



Stabilisation des sols traités à la chaux et leur comportement face au gel

Thèse CIFRE de Mlle **NGUYEN Thi Thanh Hang (2011-2014)**

Encadrants: **Y. J. Cui** (ENPC), **A. M.Tang** (ENPC), **G. Herrier** (Lhoist),
V. Ferber (Charier), **F. Plier** (Urano), **C. Mauduit** (CETE de Lyon)

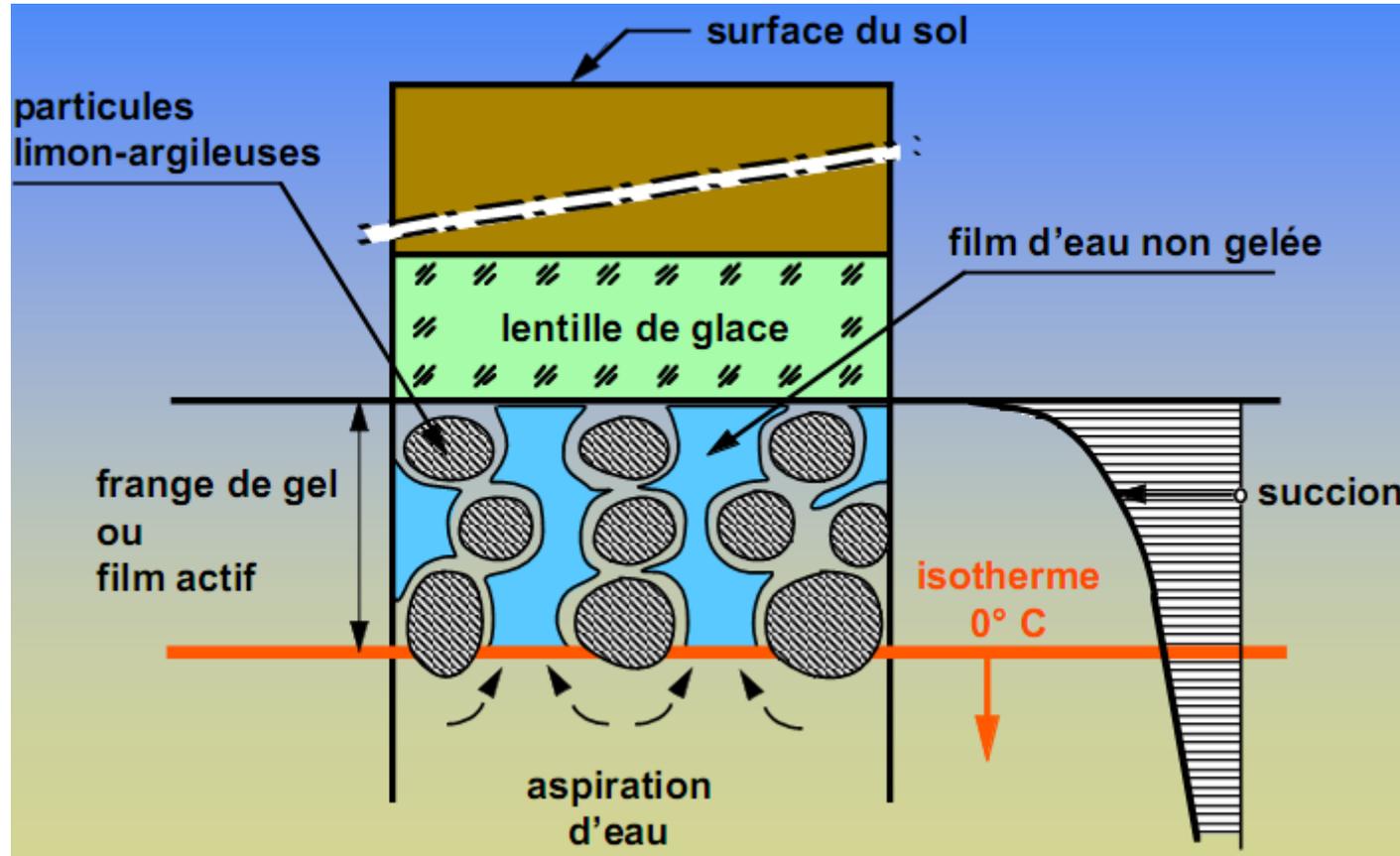
Plan

- **Etat actuel de connaissances**
- **Objectifs et méthodologie adoptée**
- **Sols étudiés**
- **Premiers résultats**
- **Conclusions**

Plan

- **Etat actuel de connaissances**
- Objectifs et méthodologie adoptée
- Sols étudiés
- Premiers résultats
- Conclusion

Sol gélif et Sol non-gélif

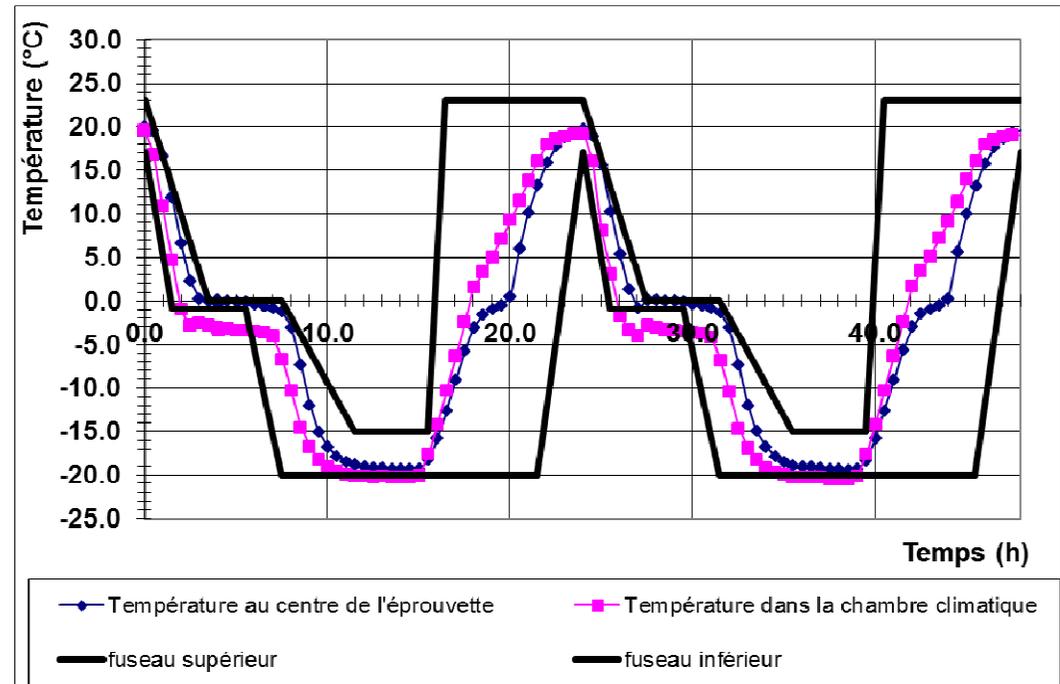


(Dysli M. 1991)

Gonflement induit important: **sol gélif**

Gonflement induit faible: **sol non-gélif**

Identification de la gélifraction en chambre climatique (pr EN 13286-54)



