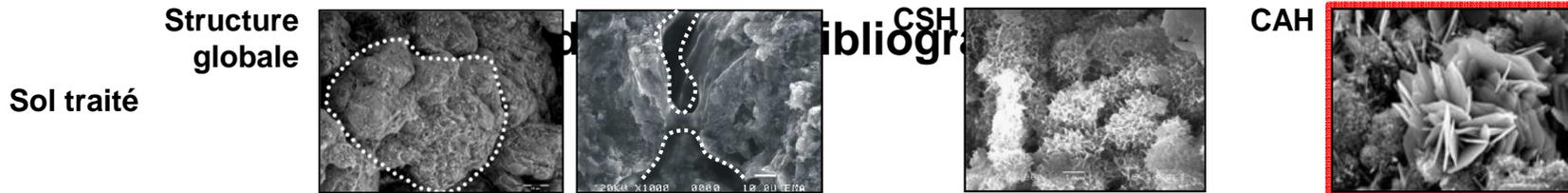
Situation en France (2000) :

- volume des terrassements : 90 Mm³ de sols fins
- valorisation des sols en place par traitement : 30 à 50 %
- application : techniques routières
- destination des autres sols : mise en décharge dont 2 Mm³ déclarés inaptes au traitement
- objectif 2020 : réemploi de 100 % des matériaux géologiques naturels excavés sur les chantiers

Valorisation en techniques routières



Site internet Planète TP, 2012 ; Harris *et al.*, 2004



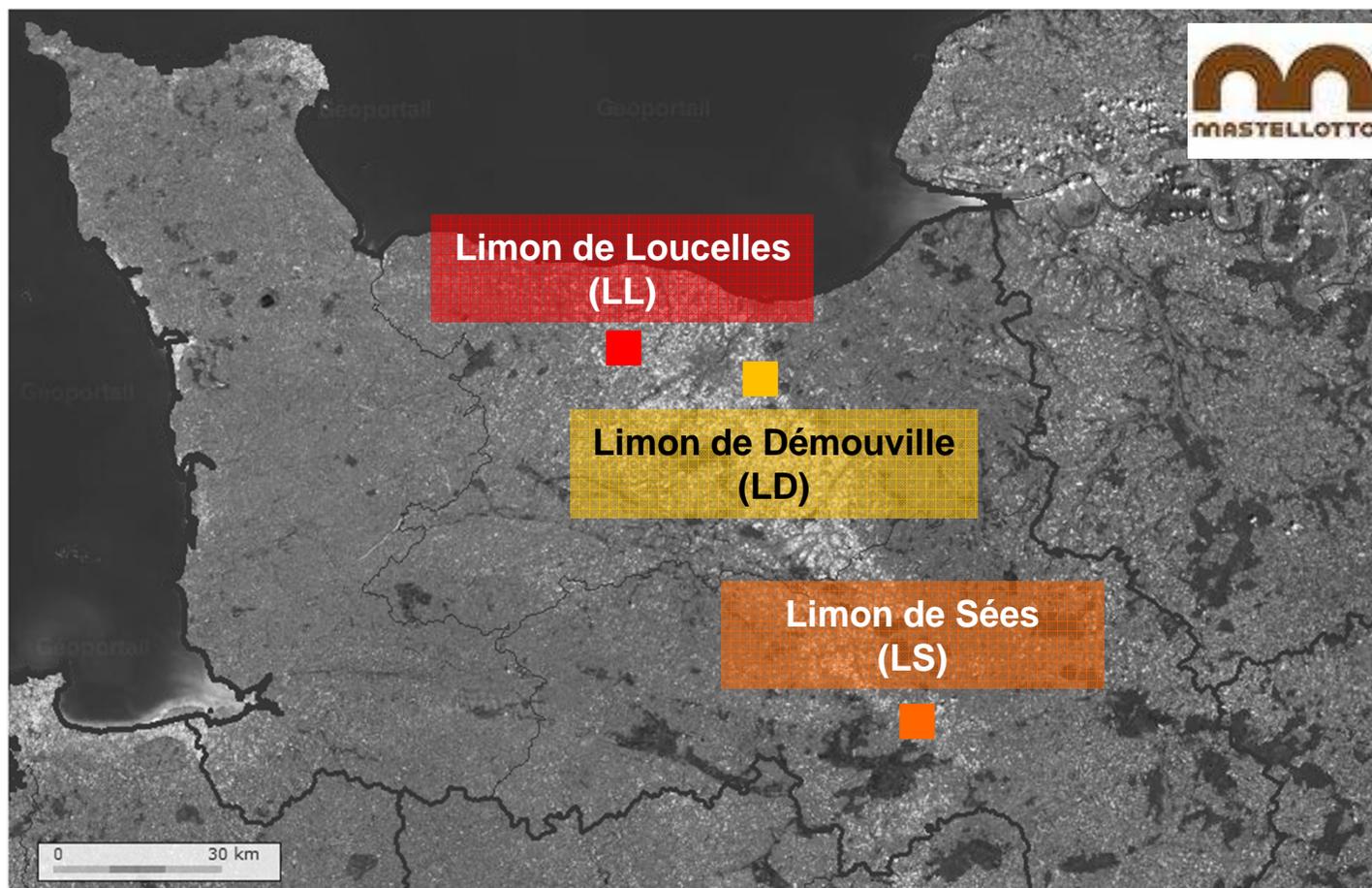
✓ **Enjeux :**

- augmenter l'efficacité du traitement des sols
- améliorer son acceptation en tant que solution alternative

