



Ils ouvrent la voie



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

**Thèse soutenue le 21 avril 2015 par
Thi-Thanh-Hang NGUYEN**

Directeur de thèse : Yu-Jun CUI (ENPC)
Co-encadrants : Anh-Minh TANG (ENPC)
Gontran HERRIER (Lhoist)



Encadrement et financement

- Format CIFRE

- Fédération :

FNTP / SPTF



- Entreprise :

Lhoist



Ils ouvrent la voie

- Université :

Paris-Est Ecole des Ponts ParisTech



- Laboratoires partenaires :

- ***Cerema (Clermont-Ferrand)***



- ***3SR (Université de Grenoble)***

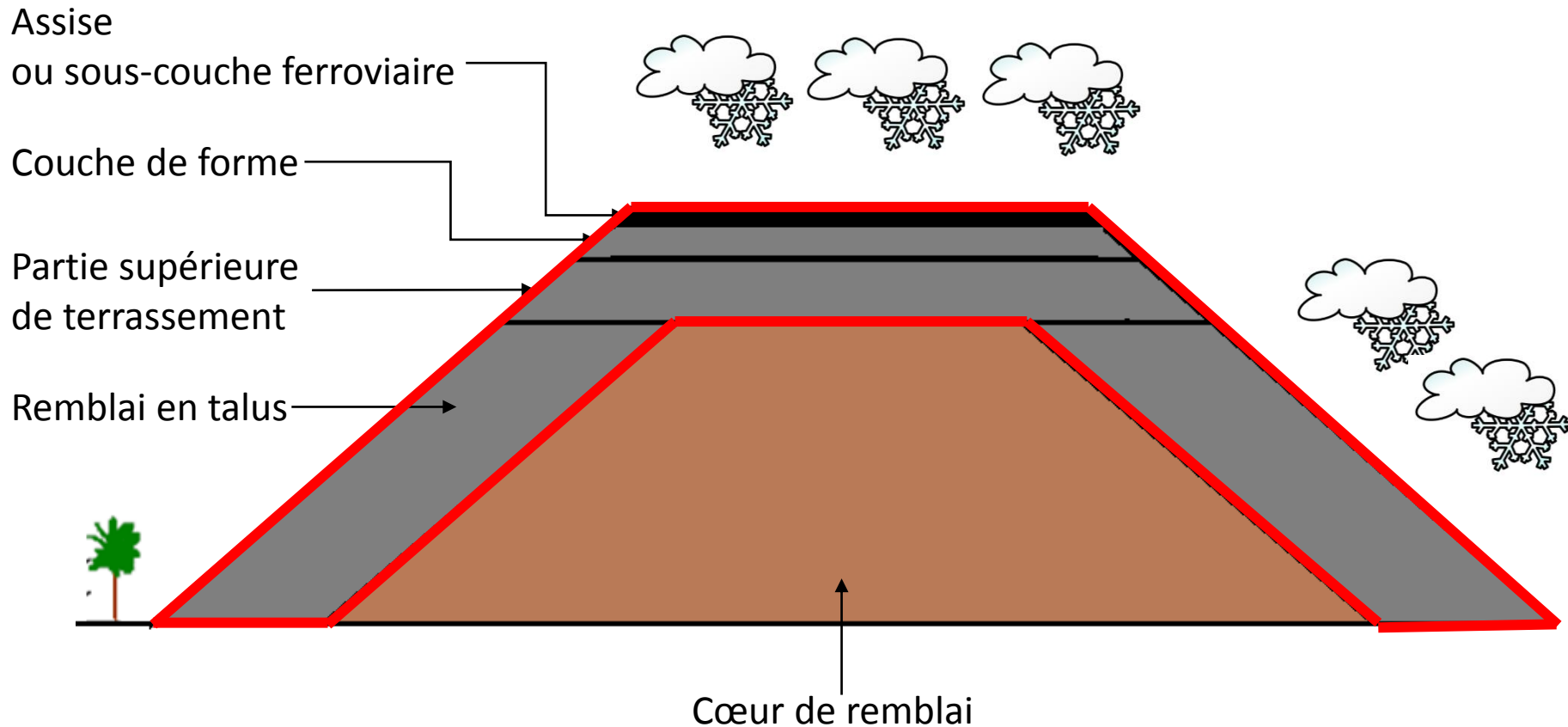


- 8 Réunions de Comité de Suivi Restreint
- 3 Réunions de Comité de Suivi Elargi

Plan

- 1 Introduction**
- 2 Matériaux et techniques expérimentales**
- 3 Caractérisations mécaniques et hydrauliques**
- 4 Gélifraction**
- 5 Gélignonflement**
- 6 Conclusions et perspectives**

Contexte – pratique actuelle du sol traité à la chaux pour la construction des remblais



Désordres dus au gel



1. Gélifraction due aux cycles de gel/dégel
2. Géligonflement dû à la formation des lentilles de glace

Pratique actuelle

- Méthodologie à disposition

- $R_c > 2,5 \text{ MPa} \rightarrow$ non gélif

- Nature des sols

Classification géotechnique du sol ou matériau non traité	Sensibilité pouvant être adoptée en l'absence d'essai de gonflement
matériaux dont le passant à 80μ est $< 3\%$ (comprend une partie des matériaux D)	SGn
matériaux A3, A4, B1	SGp
matériaux A1, A2, B2, B3, B5, B6, R1	SGt
autres matériaux	essai de gonflement au gel indispensable

- Essais de géligonflement

Classification des sol vis à vis de la sensibilité au gel		
pente p de l'essai de gonflement en $\text{mm}/(^{\circ}\text{C.h})^{1/2}$		
0.05	0.40	
SGn	SGp	SGt
sol non gélif	sol peu gélif	sol très gélif

- Guide régional Ile de France

Les matériaux traités uniquement à la chaux seront considérés comme peu gélifs (pente de 0,4).

Exemple démonstratif

Couche de surface (Enrobé bitumineux)	8 cm BB	8 cm BB
Couche d'assise (Enrobé bitumineux)	14 cm GB	14 cm GB
Couche de forme (matériau granulaire)	30 cm D	30 cm D
Partie Supérieure des Terrassements (Sol fin traité à 2 % chaux)	35 cm SolA SGp p = 0,4	35 cm SolA SGt p = 1
Sol support (Sol fin non traité)	SolA SGt p = 1	SolA SGt p = 1
Indice de gel admissible	118,2	79,3
Indice de gel de référence (Ex : Angers IRE)	100	100
Résultat	Structure non gélive	Structure gélive

Objectifs

- Simplifier l'évaluation de la sensibilité au gel pour les sols traités à la chaux
- Mieux comprendre les mécanismes de la gélifraction et du géligonflement dans les sols traités à la chaux.
- Evaluer les propriétés mécaniques et hydrauliques des sols traités à la chaux face au gel.

Démarche

1. Choix des matériaux:

- i) 3 sols limono-argileux
- ii) 3 dosages (remblai, PST, CdF)



2. Caractérisations mécaniques et hydrauliques à long terme:

4 échéances: 7 jrs, 28 jrs, 90 jrs, 365 jrs



3. Etudes des mécanismes:

- i) Gélifraction
- ii) Géligonflement



4. Proposition de critères:

- i) Gélivité
- ii) Sensibilité au gel

Plan

1 Introduction

2 Matériaux et techniques expérimentales

3 Caractérisations mécaniques et hydrauliques

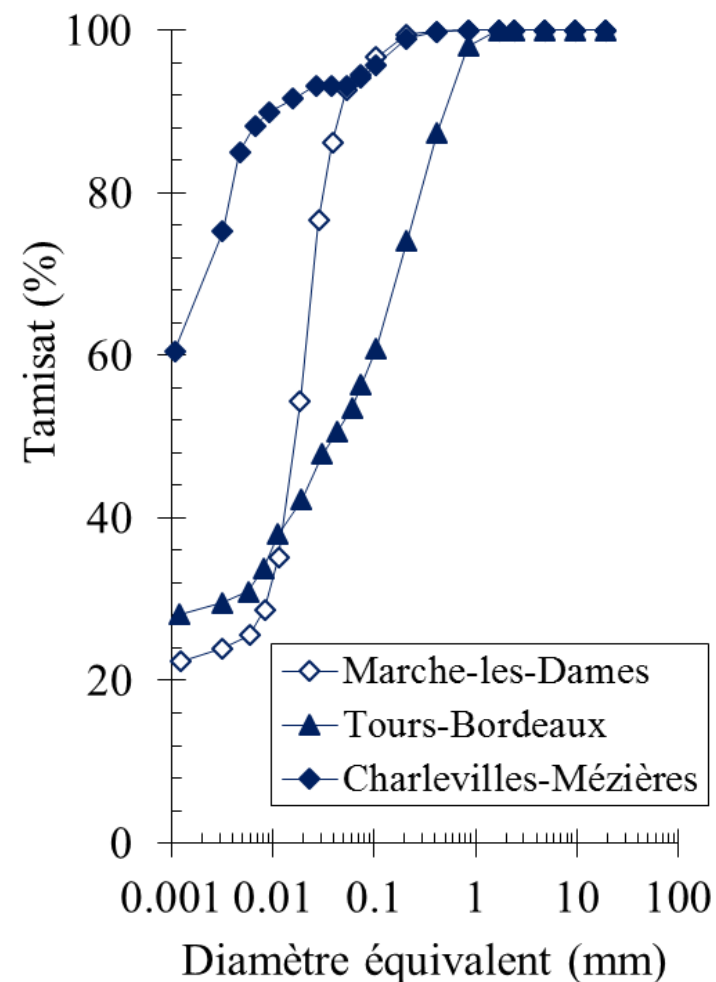
4 Gélifraction

5 Géligonflement

6 Conclusions et perspectives

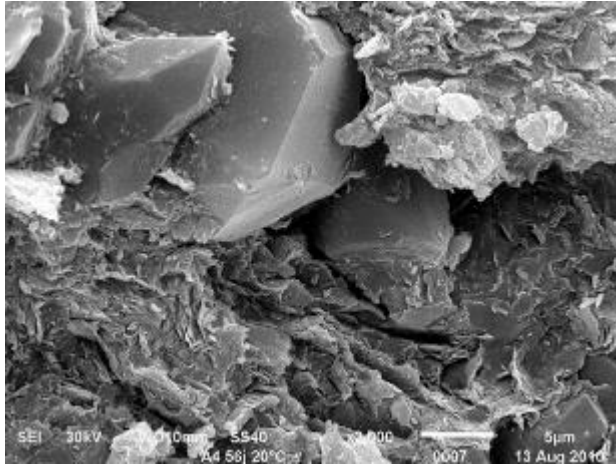
Sols étudiés

Sol	Marche-les-Dames (Belgique)	Tours-Bordeaux (France)	Charlevilles-Mézières (France)
VBS (g/100 g)	2,4	3,4	7,4
w_p (%)	23,2	17	45,8
w_L (%)	30,1	42	79,5
I_p	7	25	34
Fraction < 0,002 mm (%)	24	28	70
Minéralogie	illite kaolinite chlorite quartz feldspath	illite kaolinite chlorite montmorillonite quartz	illite kaolinite montmorillonite quartz chlorite
Classification NF P11-300	A1 limon peu plastique	A2 argile limoneuse	A3 argile très plastique
Dosage en chaux	1% CaO 2% CaO 4% CaO	1,5% CaO 3% CaO 5% CaO	2% CaO 4% CaO 7% CaO

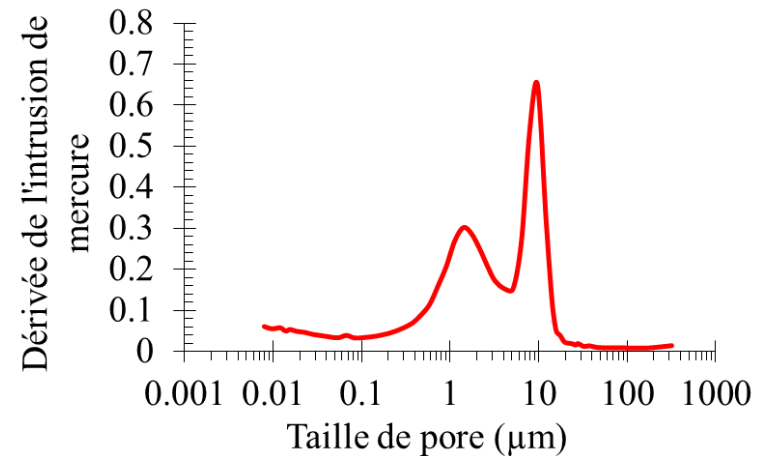


Techniques expérimentales

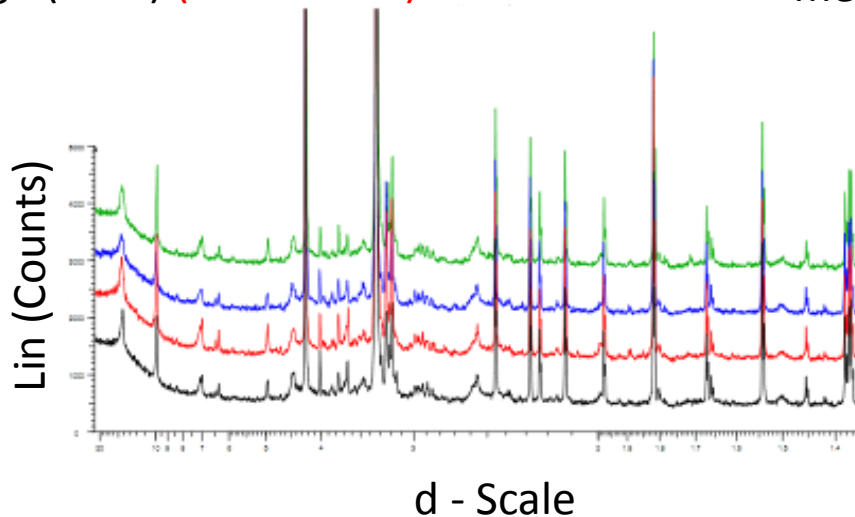
1. Etudes de minéralogie et de microstructure