$$RFT = \frac{Rc_{\text{après gel/dégel}}}{Rc_{\text{ref}}} \times 100\%$$

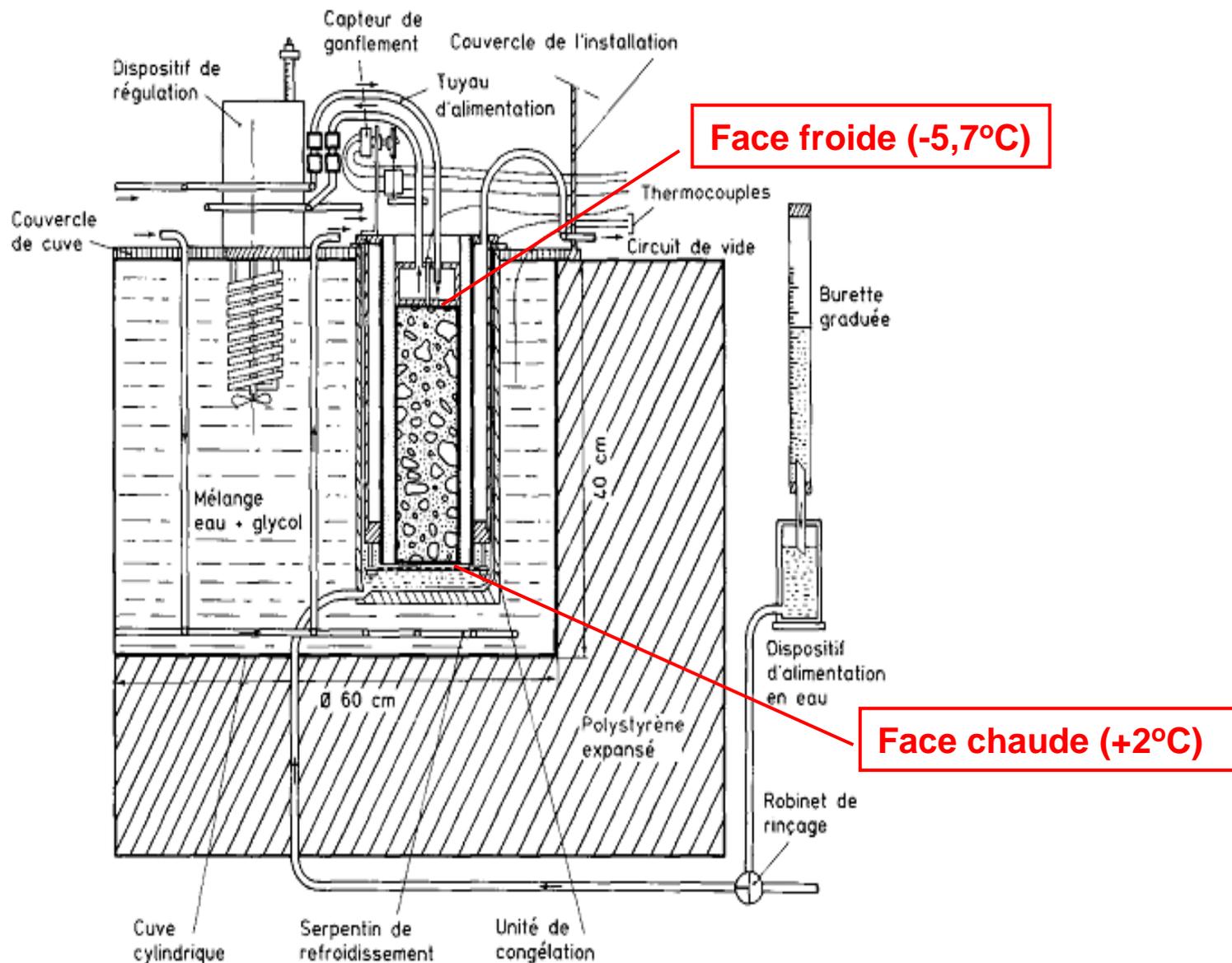
RFT : Résistance au gel

R_c après gel/dégel : Résistance à la compression simple après 10 cycles de gel/dégel

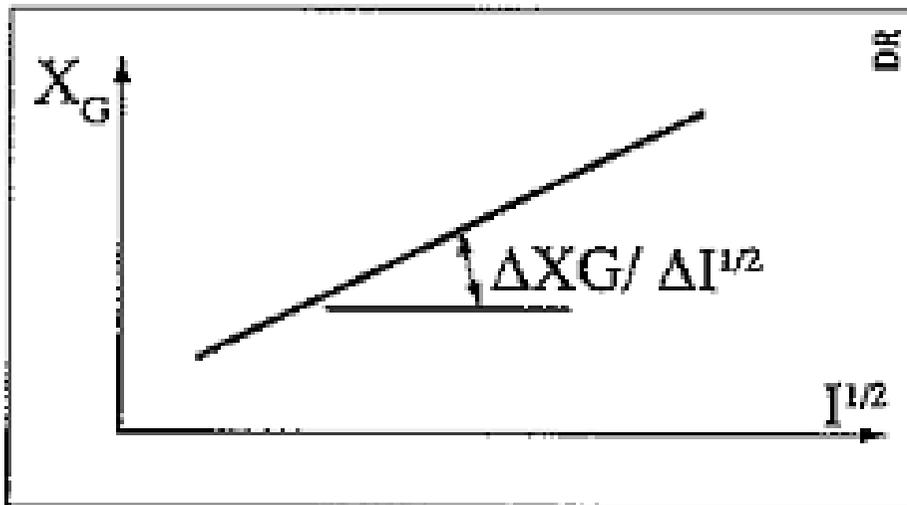
$R_{c\text{ref}}$: Résistance à la compression simple de référence

Identification du géligonflement

(NF P 98-234-2)



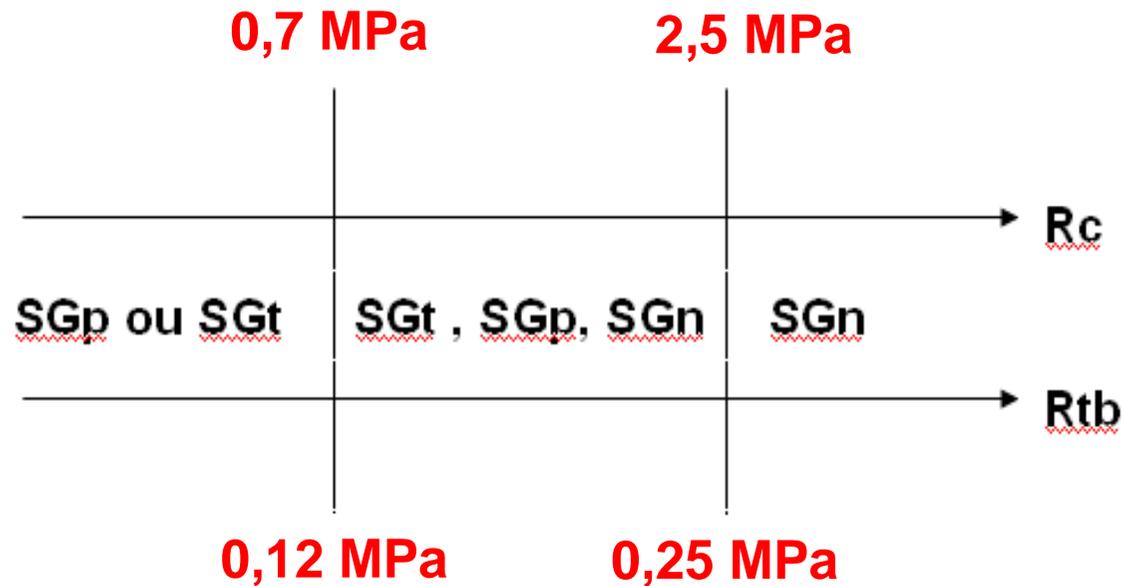
Critère de sensibilité au gel basé sur l'indice de gel (NF P 98-234-2)