✓ **Objectifs :**

- comprendre et mesurer l'influence des paramètres physico-chimiques sur le traitement en parallèle aux essais de caractérisation géotechnique
- définir l'influence des anions potentiellement perturbateurs

Localisation des prélèvements



Classification GTR et formulations de traitement :

- 1% CaO + 6% CEMII/B 32,5R
- 1% CaO + 6% ROLAC 645 LH

LL LS LD



Caractéristiques de compactage

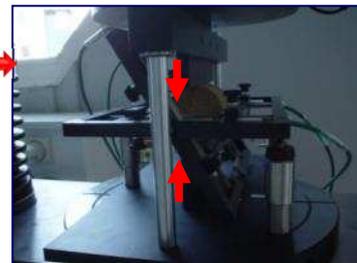
Portance immédiate



- Aptitude au traitement :

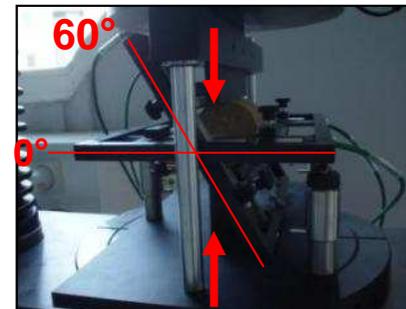


R_{it} (MPa)

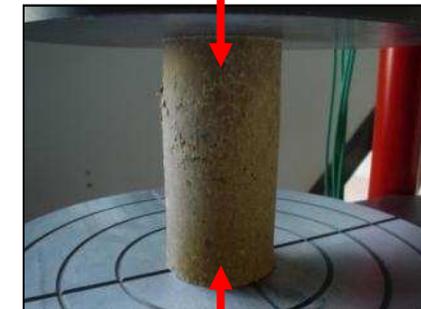


Gonflement volumique
 G_v (%)

- Suivi des performances mécaniques :



$[R_t ; E]$ (MPa ; MPa)

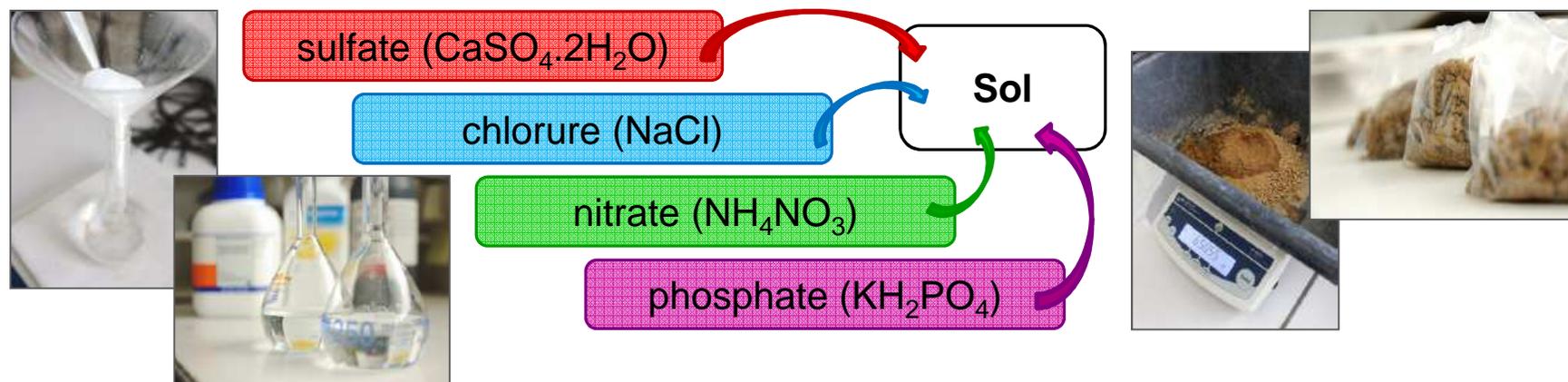


R_c (MPa)

$R_c \text{ max} / \text{min}$

28 / 180 jours

Dopage en anions :



1, 3, 5, 7, 10 g d'anion.kg⁻¹ de sol sec

+ couplage

1 et 10 g d'anion.kg⁻¹ de sol sec

Essais d'aptitude au traitement :

Gv (%) ; R_{it} (MPa)