Microscopie électronique à balayage (MEB) (Lhoist R&D)



Porosimétrie à intrusion de mercure (PIM) (Lhoist R&D)



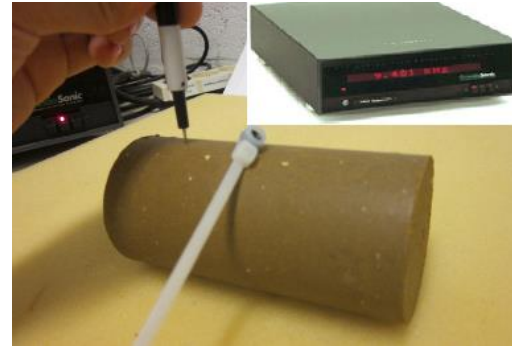
Diffraction aux rayons X
(Lhoist R&D)

Techniques expérimentales

2. Essais mécaniques



R_c (Lhoist R&D)



(E_o, G_{max}) par l'excitation par impulsion -
Grindosonic (Lhoist R&D)



R_{tb}, E_{tb} (Lhoist R&D)



G_{max} par capteurs piézoélectriques (ENPC)

Techniques expérimentales

3. Essais de gel

- Gélifraction



Dispositif de gélifraction
prCEN/TS 13286-54 (Lhoist R&D)

- Géligonflement



Dispositif de
géligonflement
NF P 98-234-2 (CEREMA
Centre-Est)



k_{sat}
(Lhoist R&D)



k_{unsat}
(ENPC)

Détermination des
conductivités hydrauliques



μ Tomographie au rayon X
(3SR, Grenoble)



Papier filtre
(ENPC)



Potentiomètre
WP4 (ENPC)

Détermination de la
courbe de rétention
d'eau

Plan

1 Introduction

2 Matériaux et techniques expérimentales

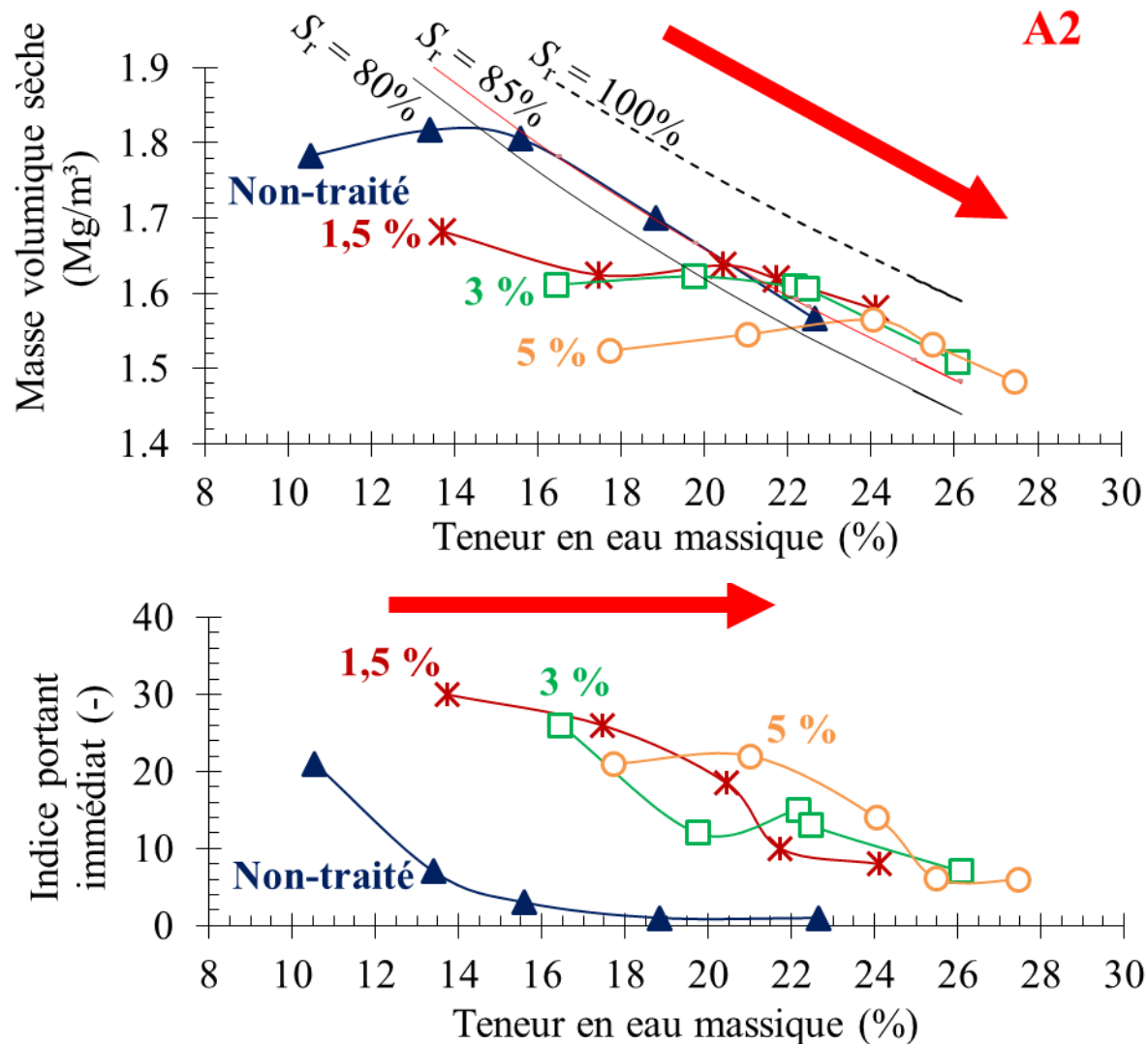
3 Caractérisations mécaniques et hydrauliques

4 Gélifraction

5 Gélignonflement

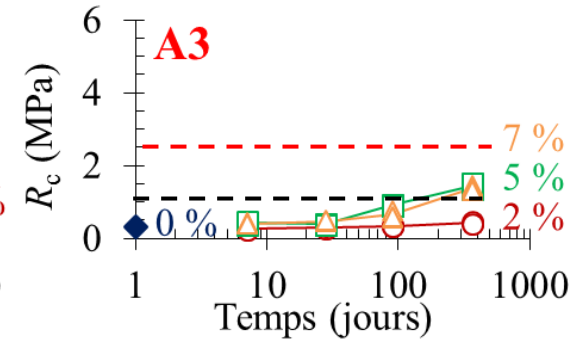
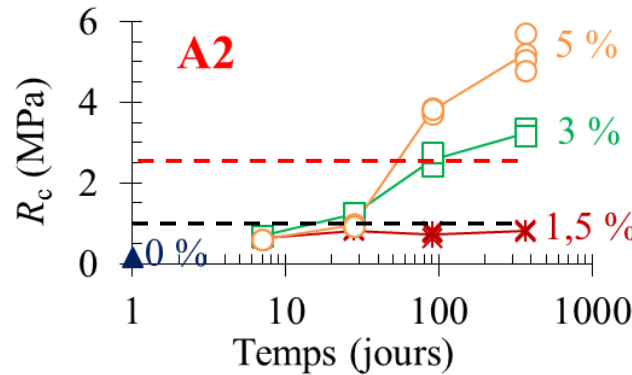
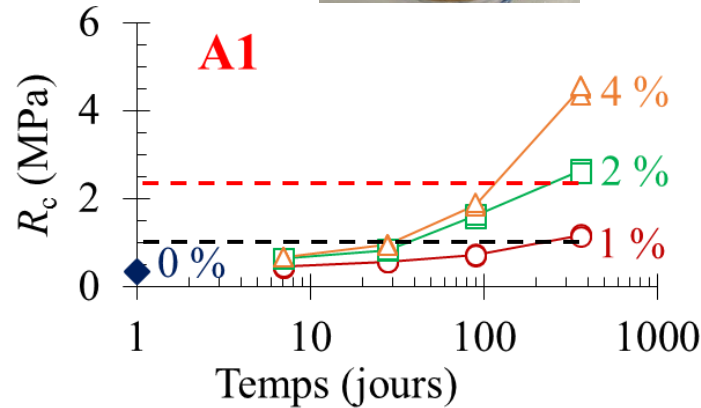
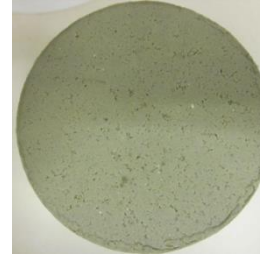
6 Conclusions et perspectives

Propriétés de compactage et de portance immédiate



Caractérisations mécaniques

• R_c



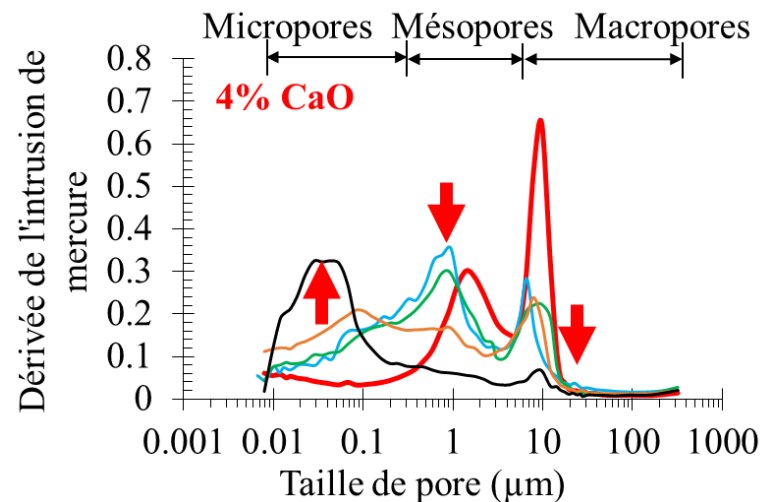
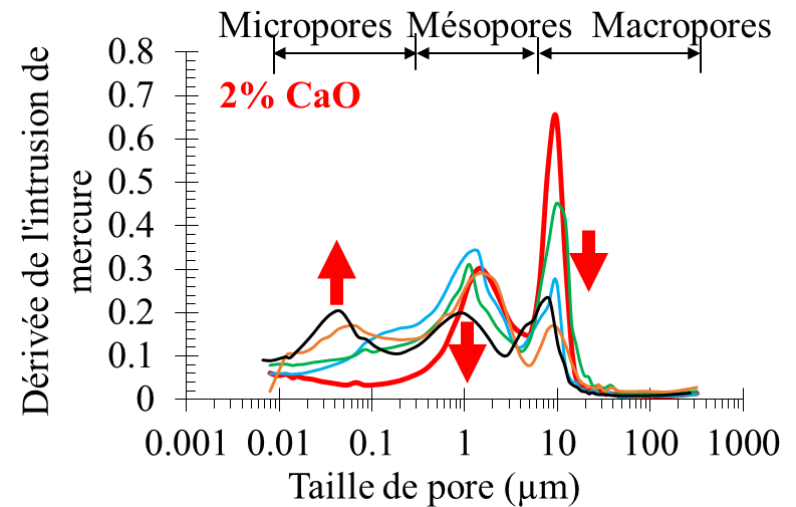
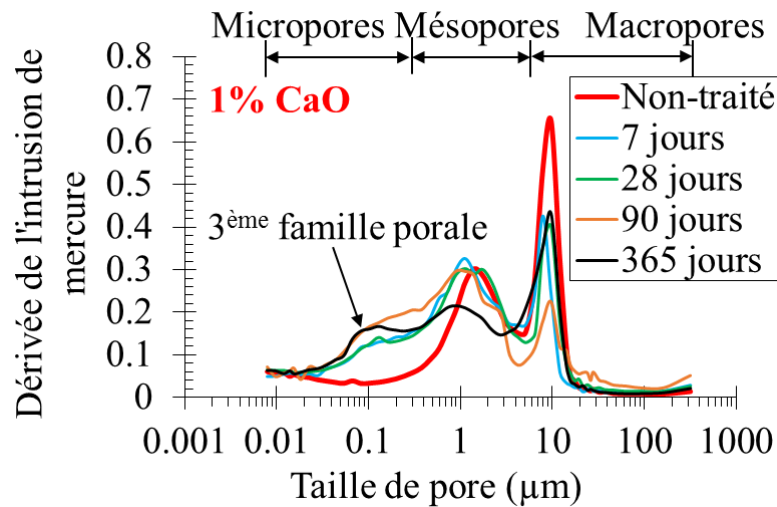
-- Critère de circulation sur CdF (GTS)
 --- Critère de gel (GTS)