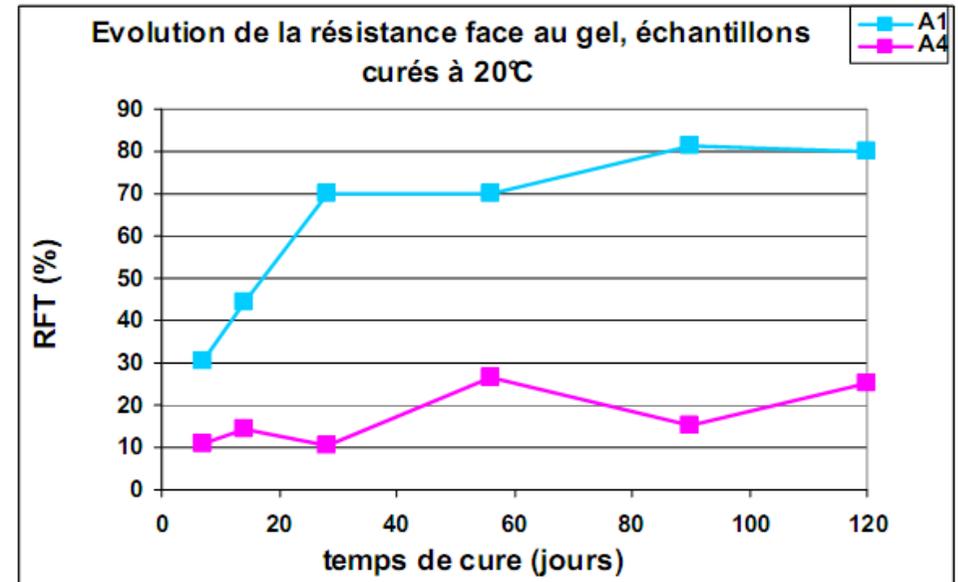
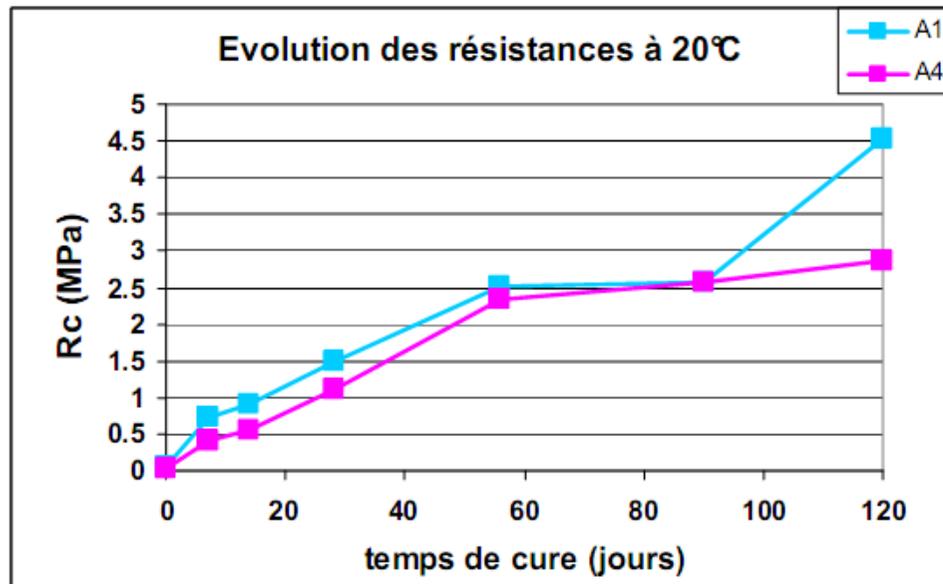
Critère
SGn : Pente < 0,05
SGp : 0,05 < Pente < 0,4
SGt : Pente > 0,4

- X_G : gonflement de l'éprouvette de sol
- I : Indice de gel ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{jour}$)
- $\Delta X_G / \Delta I^{1/2}$: pente

Critère de sensibilité au gel basé sur R_c ou R_{tb} - GTS



Problème de pertinence du critère $R_c = 2,5$ MPa



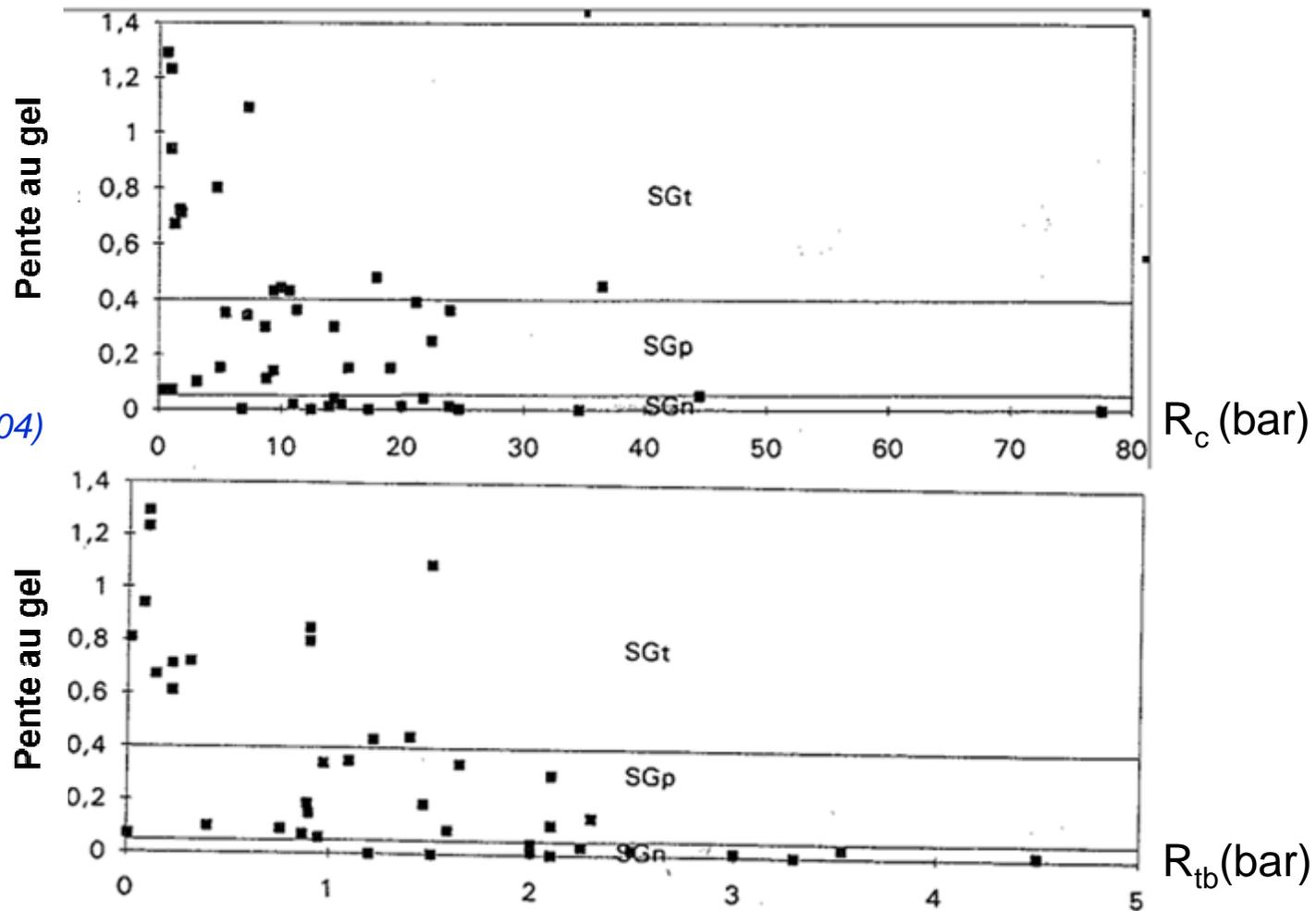
(Marrot 2010)

Critère indique SGn après 90 jours de cure

RFT indique une sensibilité au gél/dégel, surtout pour A4

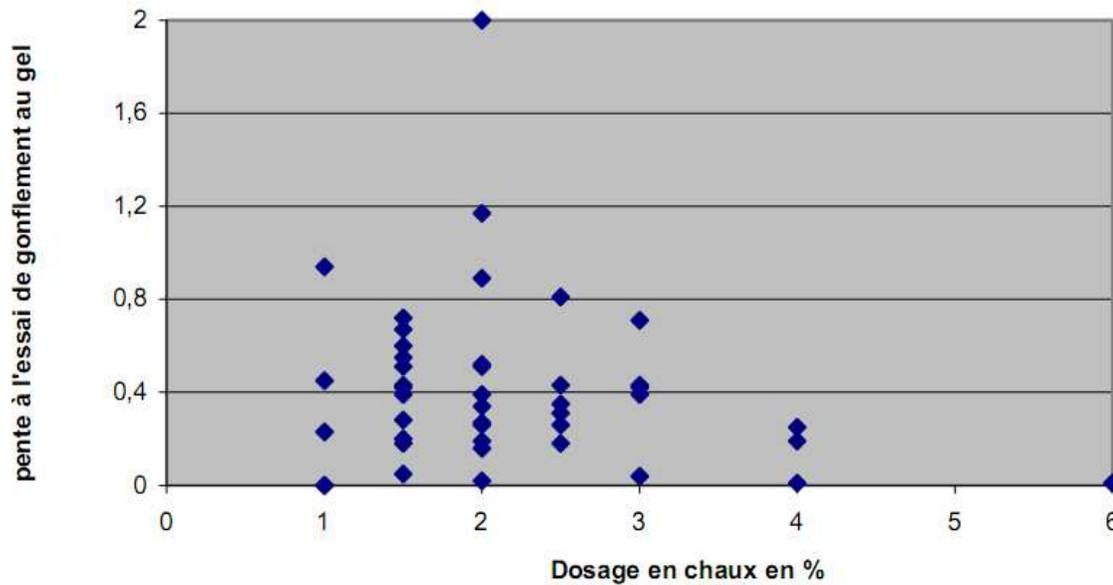
Vérification des critères basés sur la pente et sur R_c/R_{tb} pour différents sols: A1, A2, B5, B6

(J. Livet. 2004)