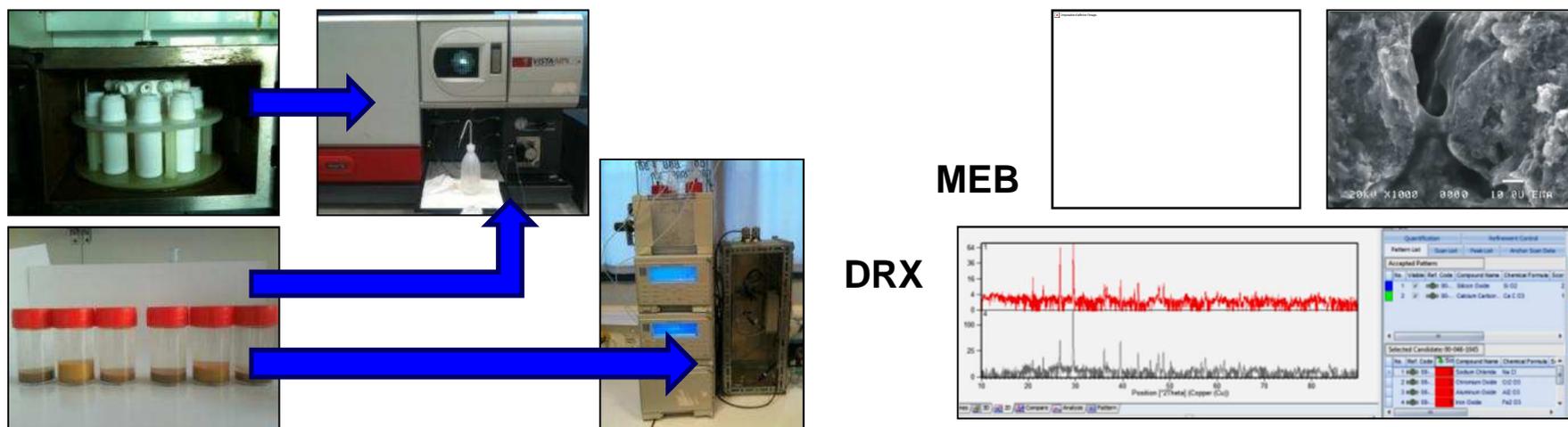
Résistances mécaniques en cure normale :

R_c (MPa) ; [R_t ; E] (MPa ; MPa)

R_c max

180 jours

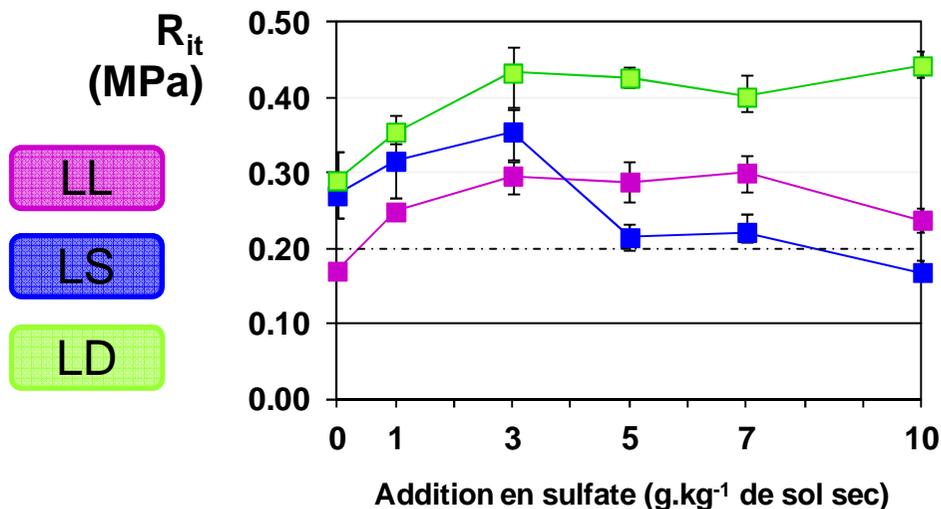
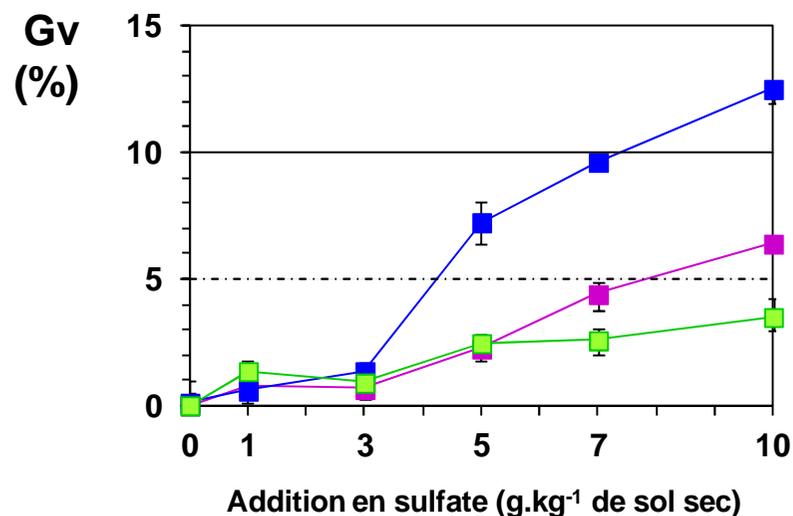
Caractérisations physico-chimique et microstructurale



- Concentrations totales et solubles à l'eau : Al, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Ni, Pb, S, Si, Sr, Ti et Zn
- Concentrations de la fraction soluble à l'eau : Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} et SO_4^{2-}
- pH

- Sols naturels
- Hydrates cimentaires
- Espèces minérales en lien avec le dopage