Sols	Critère de circulation sur CdF (GTS), $R_c \geq 1$ MPa	Critère de gel (GTS), $R_c \geq 2,5$ MPa
A1	28 jours	365 jours
A2	28 jours	90 jours
A3	365 jours	> 365 jours

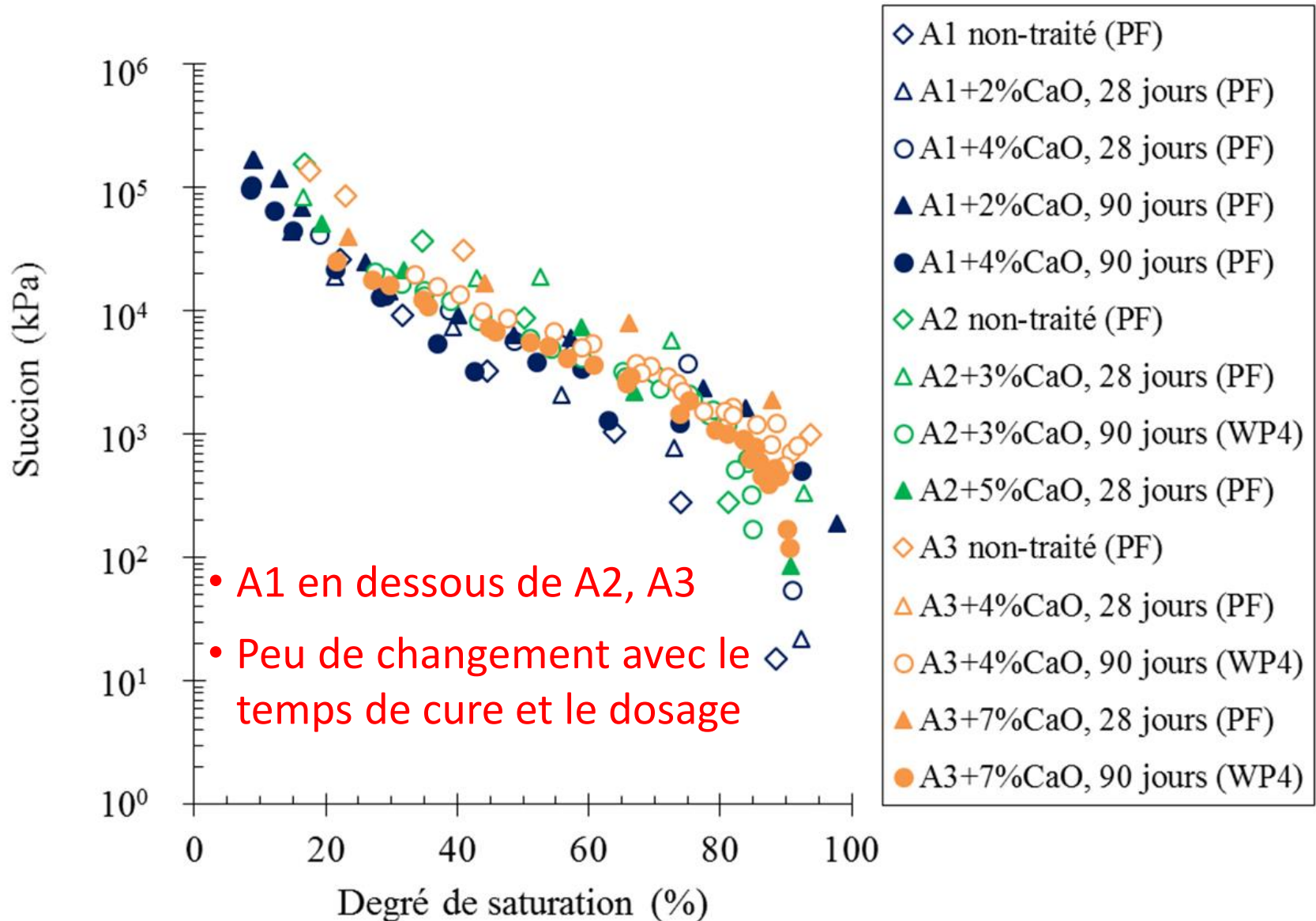
Même tendance
 d'évolution pour
 R_{tb} , E_{tb} , E_0 , G_{max}

Caractérisations microstructurales

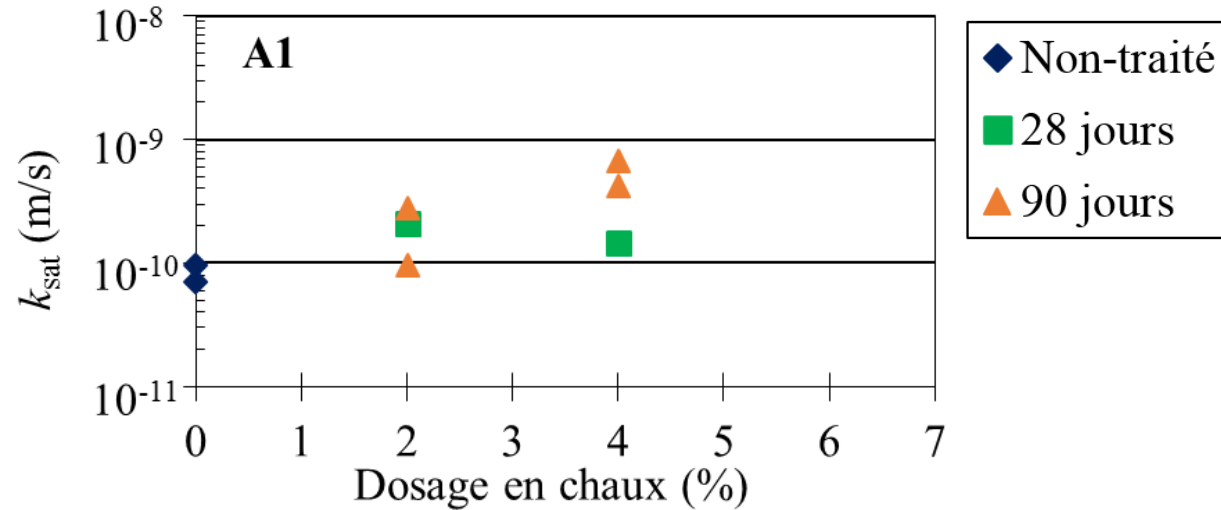
- A1



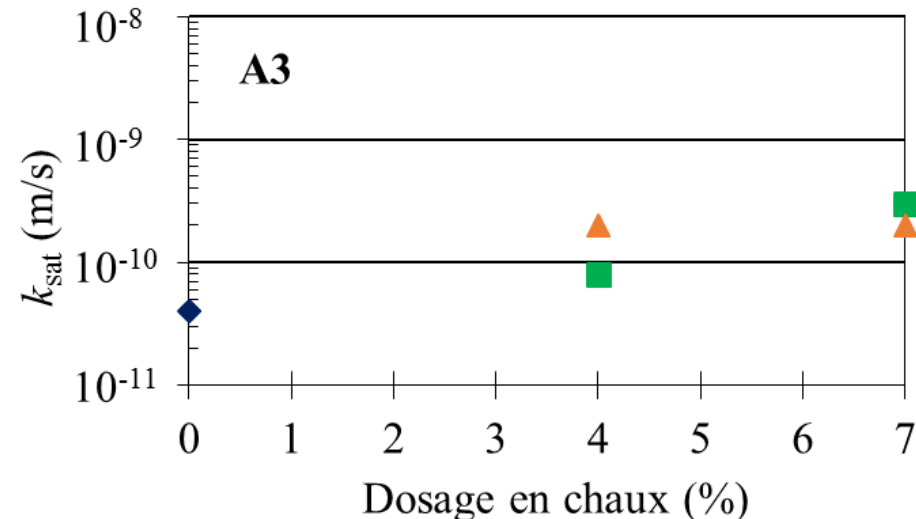
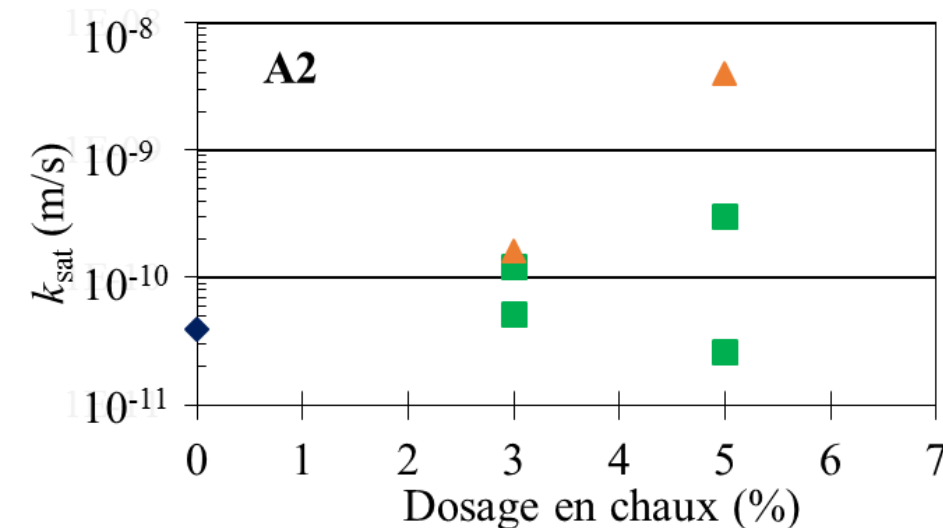
Comparaison des courbes de rétention d'eau



Caractérisations hydrauliques : conductivité hydraulique à l'état saturé



**Légère augmentation
due à la floculation
générant la structure
plus granulaire**



Plan

1 Introduction

2 Matériaux et techniques expérimentales

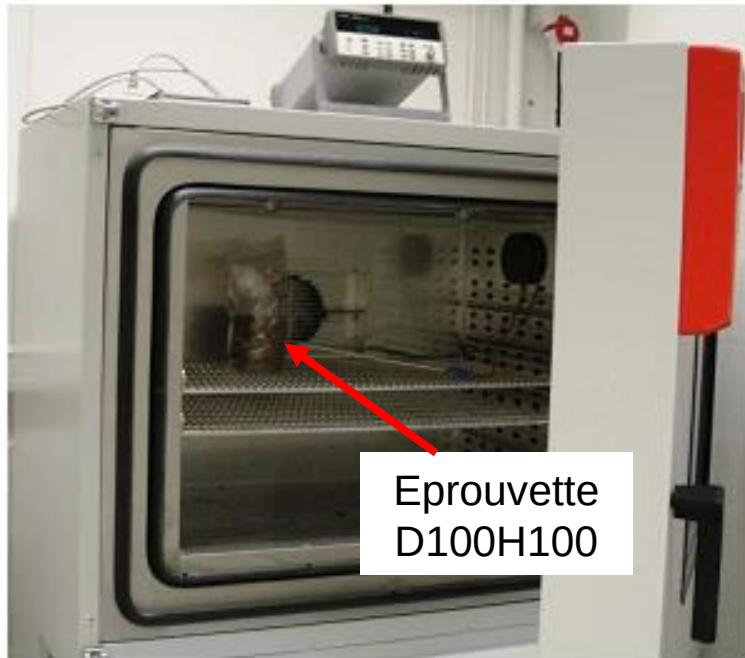
3 Caractérisations mécaniques et hydrauliques

4 Gélifraction

5 Géligonflement

6 Conclusions et perspectives

Essai de gélifraction



10 cycles de gel/dégel

$T_{\max} = 20^{\circ}\text{C}$

$T_{\min} = -20^{\circ}\text{C}$

24 h /1 cycle

$$RFT (\%) = \frac{R_{c,10}}{R_{c,ref,10}} \times 100$$

- $RFT (\%)$: Coefficient de résistance face aux 10 cycles de gel/dégel
- $R_{c,10}$: Résistance à la compression simple de l'éprouvette ayant subi 10 cycles de gel/dégel
- $R_{c,ref,10}$: Résistance à la compression simple l'éprouvette de référence qui ne subit pas de cycle

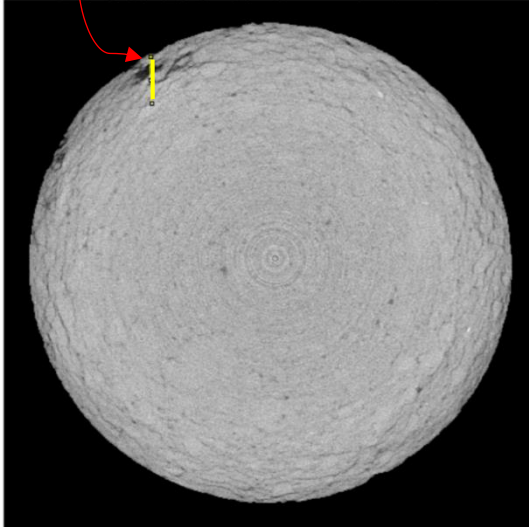
Gélinivité du sol A1 traité

Dosage	7 jours	28 jours	90 jours	365 jours
1%	 RFT = 0%	 RFT = 0%	 RFT = 0%	 RFT = 0%
2%	 RFT = 0%	 RFT = 17%	 RFT = 62%	 RFT = 67%
4%	 RFT = 30%	 RFT = 30%	 RFT = 68%	 RFT = 90%