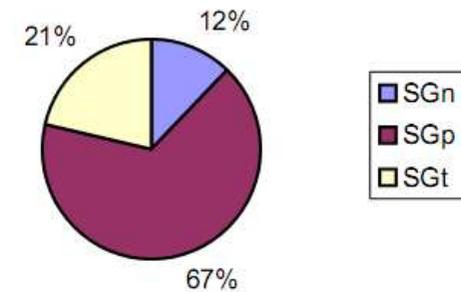


- Certains sols traités non – gélifs même quand $R_c < 2,5$ MPa ou $R_{tb} < 0,25$ MPa
- Un sol très gélif à $R_c = 3,8$ MPa $> 2,5$ MPa

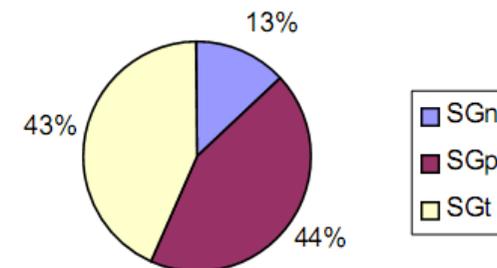
Effet du dosage de chaux pour sols A2 et A3 (Greffier C. et Livet J. 2003)



Représentation des classes de sensibilité au gel des matériaux A2 et A3 non traités



Représentation des classes de sensibilité au gel des matériaux A2 et A3 traités à la chaux



- L'ajout de chaux diminue la sensibilité au gel, mais grande variabilité
- un dosage à 6% (échantillon traité après 24 jours) permet de neutraliser la sensibilité au gel
- Mais statistiquement le traitement à la chaux augmente la sensibilité au gel

Tenue au gel des sols fins traités à la chaux (Puiatti, 2005)

| Essais de géli-gonflement : Origine Lrpc de Clermont-Ferrand | | | | | | | |
|--|---------------------|--------------|--------------------------|---------------|-----------------------|-------|----------|
| Année | Description | Matériau | Géivité avant | Géivité après | Pente maxi ap. trait. | % CaO | Age (j) |
| 1973 | Liaison Est-Ouest | B6 | SGp | SGn | | 4 | 7 |
| 1978 | Argile de Bouxières | A2 | SGp | SGt | | 1 | 28 |
| 1979 | A36 Beaune | A1 | SGp | SGt | | 1,5 | 28 |
| | | | | SGp | 0,39 | 3 | 28 |
| 1979 | A42 Anemasse | A1 | SGt | SGn | | 4 | 28 |
| | | | | SGn | | 6 | 28 |
| | | | | SGn | | 4 | 60 |
| | | | | SGn | | 6 | 60 |
| 1981 | | A2 | ? | SGn | | 2,5 | 28 |
| 1985 | Marne de Riom | A2 | ? | SGp | 0,10 | 2 | Immédiat |
| 1986 | A71 Argile | A3 | SGt | SGt | | 2 | 28 |
| | | | | SGn | | 2 | 28 |
| | | | | SGt | | 1,5 | 3 |
| 1987 | A6 | A2 | ? | SGt | | 3 | Immédiat |
| 1989 | A20 Uzerche | Arène | SGt | SGt | | 2 | Immédiat |
| | | | | SGt | | 2 | 90 |
| | | | | SGt | | 2 | 180 |
| 1996 | Arène granitique | B5 | SGt | SGn | | 6 | 28 |
| | | | | SGn | | 6 | 90 |
| 1996 | Arène de gneiss | A1 | SGt | SGn | | 6 | 28 |
| | | | | SGn | | 6 | 90 |
| 1996 | Terre noire | A4 | SGp | SGn | | 6 | 28 |
| | | | | SGn | | 6 | 90 |
| 1996 | Craie | CR1A1 – R12s | SGt <i>Penre 3,12</i> | SGt | | 6 | 28 |
| | | | | SGt | | 6 | 90 |

En vert : SGn = non gélif (pente < 0,05)

En rouge : SGt = très gélif (pente > 0,40)

En jaune : SGp = peu gélif

Remarques

- Deux approches normalisées: gélifonflement et gélifraction
- Critères établis avec pente et R_c/R_{tb}
- Résultats de sensibilité au gel/dégel non concluants
- **Nécessité de mieux comprendre les mécanismes intervenant dans le processus de gel/dégel afin d'améliorer les critères existants ou en définir des nouveaux plus pertinents**

Méthodologie adoptée

**Pragmatique : comparaison entre sols traités
et non-traités**

- **Comportement à moyen et long terme**
- **Comportement de gélifraction**
- **Comportement de géligonflement**
- **Observation microstructurale**

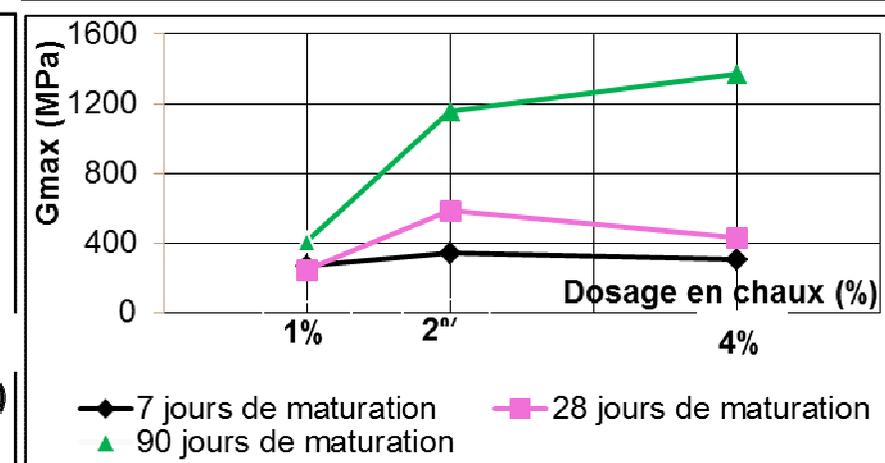
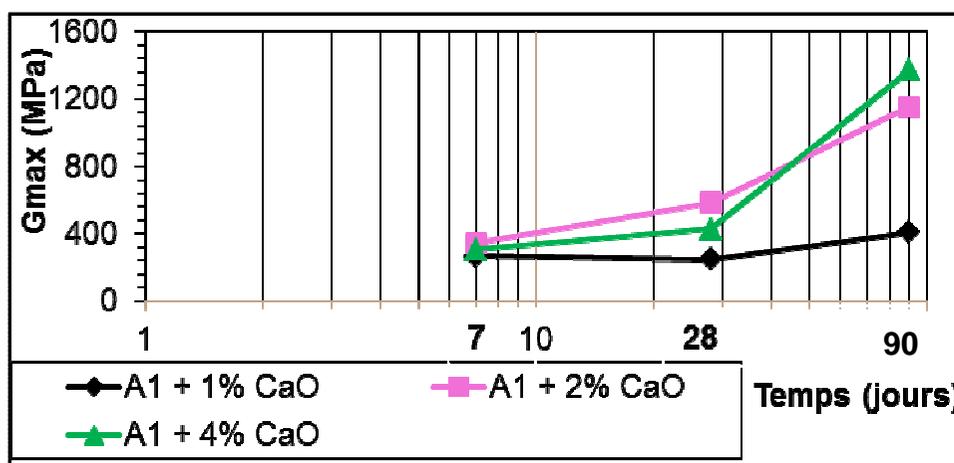
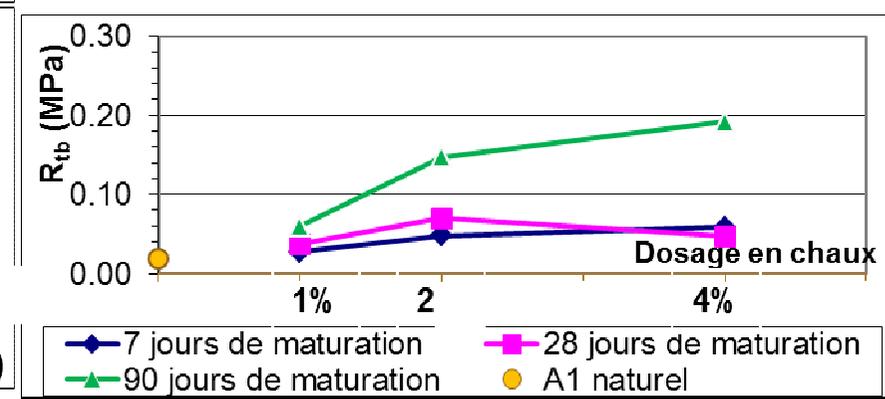
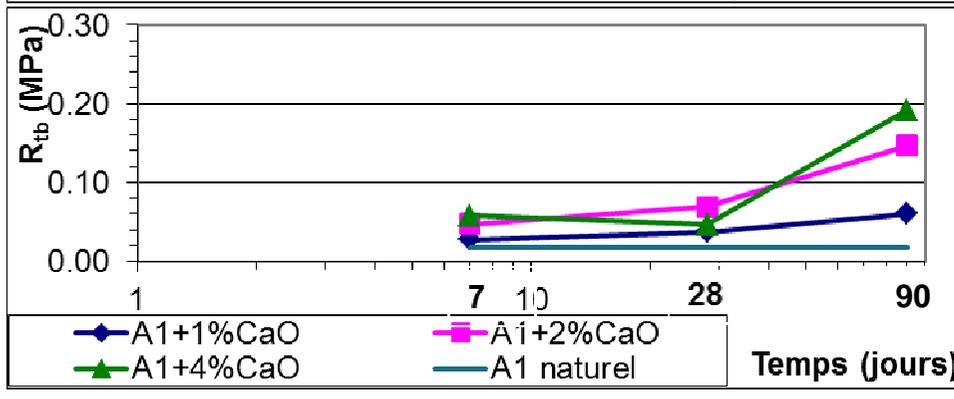
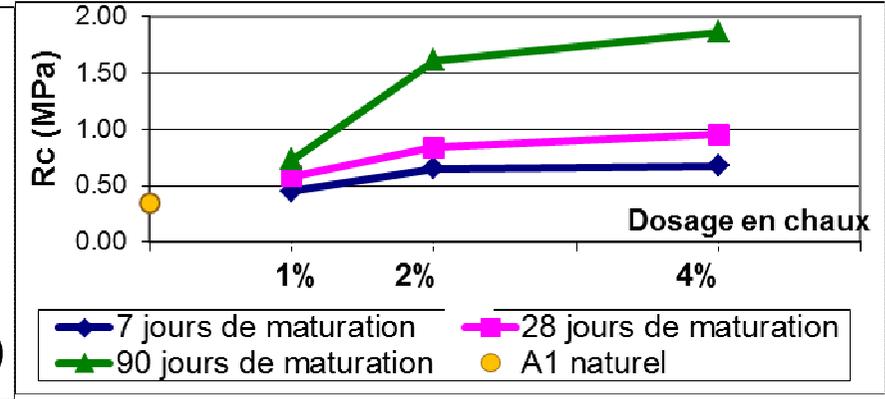
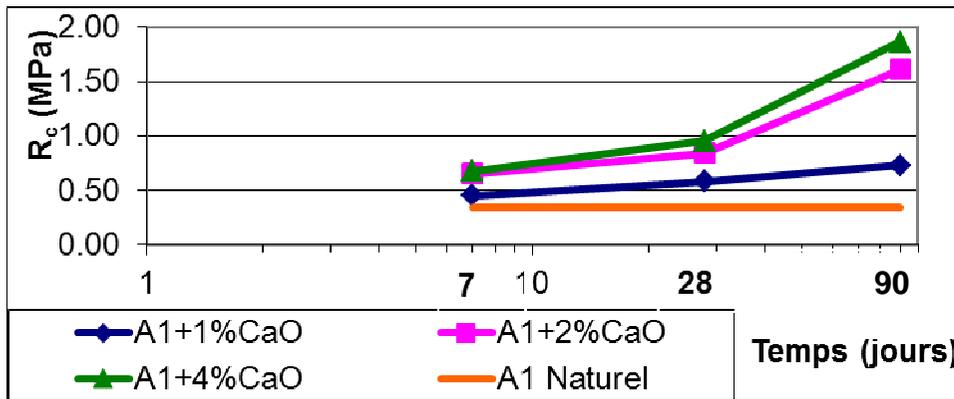
Sols étudiés