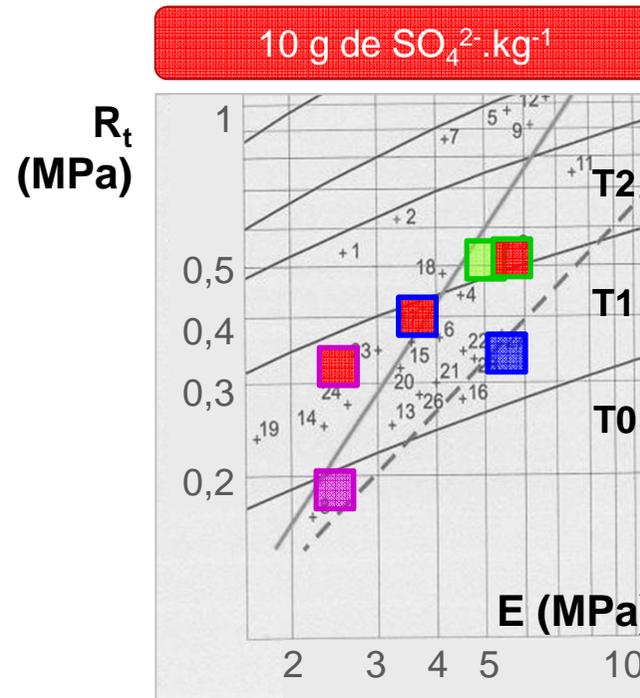
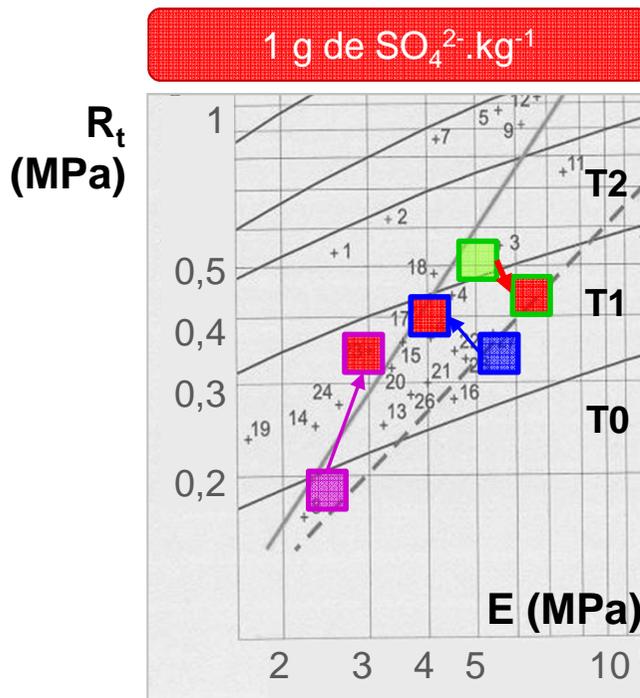
Dopage en gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: aptitude au traitement



Addition	1	3	5	7	10
LL					Gv
LS			Gv ; R _{it}	Gv ; R _{it}	Gv ; R _{it}
LD					

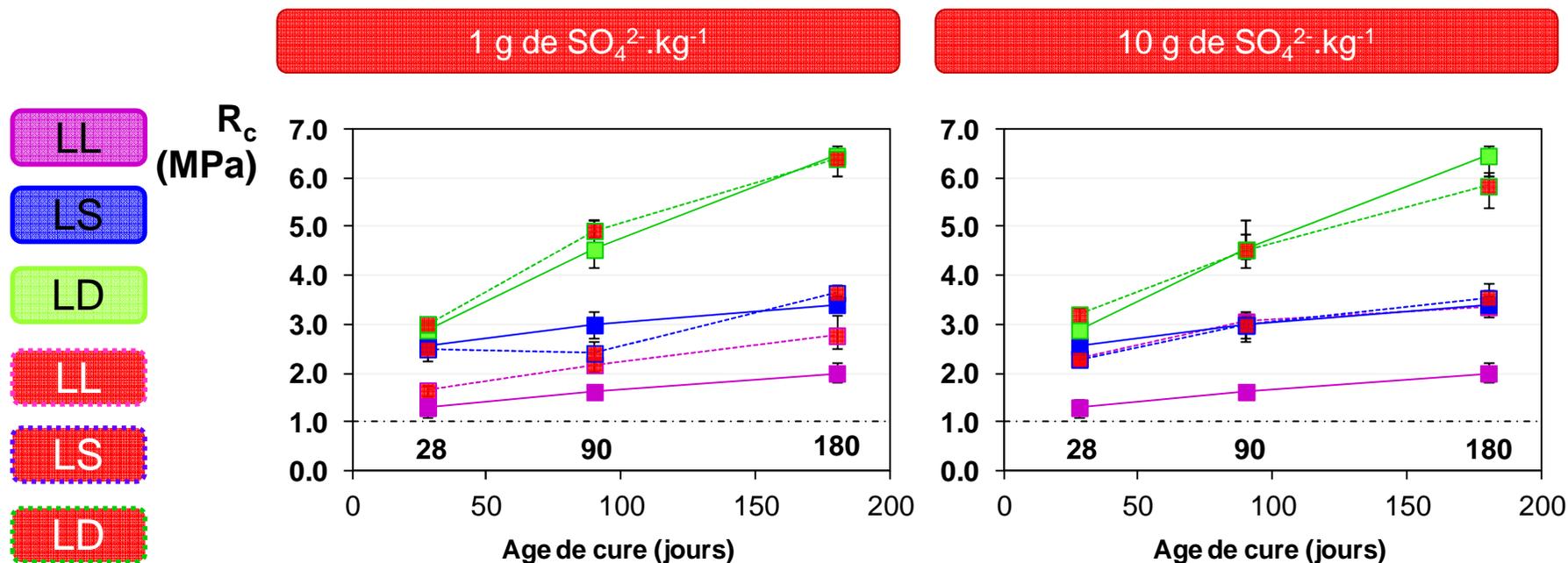
Dopage en gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: classes mécaniques

- LL
- LS
- LD
- LL
- LS
- LD



<i>Addition</i>	1	3	5	7	10
LL					Apt.
LS			Apt.	Apt.	Apt.
LD	[R_t ; E]				