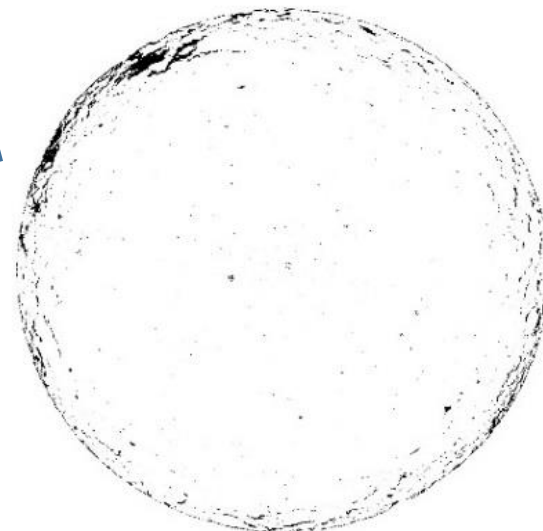
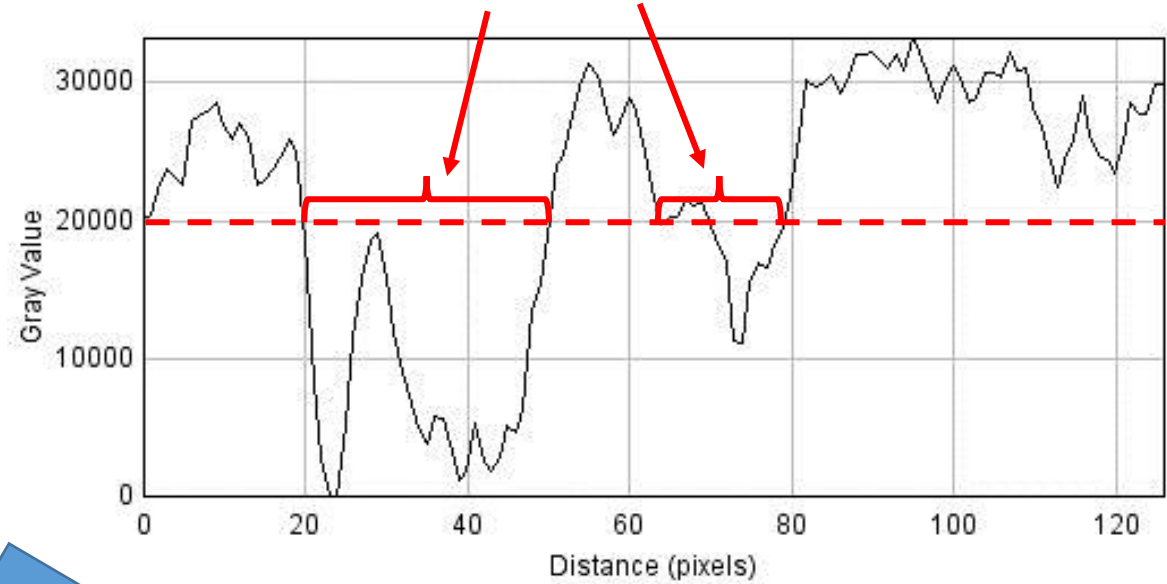
Traitement d'image de μ Tomo X

Zone examinée

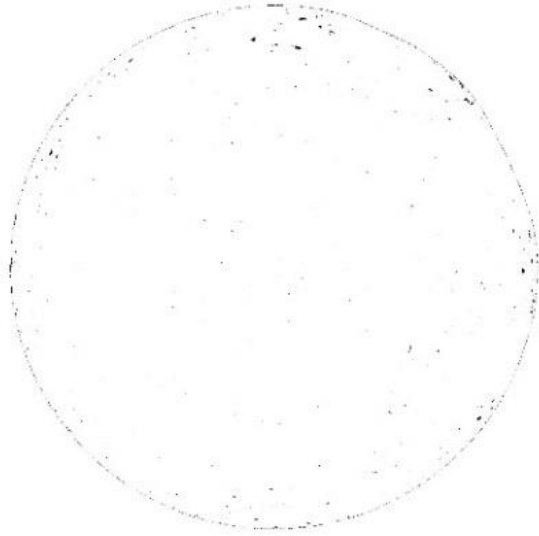
473/780 (A1_2%_28)_11cyc_02_1425_0700). 1425x1425 pixels, 16-bit, 3GB



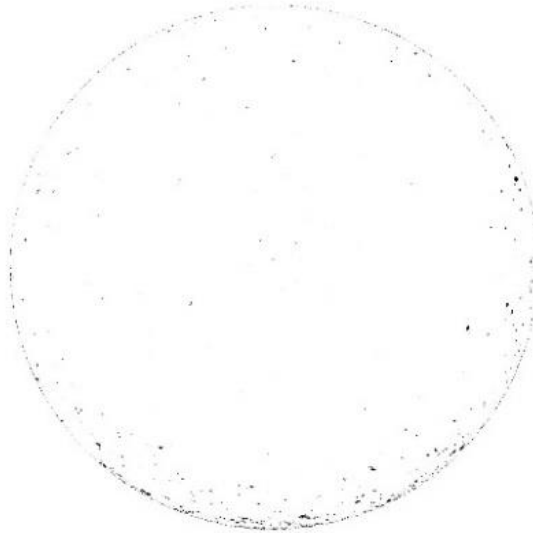
Zone d'endommagement,
niveau de gris = 20000



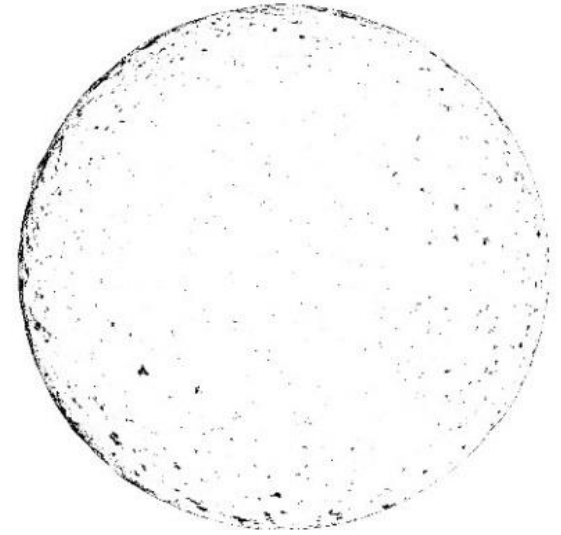
Identification des fissures



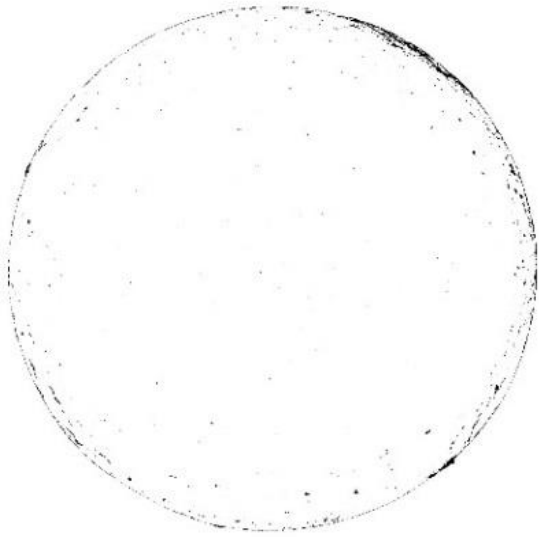
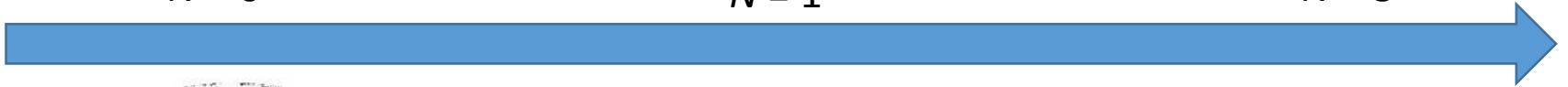
$N = 0$



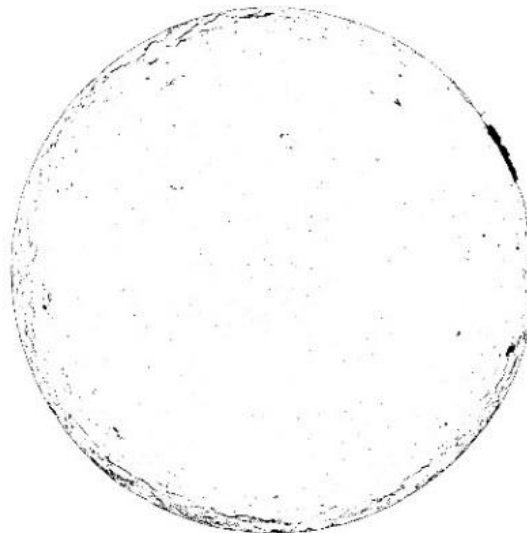
$N = 1$



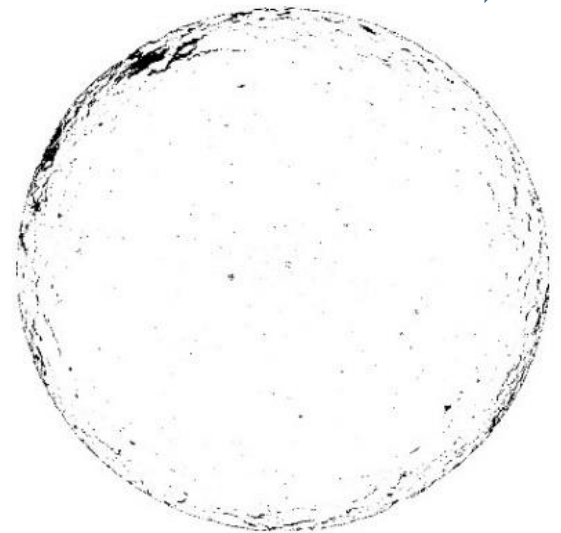
$N = 3$



$N = 5$

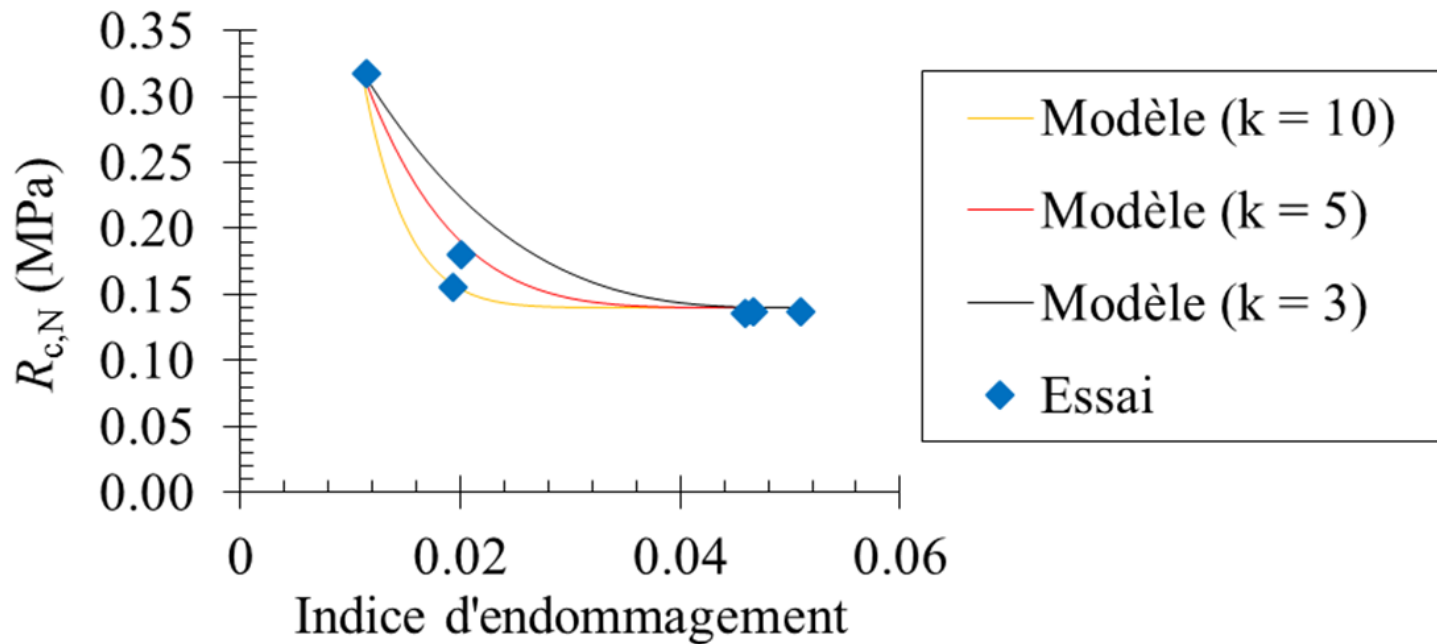


$N = 8$



$N = 10$

Modélisation de l'endommagement



k , Indice de régression

$$R_{c,N} = \underbrace{R_{c,10}}_{N=10} + \underbrace{(R_{c,0} - R_{c,10})}_{N=0} \times \left[1 - \frac{\underbrace{\left(\frac{e_f}{e_0}\right)_N}_{N=10} - \underbrace{\left(\frac{e_f}{e_0}\right)_0}_{N=0}}{\underbrace{\left(\frac{e_f}{e_0}\right)_{10}}_{N=10} - \underbrace{\left(\frac{e_f}{e_0}\right)_0}_{N=0}} \right]^k$$