| No | Sol | Provenance |
|----|--|--|
| 1 | Limon A1 de MLD | Marche - Les - Dames, Namur, Belgique |
| 2 | Limon argileux A2 | Chantier de FERRIERES EN BRIE (77), France |
| 3 | Argile marneuse A3 | Charleville Mézières |
| 4 | Argile limoneuse brune A1 | Lons Le Saunier, France |
| 5 | A3 limite A4 | Lons Le Saunier, France |
| 6 | Sable argileux brun B5 | Pesmes, 70140 Haute – Saône, France |
| 7 | Sable argileux ou graveleux B6 | "Le Pas de Piron" - RD158 - 17270 CLERAC , France Projet SEA COSEA – SGI – Section G |
| 8 | Sable limoneux B5 | |
| 9 | Argile sableuse ou plastique A2 | |
| 10 | Argile +/- limoneuse A2 | DBT 1072, Projet LGV SEA Tours- Bordeaux – Section C |
| 11 | Argile +/- plastique ocre et grise A3 | DBT 1006, Projet LGV SEA Tours- Bordeaux – Section C |

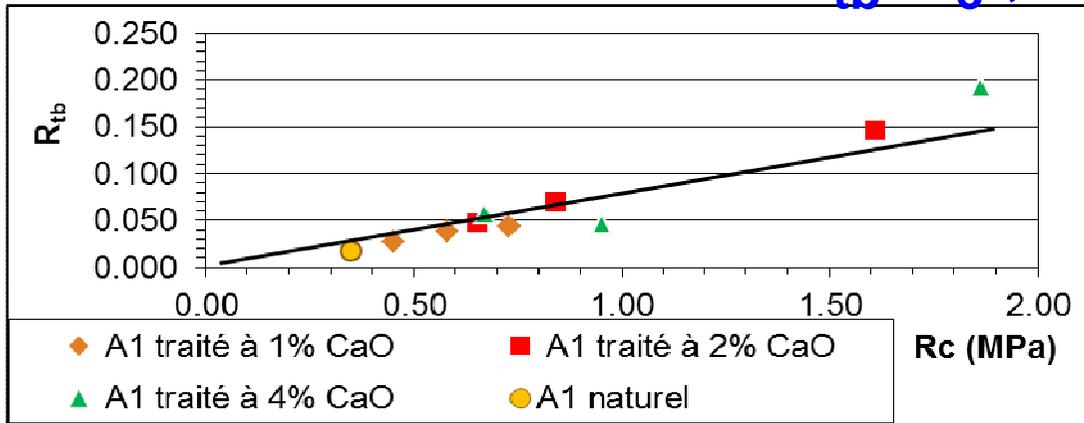
Plan

- Etat actuel de connaissances
- Objectifs et méthodologie adoptée
- Sols étudiés
- **Premiers résultats**
- Conclusion