Dopage en gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: maintien de la traficabilité



<i>Addition</i>	1	3	5	7	10
LL					Apt.
LS	R_c		Apt.	Apt.	Apt.
LD	[R_t ; E]				R_c

Influence du gypse sur le comportement géotechnique des sols traités

- ✓ Vers une généralisation du seuil (*applicable aux 3 sols*) :
 - **risque de diminution des performances : dès 1 g de $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{kg}^{-1}$**
 - **non validation d'une réutilisation en couche d'assise : à partir de 7 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$**

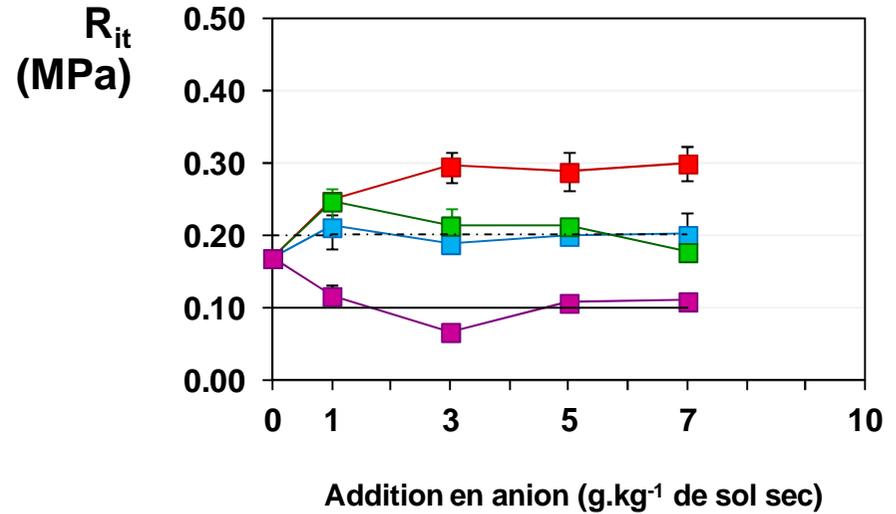
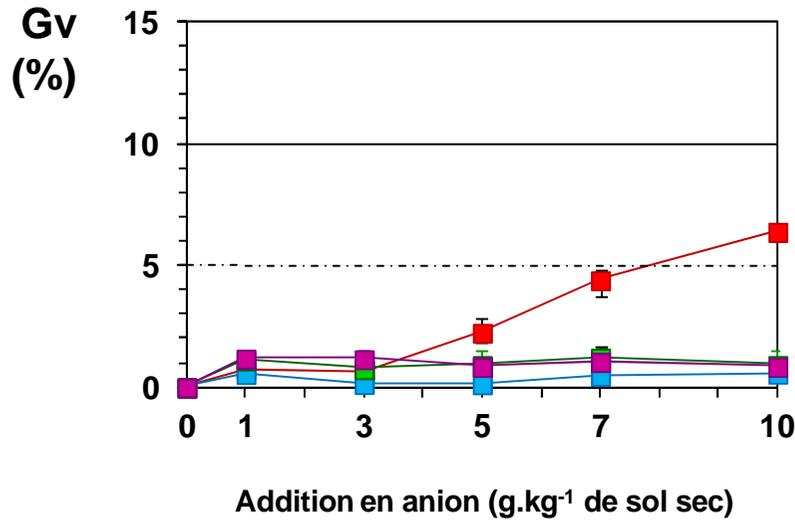
Influence des sulfates sur la microstructure des sols traités

Conclusion de l'investigation de la perturbation de solidification affectant LD + S10 + LHR :

- ✓ formation d'ettringite mise en évidence lors des observations MEB et accréditée par les analyses physico-chimiques
- ✓ les analyses minéralogiques ne permettent pas de confirmer cette présence
- ✓ les analyses de la fraction soluble à l'eau ne suffisent pas à expliquer la perturbation observée sur LD

LL

Dopage chimique de LL : aptitude au traitement

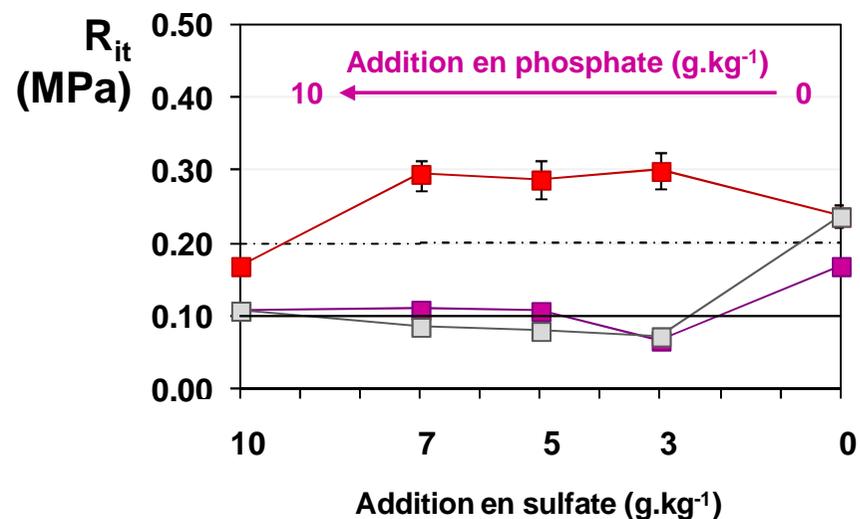
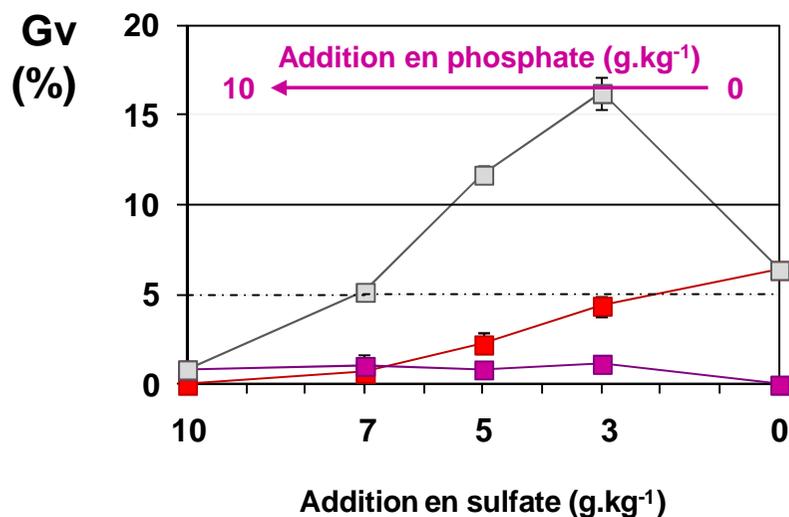