Plan

1 Introduction

2 Matériaux et techniques expérimentales

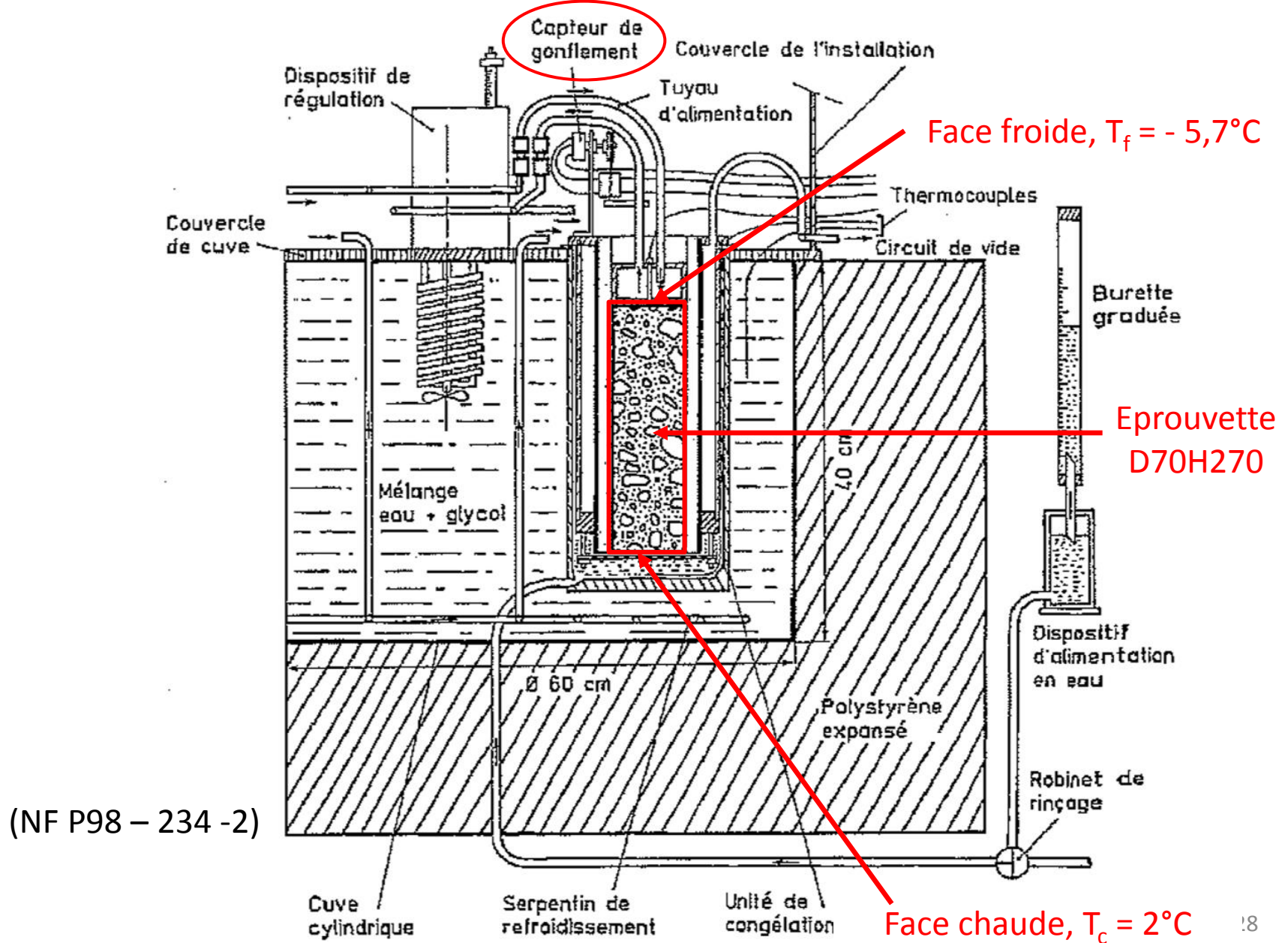
3 Caractérisations mécaniques et hydrauliques

4 Gélifraction

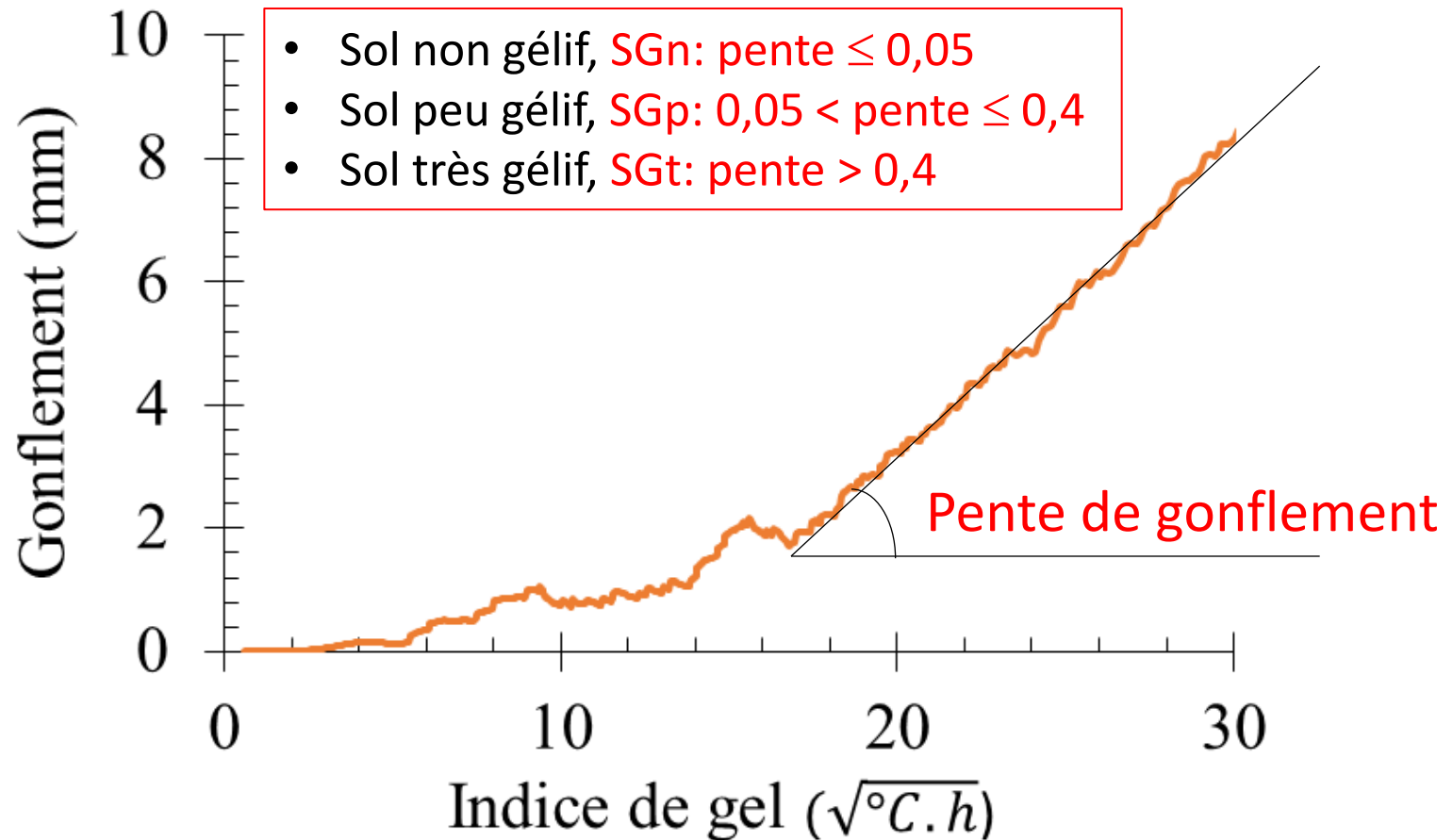
5 Géligonflement

6 Conclusions et perspectives

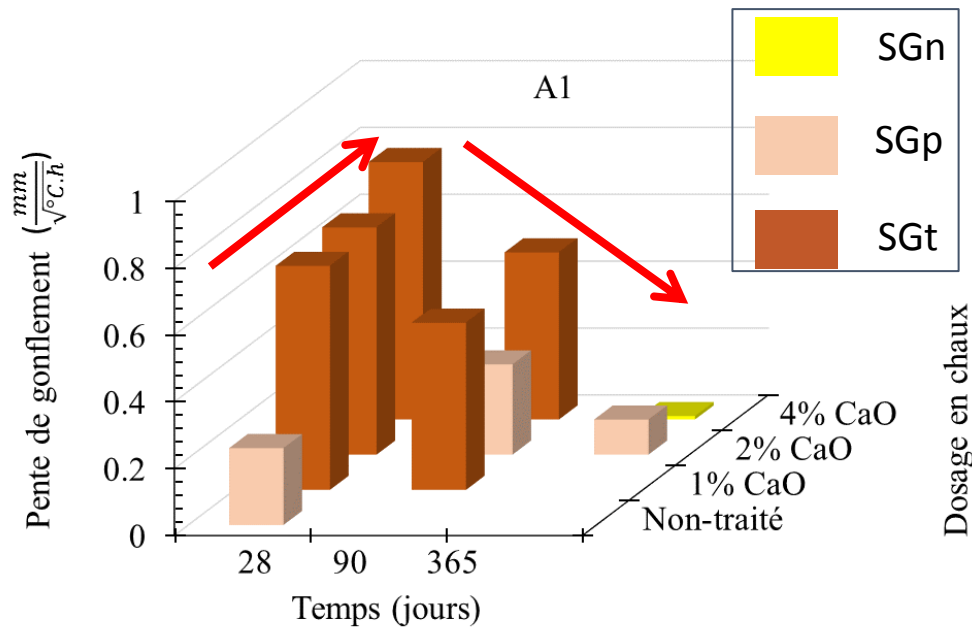
Essai de géligonflement



Détermination de la pente de gonflement au gel

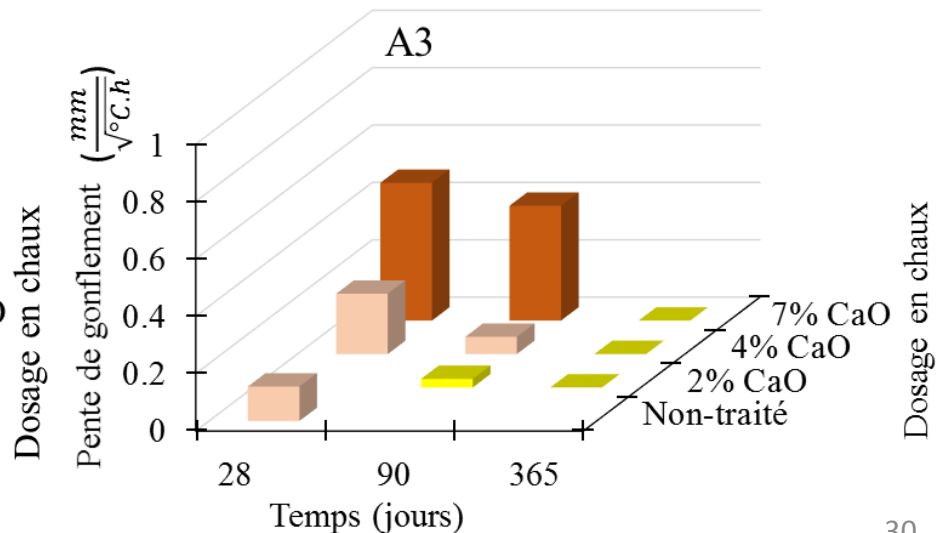
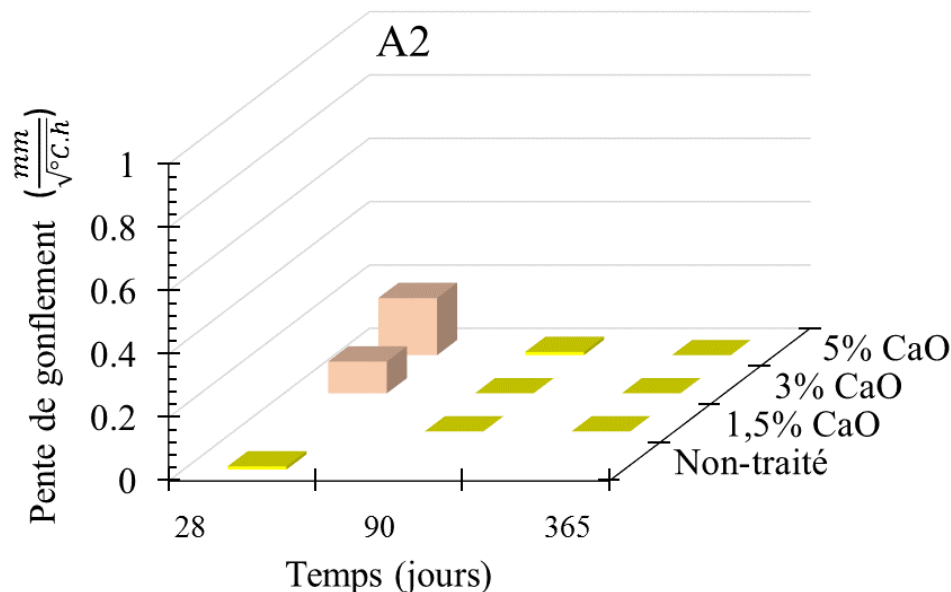