R_c , R_{tb} , G_{max} du sol A1

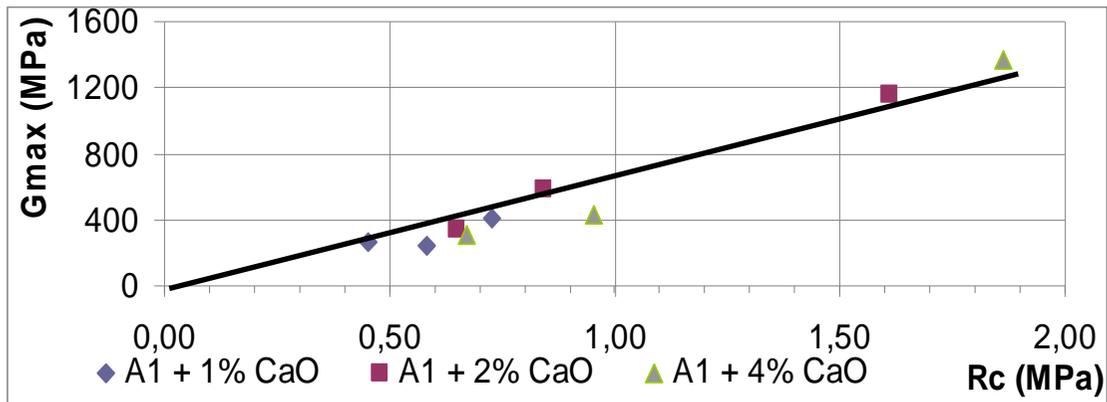


Corrélations entre R_{tb}/R_c , R_c/G_{max} , R_{tb}/G_{max}



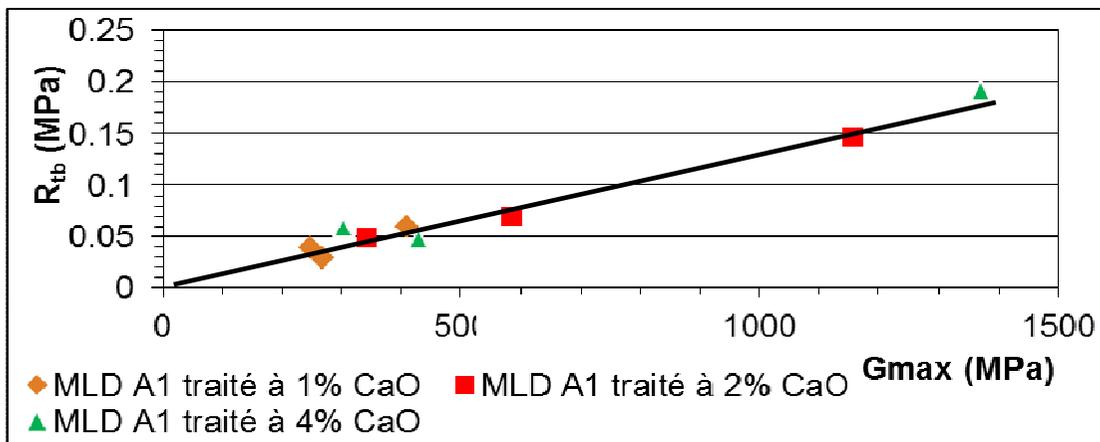
$$R_{tb} = R_c / 11$$

$$R^2 = 0,950$$



$$G_{max} = 571 R_c$$

$$R^2 = 0,965$$

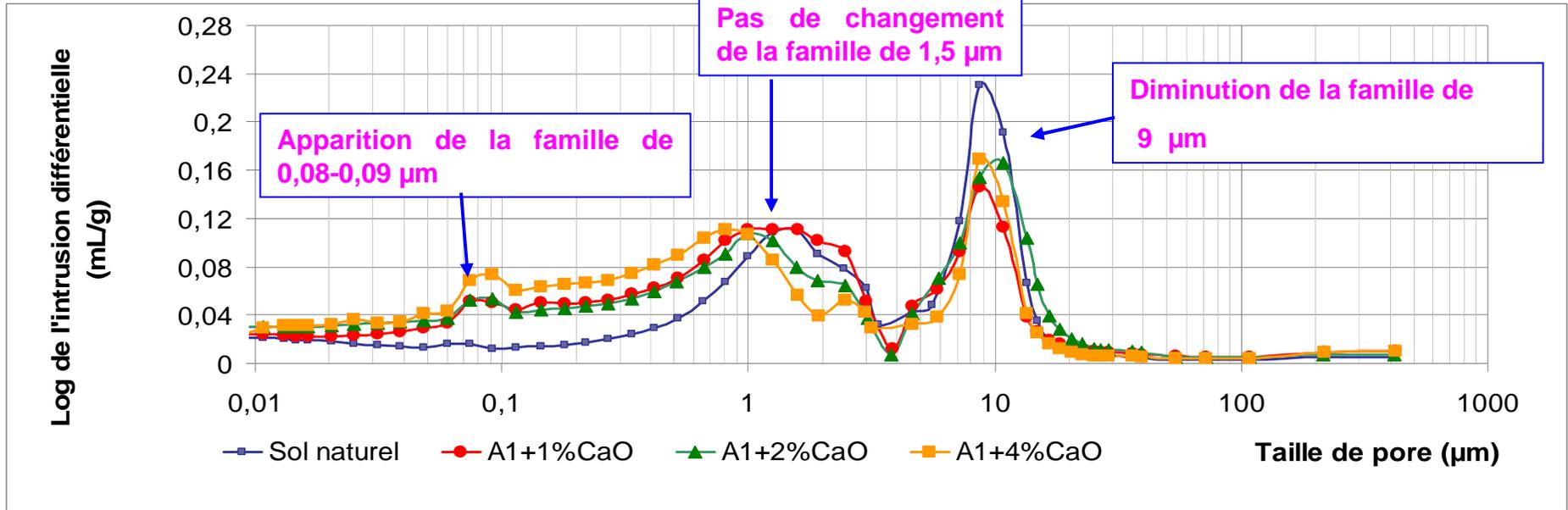


$$R_{tb} = 0,00014 G_{max}$$

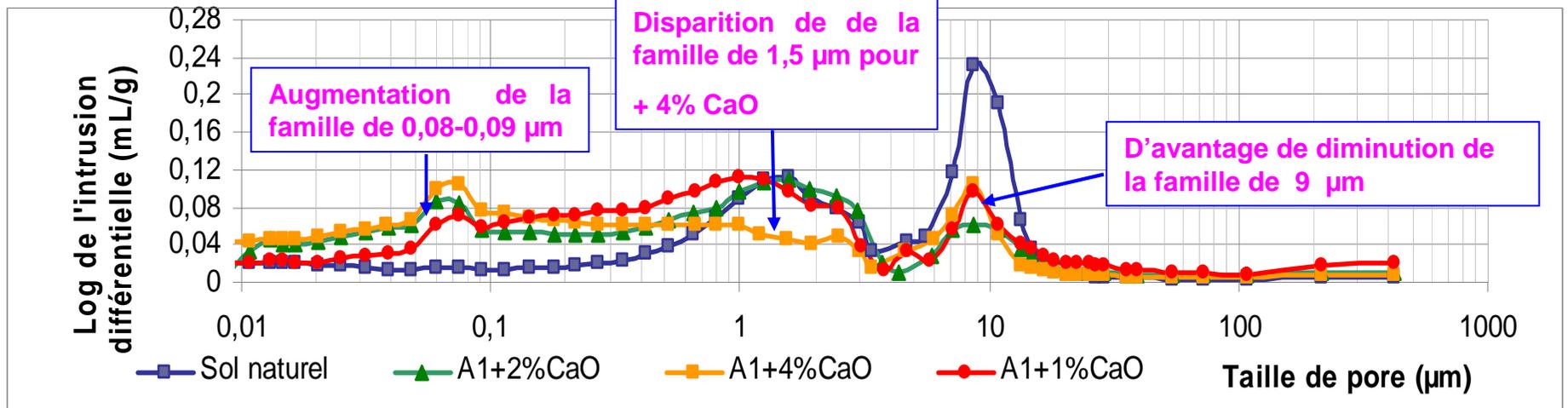
$$R^2 = 0,970$$

R_{tb} se corrèle mieux avec le G_{max} : via la cohésion

Courbes porosimétriques après 28 et 90 jours de cure



28 jours de cure



90 jours de cure

Essais de gélifraction sur le sol A1



1% CaO, 7 jours de cure, après cycles gel/dégel. Éprouvette cassée avant l'essai de R_c , pas RFT



1% CaO, à 28 jours de cure, après cycles gel/dégel. Éprouvette cassée avant l'essai de R_c , pas RFT



1% CaO, à 90 jours de cure, après cycles gel/dégel. Éprouvette cassée avant l'essai de R_c , pas RFT



2% CaO, 7 jours de cure, après cycles gel/dégel. Éprouvette cassée avant l'essai de R_c , pas RFT