Addition	1	3	5	7	10
sulfate					Gv
chlorure					
nitrate					
phosphate	R _{it}				

LL



Dopage chimique de LL : aptitude au traitement Couplage $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – KH_2PO_4

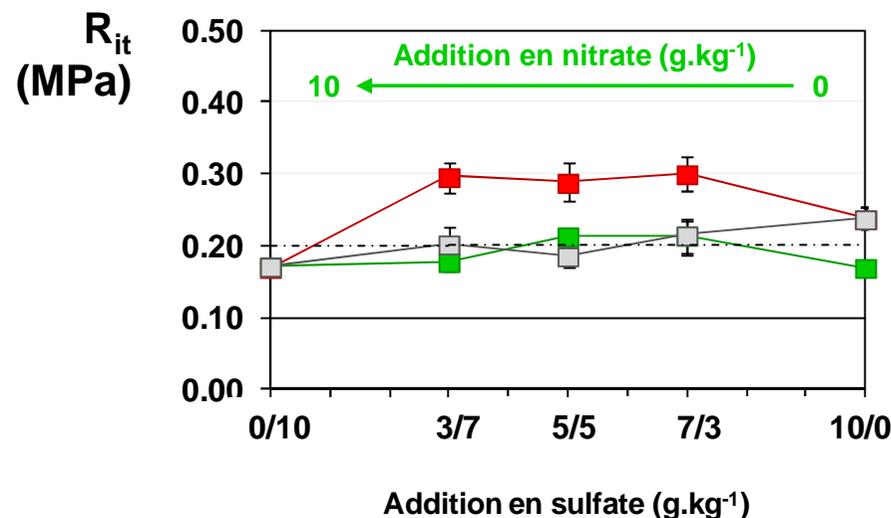
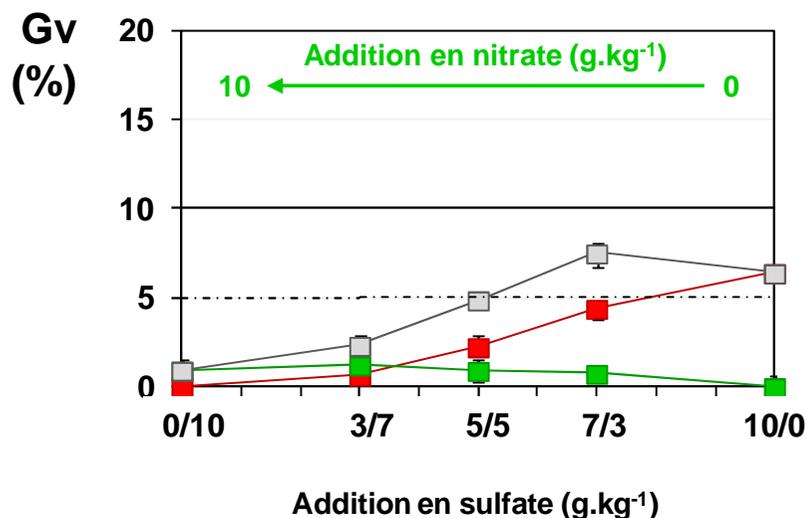


<i>Addition sulfate / anion</i>	0 / 10	3 / 7	5 / 5	7 / 3	10 / 0
sulfate	-	-	-	-	Gv
phosphate	R _{it}	R _{it}	R _{it}	R _{it}	-
couplage	R _{it}	Gv, R _{it}	Gv, R _{it}	Gv, R _{it}	Gv

LL



Dopage chimique de LL : aptitude au traitement Couplage $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – NH_4NO_3