Sensibilité au gel des sols A1, A2, A3 traités

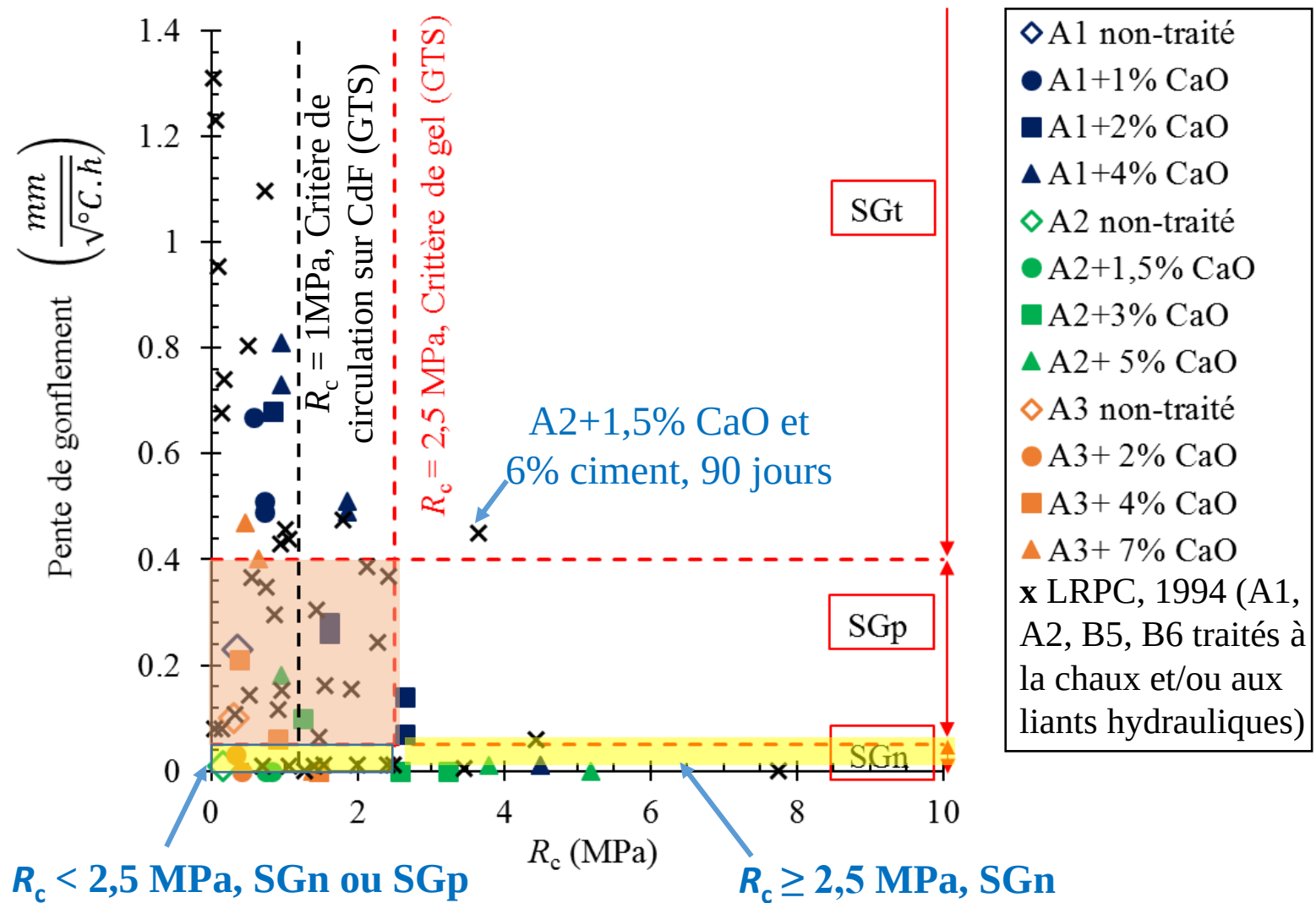


❖ Augmentation à court terme de la sensibilité au gel du sol traité par rapport au sol non-traité

❖ Diminution de la sensibilité au gel du sol traité avec le temps de cure



Evaluation du critère de sensibilité au gel par R_c



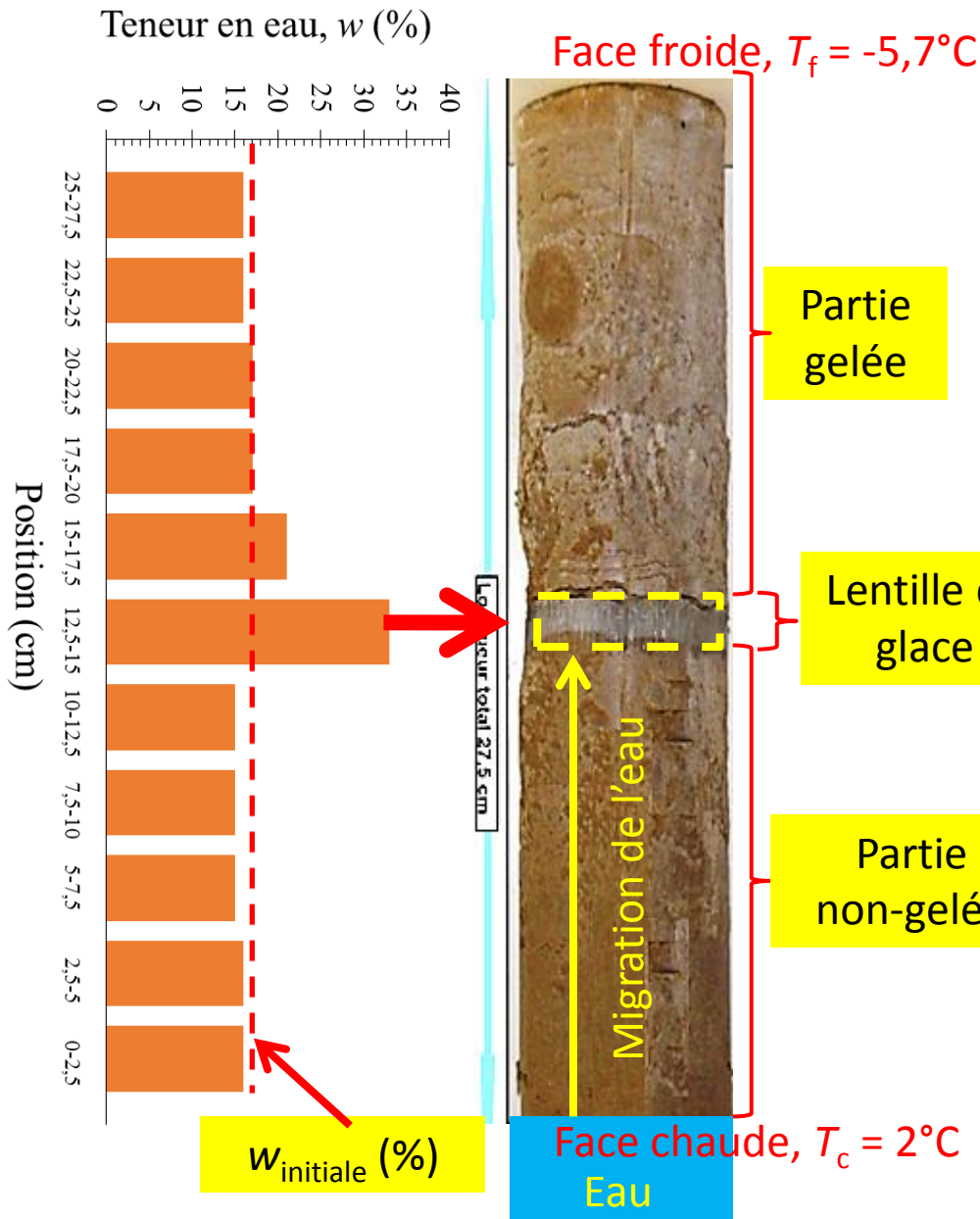
- $R_c \geq 2,5 \text{ MPa}$, SGn
- $1 \text{ MPa} \leq R_c < 2,5 \text{ MPa}$, SGn ou SGp

Exemple sol fin A1 traité à la chaux

Tableau VI. 2: Sensibilité au gel du sol A1 non-traité et traité

Dosage en chaux (%)	Temps (jour)	Eprouvette	Pente de gonflement ($mm/\sqrt{^{\circ}C.h}$)	Sensibilité au gel	Position de front de gel, z_p (cm)	Lentilles de glace visuelles
0	1	1	0,23	SGp	11,0	Oui
		2	0,23	SGp	11,0	Oui
1	28	1	Problème technique	Problème technique		
		2	0,67	SGt	13,0	Oui
	90	1	0,49	SGt	14,0	Oui
		2	0,51	SGt	14,0	Oui
2	28	1	0,68	SGt	14,5	Oui
		2	Problème technique	Problème technique		
	90	1	0,28	SGp	18,5	Oui
		2	0,26	SGp	18,0	Oui
	365	1	0,14	SGp	17,0	Oui
		2	0,07	SGp	16,5	Non
4	28	1	0,81	SGt	15,0	Oui
		2	0,73	SGt	15,0	Oui
	90	1	0,49	SGt	16,5	Oui
		2	0,51	SGt	16,5	Oui
	365	1	0,01	SGn	19,0	Non
		2	0,01	SGn	19,0	Non

Mécanisme de gélifonflement



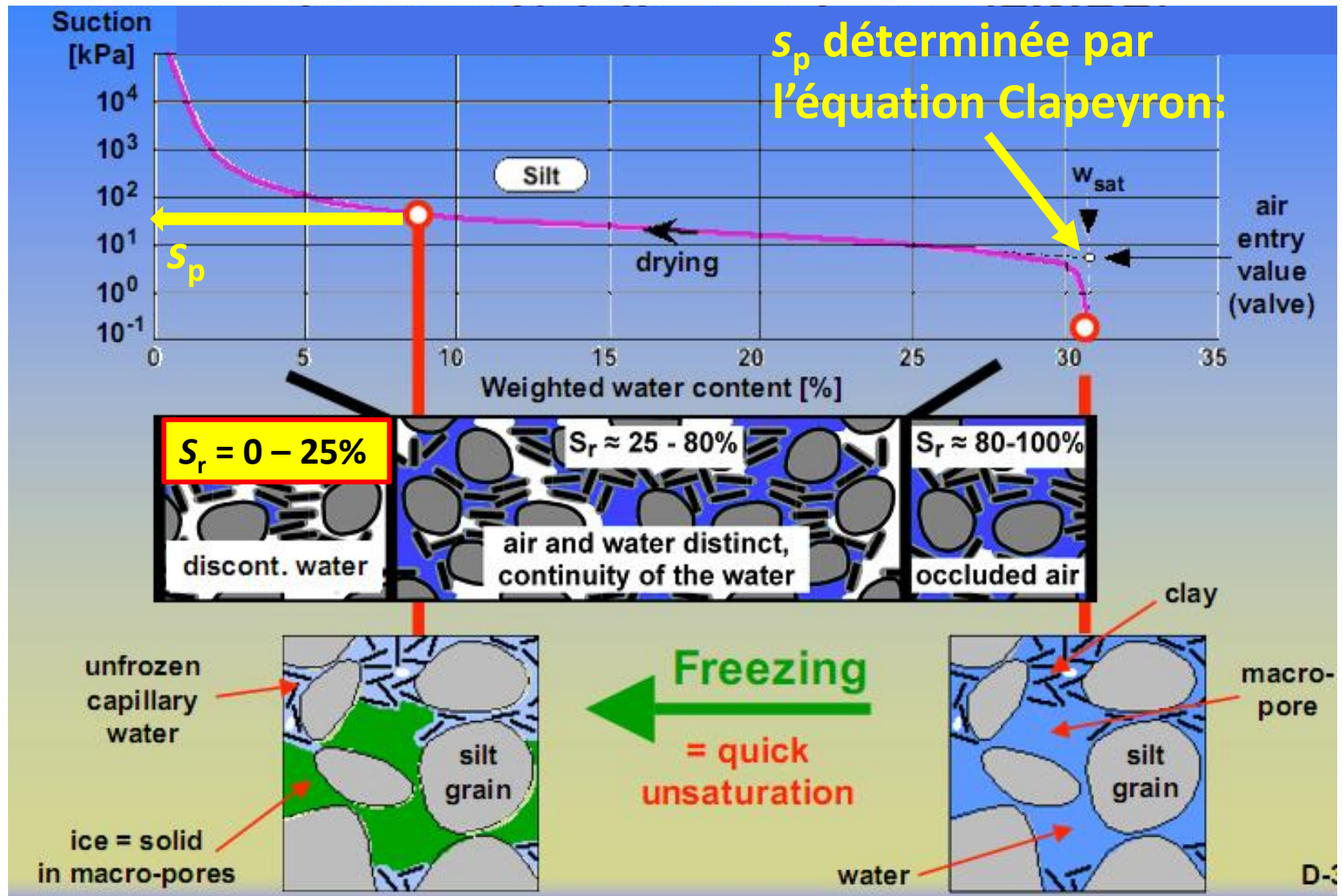
Cryosuccion

Détermination de la succion au front de gel, s_p à partir de l'équation Clapeyron:

$$s_p = \frac{\rho_w L_f}{T_p} \times (T_p - T_s)$$

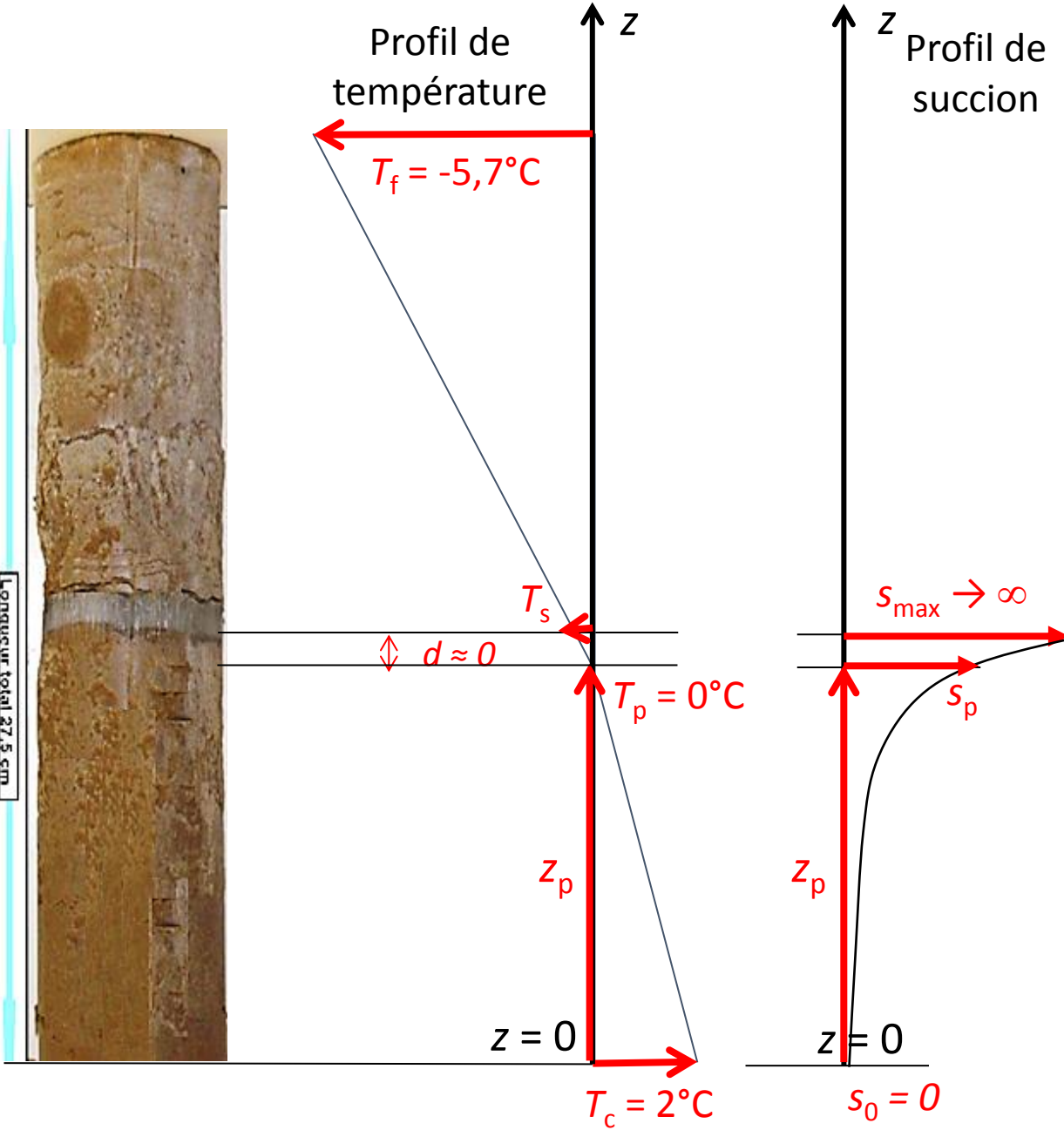
- T_p (K): température au front de gel, $T_p = 273$ K,
- T_s (K): température de ségrégation, $T_s < T_p$.

Mécanisme de gélifonflement



(Dysli 1991)

Calcul du géligonflement



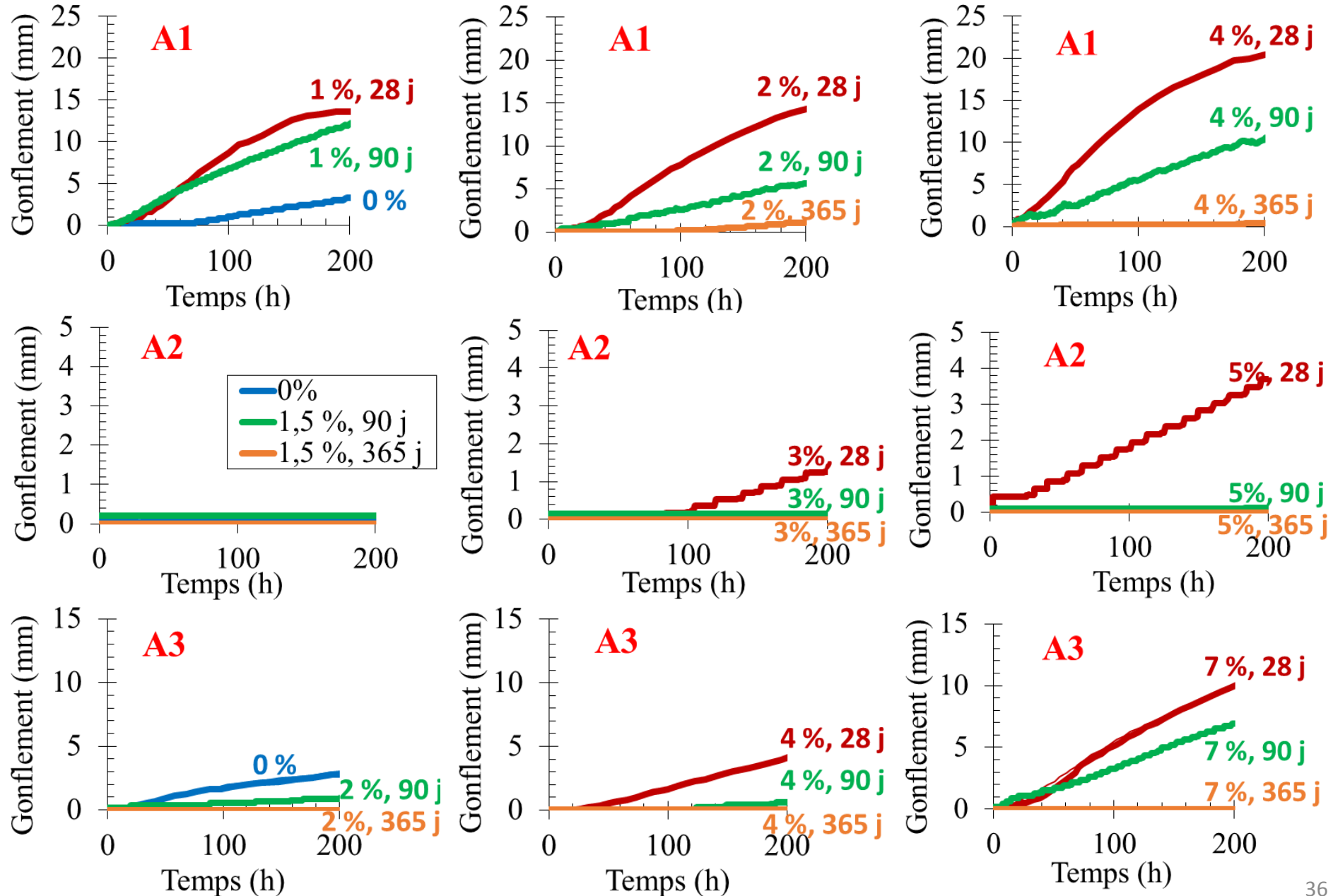
1. Détermination de la vitesse de l'eau à l'état permanent par la loi de Darcy :

$$v = -\frac{1}{z_p} \times \int_0^{s_p} k_{\text{unsat}}(s) ds$$

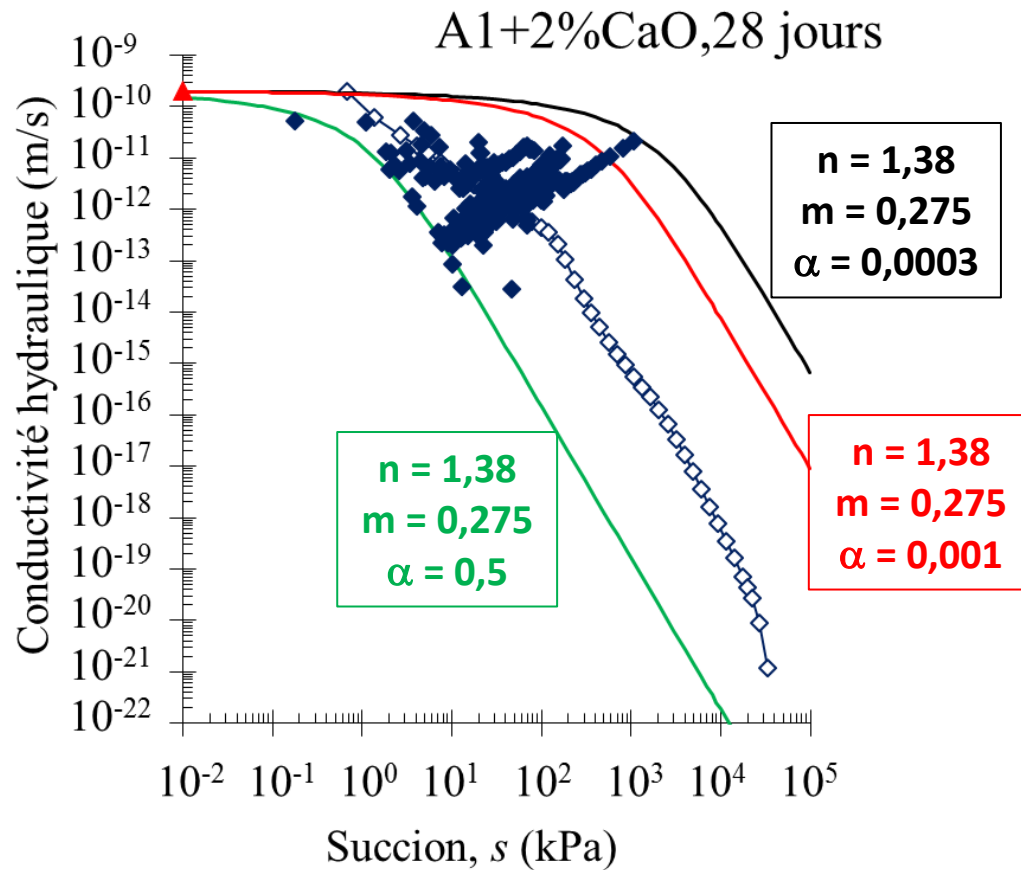
2. Calcul du gonflement au gel :