2% CaO, 28 jours de cure, après cycles gel/dégel. **RFT = 17,5%**



2% CaO, 90 jours de cure, après cycles gel/dégel. **RFT = 61,5%**



4% CaO, 7 jours de cure, après cycles gel/dégel, **RFT = 30%**

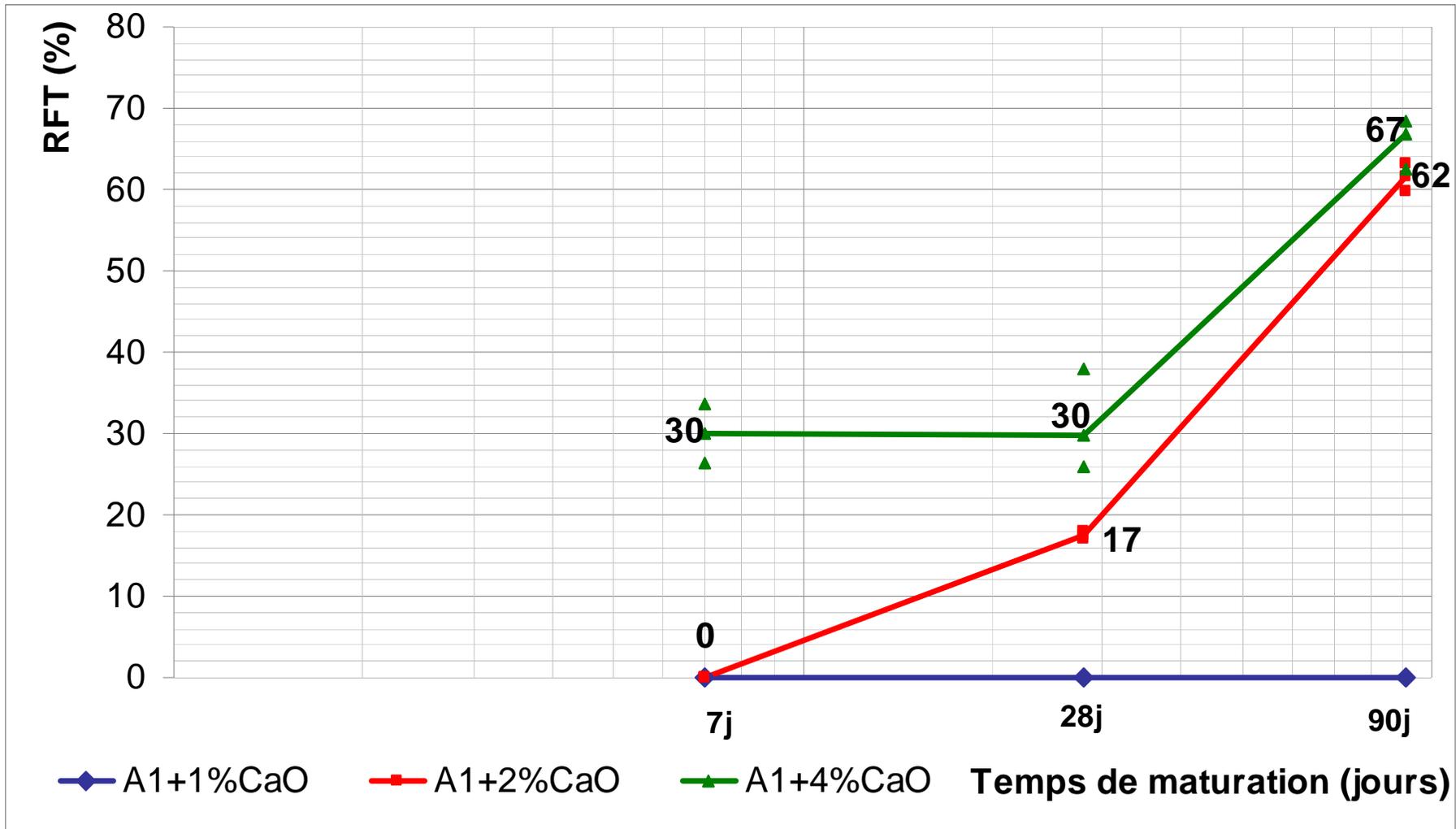


4% CaO, 28 jours de cure, après cycles gel/dégel, **RFT = 29,6%**



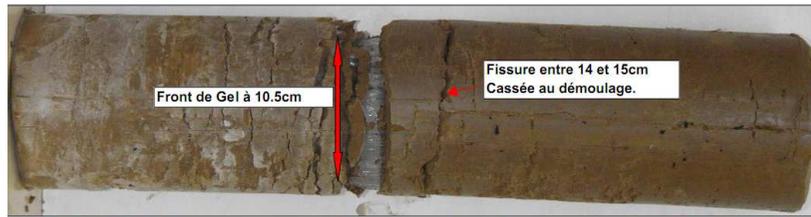
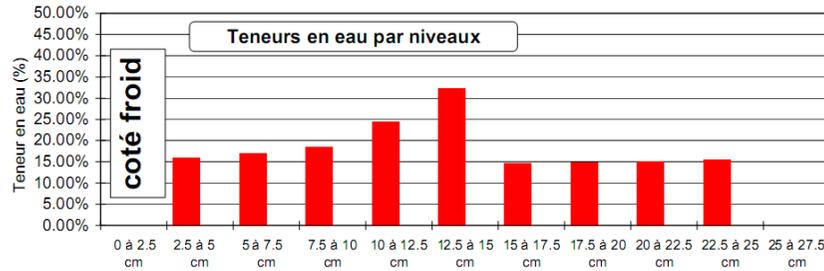
4% CaO, 90 jours de cure, après cycles gel/dégel, **RFT = 66,7 %**

RFT du sol A1 dans le temps et avec différents dosages

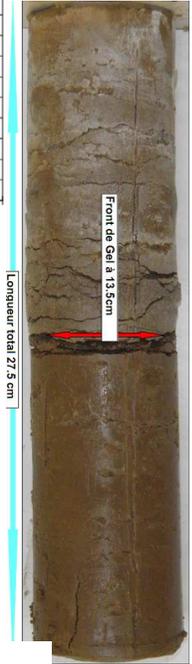
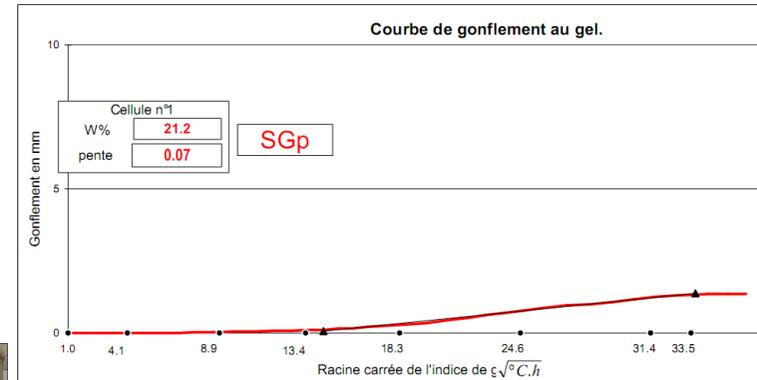
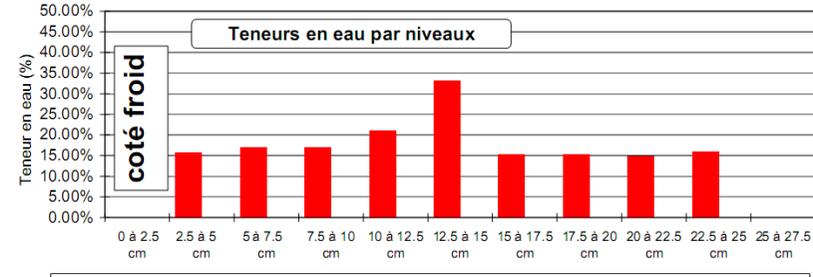


Essais de géligonflement sur A1

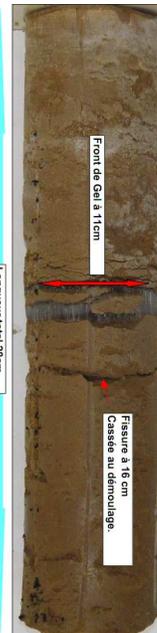
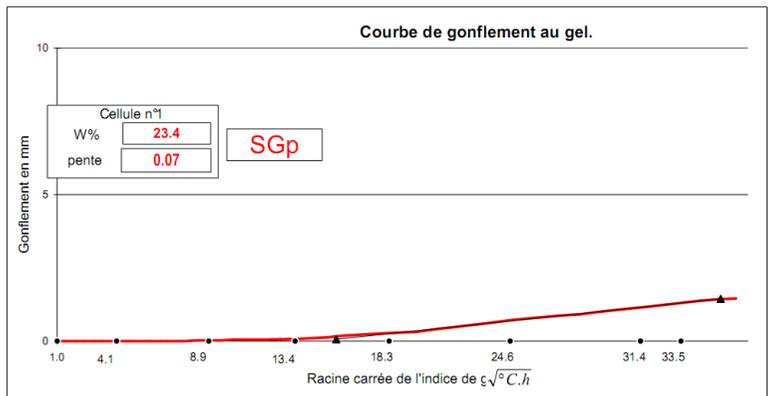
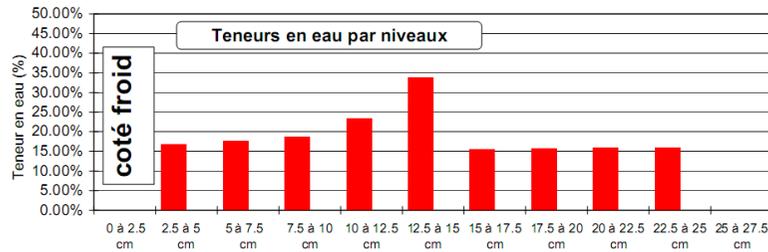
A1 + 1%CaO, 28 jours, Échantillon 1