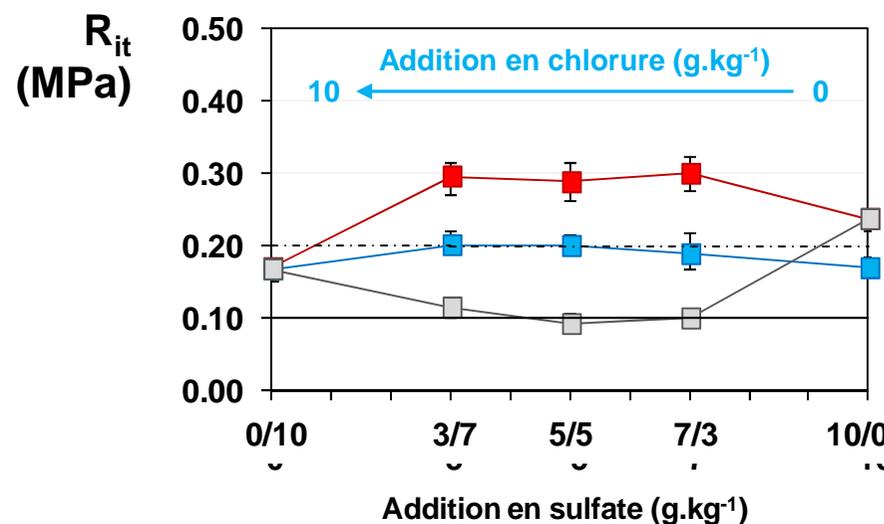
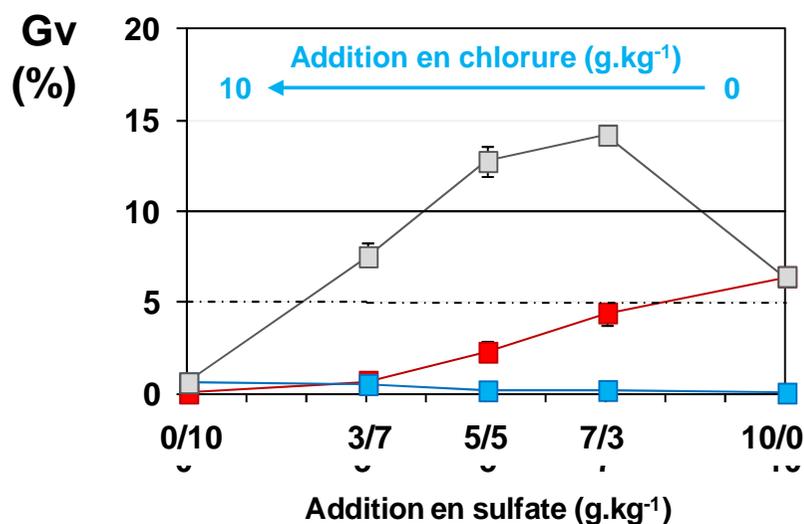


Addition sulfate / anion	0 / 10	3 / 7	5 / 5	7 / 3	10 / 0
sulfate	-	-	-	-	Gv
nitrate	-	-	-	-	-
couplage	-	-	Gv	Gv	Gv

LL



Dopage chimique de LL : aptitude au traitement Couplage $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – NaCl



Addition sulfate / anion	0 / 10	3 / 7	5 / 5	7 / 3	10 / 0
sulfate	-	-	-	-	Gv
chlorure	-	-	-	-	-
couplage	-	Gv, R_{it}	Gv, R_{it}	Gv, R_{it}	Gv

Détermination de seuils de perturbation de la solidification

- ✓ Conclusions sur l'influence des anions couplés :

Influence des sulfates ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en présence de :

▪ Phosphates (KH_2PO_4) :

- influence Gv et R_{it}
- perturbation dès 3 g de $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{kg}^{-1}$
- inaptitude à 5 g de $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{kg}^{-1}$

▪ Nitrates (NH_4NO_3) :

- influence Gv et R_{it}
- perturbation à partir de 5 g de $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{kg}^{-1}$

▪ Chlorures (NaCl) :

- influence Gv et R_{it}
- perturbation dès 3 g de $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{kg}^{-1}$
- inaptitude à 5 g de $\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{kg}^{-1}$

Détermination de seuils de perturbation de la solidification

- ✓ réponses géotechniques et physico-chimiques au dopage distinctes mais possibilité de généralisation de seuils de risques à l'ensemble des sols :
 - ❑ ions sulfate, nitrate et phosphate : **risque de diminution des performances dès 1 g d'anions.kg⁻¹**
 - ❑ ions chlorure : **risque à 10 g.kg⁻¹**
 - ❑ absence de remise en cause d'une réutilisation en application routière