$$h(t) = v \times t \times \frac{V_i}{V_w}$$

Gonflement en fonction du temps

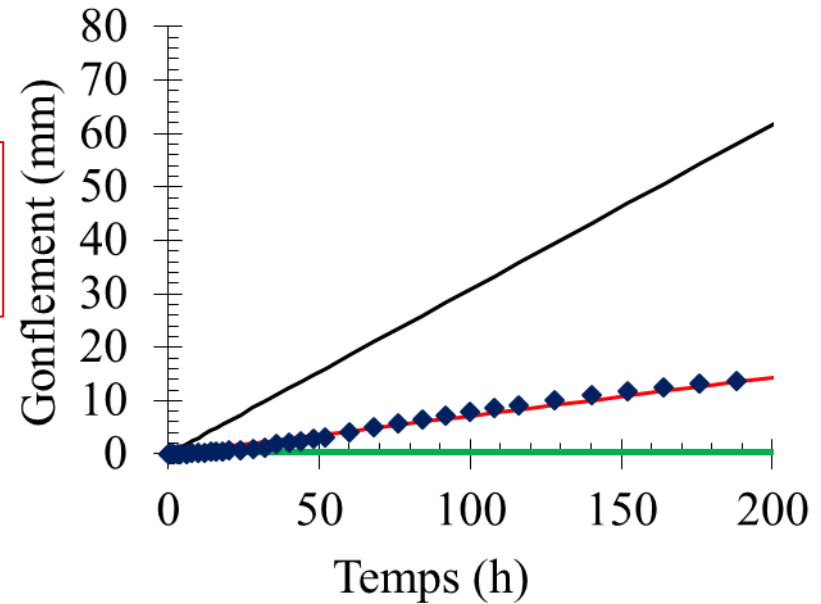


Calcul du gonflement

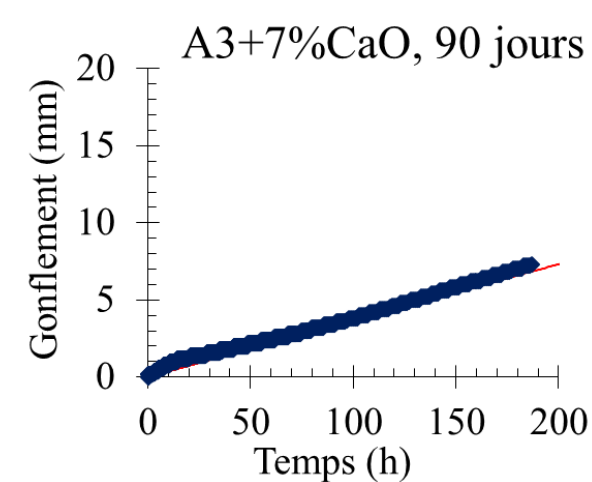
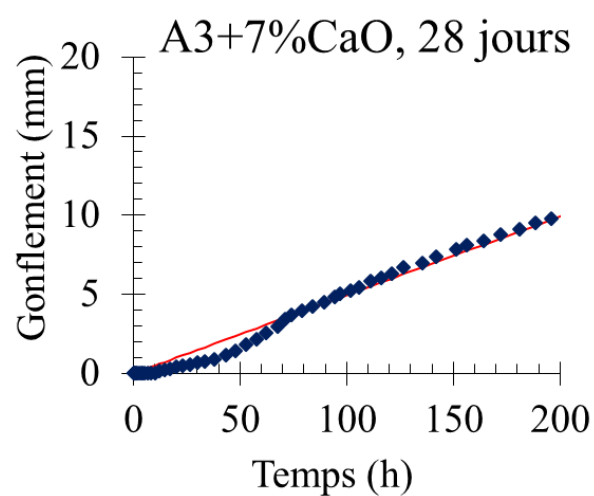
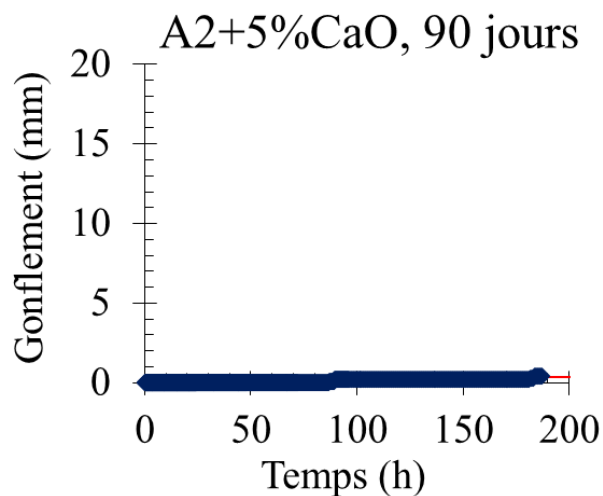
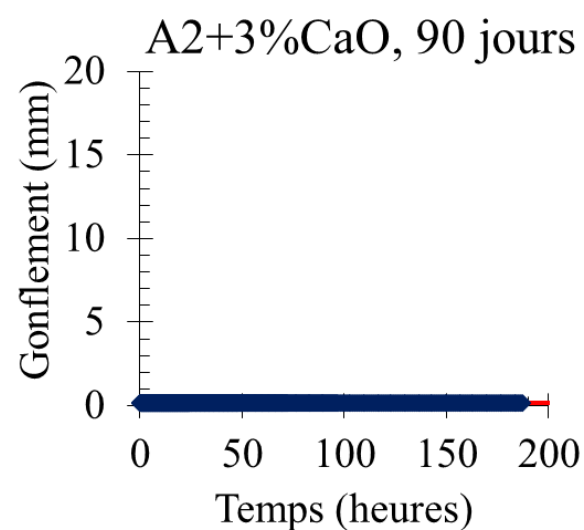
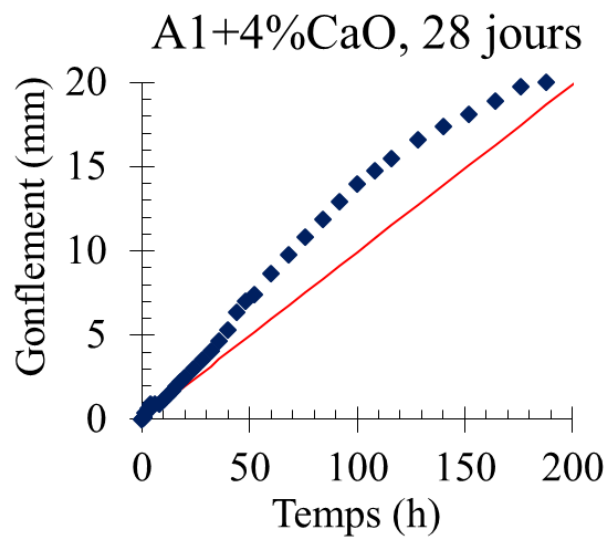
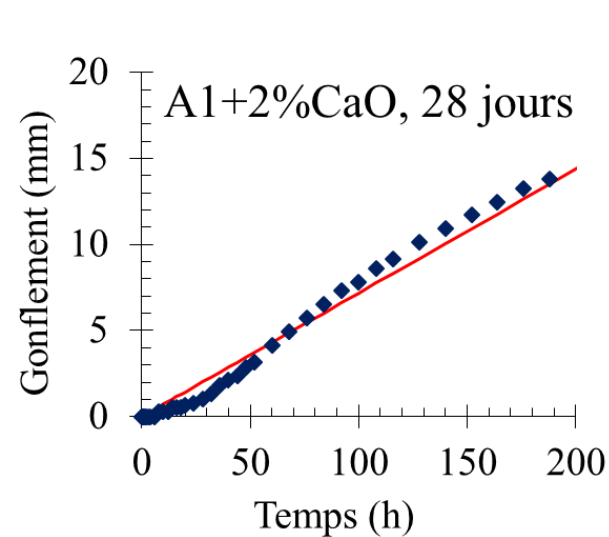


van-Genuchten (1978)

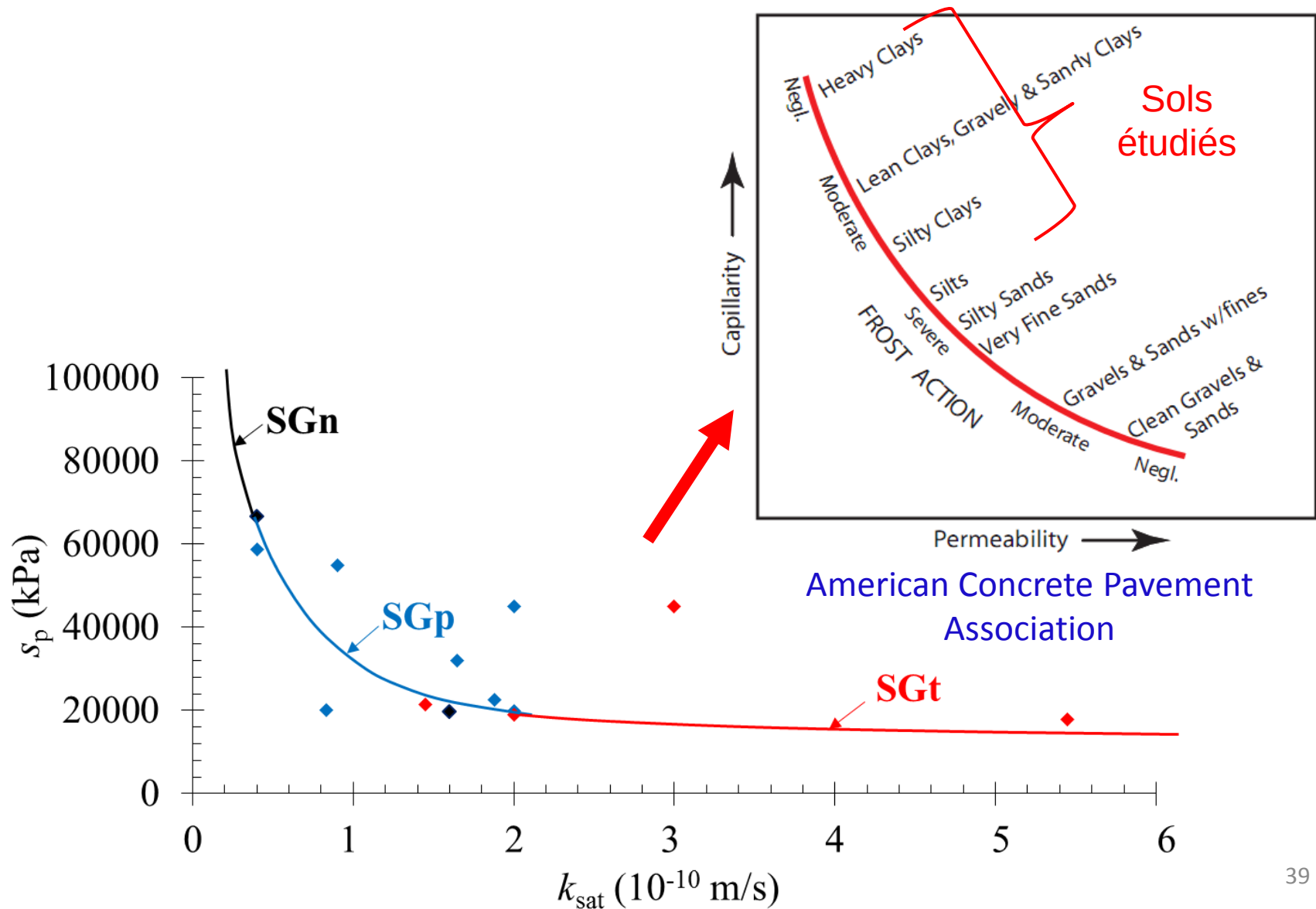
$$k_{unsat} = k_{sat} \times \frac{\{1 - (as)^{n-1} [1 + (as)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (as)^n]^{\frac{m}{2}}}$$



Calcul du gonflement



Interprétation des critères hydrauliques pour évaluer la sensibilité au gel



Plan

1 Introduction

2 Matériaux et techniques expérimentales

3 Caractérisations mécaniques et hydrauliques

4 Gélifraction

5 Géligonflement

6 Conclusions et perspectives

Conclusions

1. Performances mécaniques et hydrauliques

- Le traitement à la chaux change la microstructure des sols traités via les réactions pouzzolaniques, conduisant à des évolutions des performances mécaniques et hydrauliques.
- Le mode préparatoire joue un rôle important sur l'efficacité du traitement, et doit être adapté dans le cas des sols très plastiques.

2. Gélifraction

- Perte relative des performances mécaniques avec le nombre de cycles de gel/dégel.
- Lien entre la dégradation mécanique et les fissures d'endommagement.
- $RFT > 60 \%$, pas de fissures visuelles.

3. Gélignonflement

- Simplification du critère de gélivité pour les sols traités à la chaux (Note CEREMA + Norme de dimensionnement NF P98 -086) : $R_c \geq 2,5 \text{ MPa} \rightarrow \text{SGn}$ et $\text{CBR/IPI} > 1 + \text{dosage} > 1,5 \%$ $\rightarrow \text{SGp}$ ($p = 0,4$).
- Importance des propriétés hydrauliques (s_p , k_{unsat}) dans le processus du gélignonflement.
- Proposition d'un critère (s_p , k_{sat}) pour évaluer la sensibilité au gel.

Perspectives

1. Enrichir le critère basé sur le couple (s_p , k_{sat}) avec plus de sols et plus d'essais.
2. Raffiner la modélisation en considérant la création des lentilles de glace secondaires.
3. Intégrer des travaux sur la gélifraction dans le GT Français gel/dégel de la Commission Assises, chargés d'évaluer la méthodologie du document pr CEN/TS 13286-54.
4. Relier le phénomène de gélifraction et le phénomène de géligonflement via l'indice d'endommagement.
5. Elargir les essais à l'échelle de modèle physique et à l'échelle in-situ.



Cảm ơn