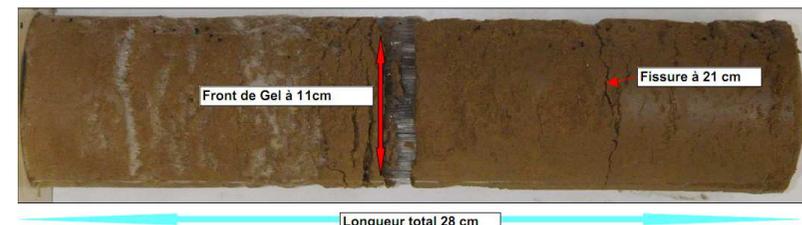
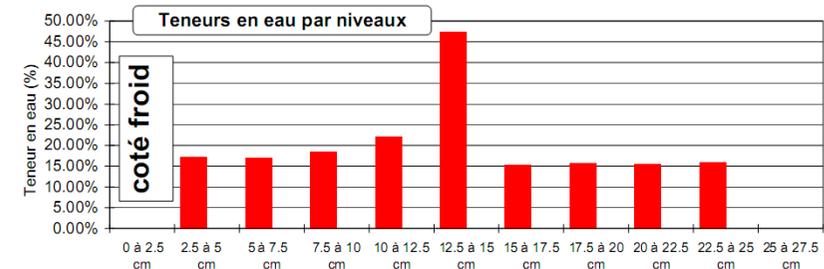
A1 + 1%CaO, 28 jours, Échantillon 2



A1 + 2%CaO, 28 jours, Échantillon 1

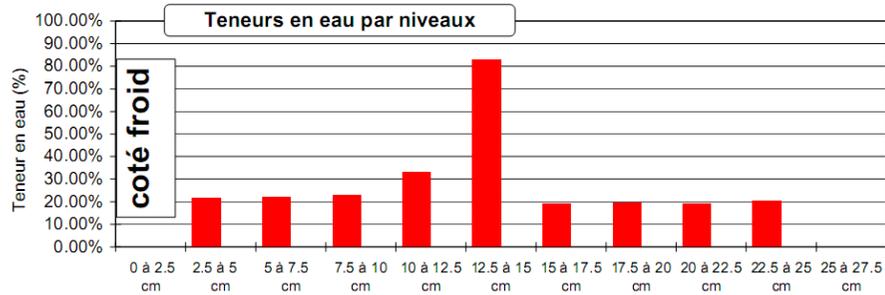


A1 + 2%CaO, 28 jours, Échantillon 2

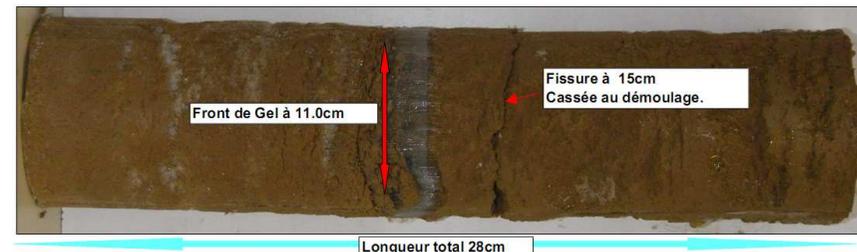
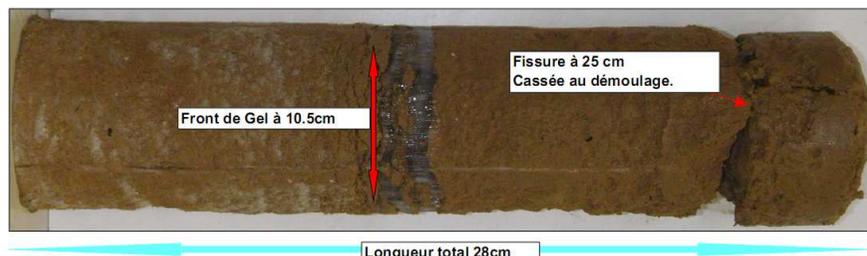
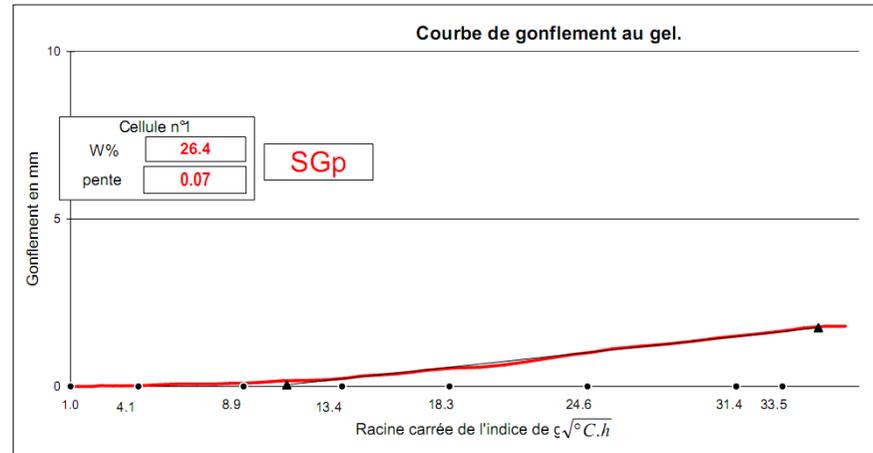
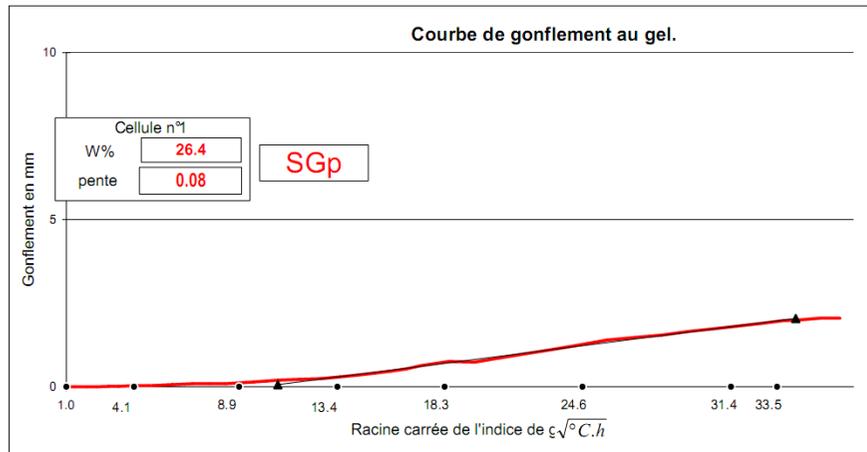
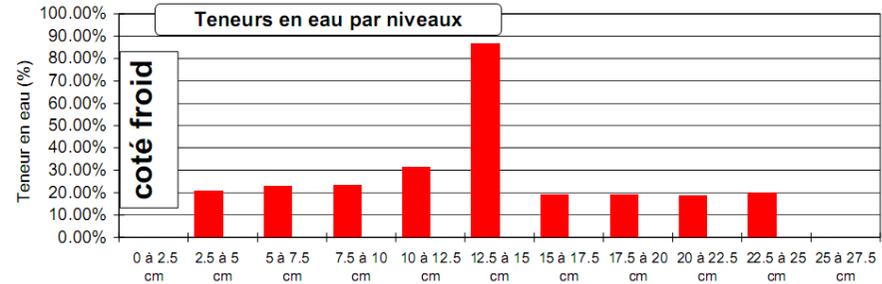


Essais de gélifonflement sur A1

A1 + 4%CaO, 28 jours, Échantillon 1



A1 + 4%CaO, 28 jours, Échantillon 2



Les pentes de gonflement sont évaluées à 0,07 – 0,08 et la position des fronts de gel = 10,5 – 11 cm

Conclusions/interpellations

- Critères de sensibilité: pente de gonflement et R_c/R_{tb} – question de pertinence

Vers des critères basés sur RFT ou autres pour le gélifraction et sur les propriétés thermique et hydraulique pour le géligonflement?

- Mécanismes de dégradation des sols traités sous l'effet des cycles gel/dégel?
- Mécanismes de gonflement lors du gel?
- * Nécessité d'utiliser des connaissances sur sols non saturés
- * Nécessité de suivre la microstructure lors du gel et surtout lors des cycles de gel/dégel