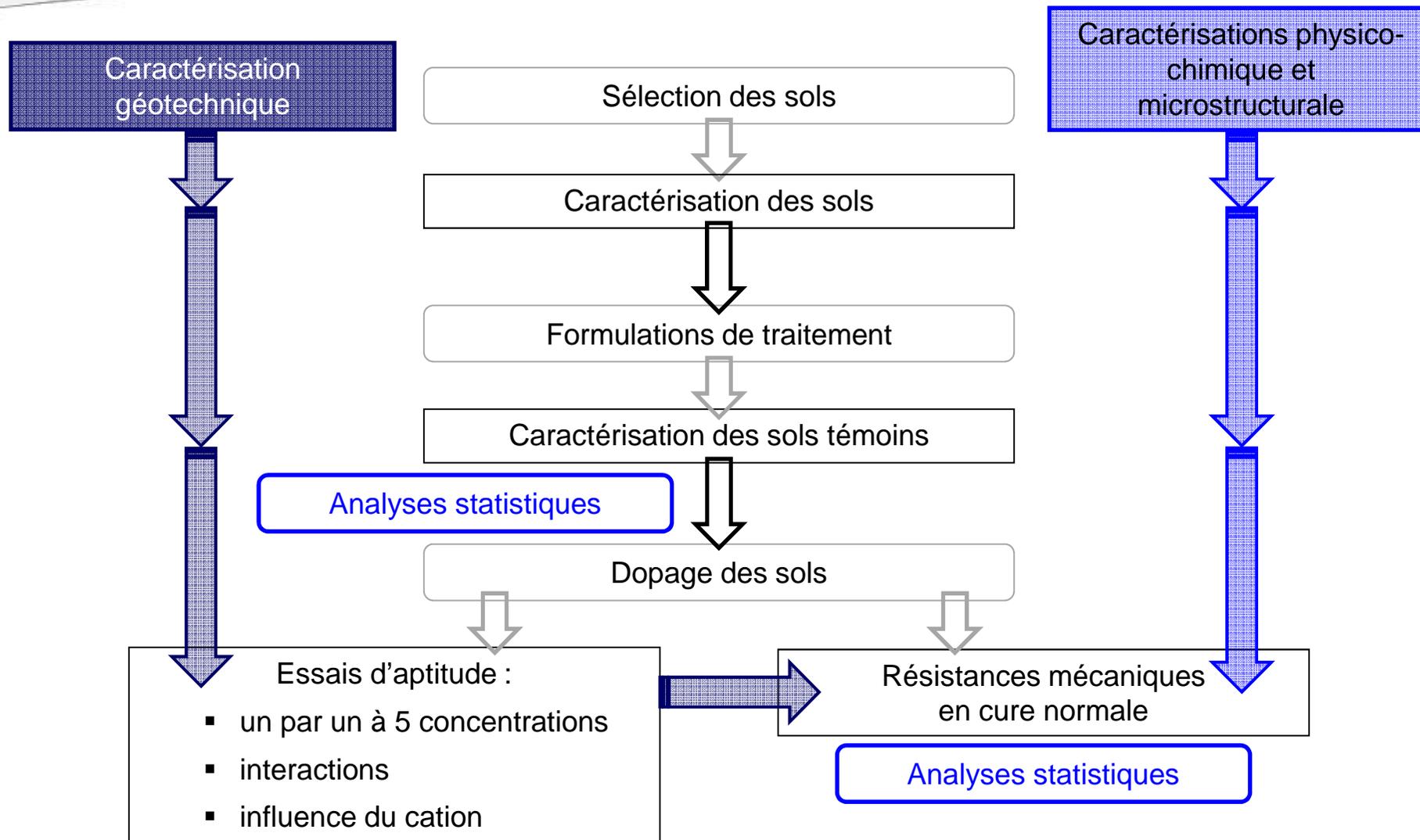
- ✓ remise en cause de la pertinence et de la représentativité de :
 - simples tests d'aptitude au traitement
 - l'approche anion par anion

- ✓ en l'état actuel des connaissances, l'évaluation du potentiel de perturbation ne peut pas se passer d'une étude au cas par cas

Merci de votre attention.

Dernières communications

- Saussaye L., Boutouil M., Baraud F., Leleyter L., 2012, “Soils treatment with hydraulic binders : physico-chemical and geotechnical investigations of a chemical disturbance”, **16th Nordic Geotechnical Meeting (NGM), 9-12 mai 2012, Copenhagen, Danemark, Article, Communication**
- Saussaye L., Boutouil M., Baraud F., Leleyter L., Hennequin D., 2012, “Soils treatment with hydraulic binders : physicochemical and geotechnical investigation methodology of a chemical disturbance”, **Geo-Environmental Engineering (GEE), 29-31 mai 2012, Caen, France, Article, Communication**
- Saussaye L., Boutouil M., Baraud F., Leleyter L., 2012, “Soils treatment with hydraulic binders : physico-chemical and geotechnical investigations of a chemical disturbance”, **International Symposium on Ground Improvement (IS-GI), 30 mai-1^{er} juin 2012, Bruxelles, Belgique, Article**
- Saussaye L., Boutouil M., Baraud F., Leleyter L., Abdo J., 2013, “Influence of chloride and sulfate ions on soils treated with hydraulic binders : physicochemical and geotechnical investigations”, **Road Materials and Pavement Design, special issue Stabilization and Recycling/Reclamation of Highway Pavements with Hydraulic Binders**



Comparaison entre les 3 sols

✓ Similitudes :

- classe GTR de la fraction 0/50mm :
A₁
- concentrations totales en Al, Cr, Cu, K, Ti, Zn proches
- enrichissement en Cd et Zn
- *en se limitant aux éléments « enrichis » et aux anions :*
 - concentrations de la fraction soluble à l'eau en Cd, Pb, Zn et PO₄³⁻ < lim. détec.
 - concentrations de la fraction soluble à l'eau en Ca, S et SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻ proches

✓ Différences :

- pourcentage de la fraction 0/50mm sur 0/Dmax
- minéralogie
- concentrations totales en Ca, Sr et Pb distinctes
- rapport des concentrations variables

Comparaison entre les 3 sols traités au LHR

✓ Similitudes :

- augmentation de %CaCO₃
- concentrations totales : **Cd et S (y compris LS)**
- fraction soluble : Zn, Pb, Cd et PO₄³⁻ < lim. détec.

✓ Différences :

- comportements géotechniques
- minéralogie
- concentrations totales : Ca et Zn
- fraction soluble : **NO₃⁻ et Cl⁻**
- fraction soluble de LS : **Ca, S et SO₄²⁻**