

Amélioration et renforcement des sols

« Comportement thermo-hydro-mécanique et durabilité des bétons de sol :
influence des paramètres de formulation et conditions d'exposition »

Thèse soutenue le 5 mai 2017

Olivier Helson, Université de Cergy Pontoise (UCP)



FONDATION
UNIVERSITÉ DE CERGY-PONTOISE



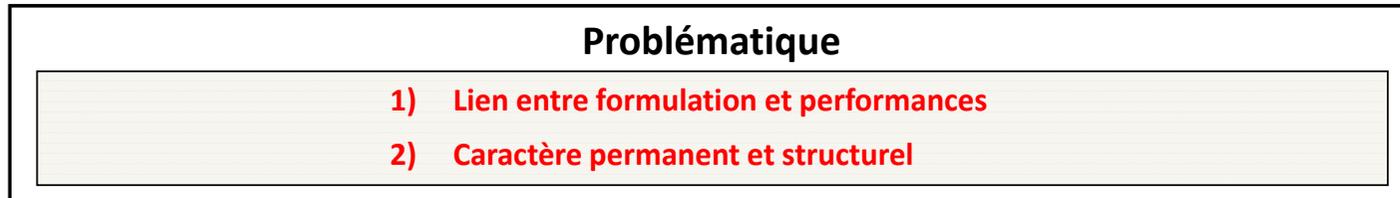
26 AVRIL 2018



Contenu

- Introduction
- Formulation et caractérisation physique
- Caractérisation mécanique
- Étude de durabilité
- Conclusions

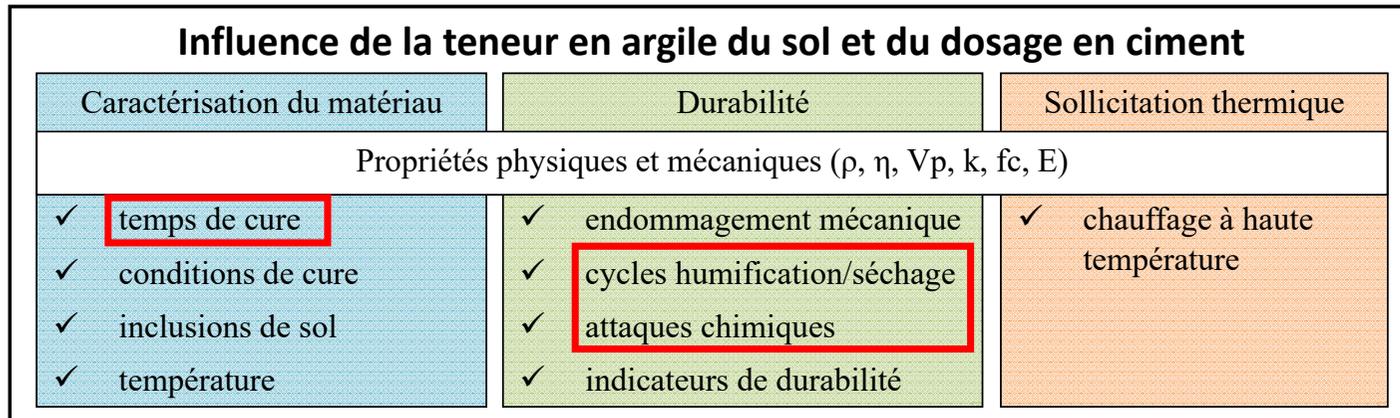
Introduction



Approche béton



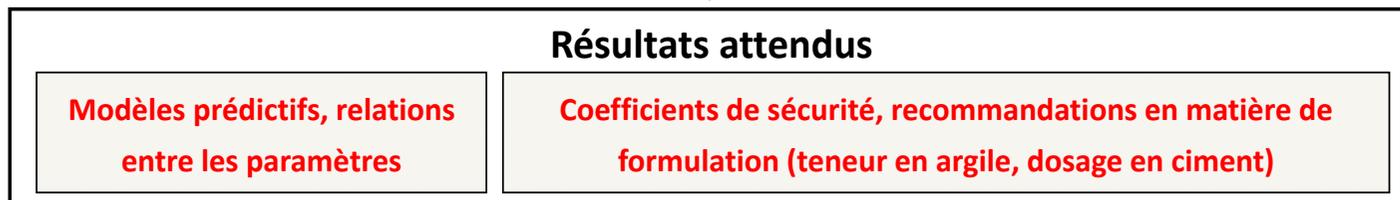
Confronter les résultats aux normes bétons



Analyse



Alimenter les guides normatifs



Formulation

› Matériaux:

Sable de Fontainebleau et Kaolinite Speswhite™ + CEM III/C 32,5N

sols « artificiels »

ciment

› Proportions & dosages:

Sable/Kaolinite [100/0], [90/10], [85/15], [75/25], [50/50] *volumique*

Ciment 200 et 300 kg/m³ de béton frais...

Abréviations K25C200

proportion d'argile



dosage en ciment

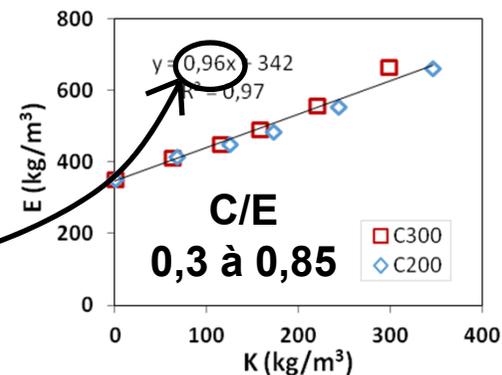
› Ouvrabilité:

Rapport E/C → 32 cm au mini-cône

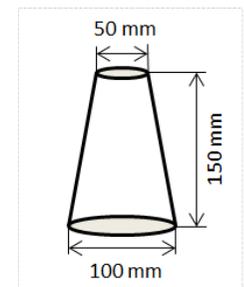
$V_{eau} + V_{sol} + V_{ciment} = 1 \text{ m}^3$

« Eau efficace » constante

= Eau totale – Eau retenue par l'argile

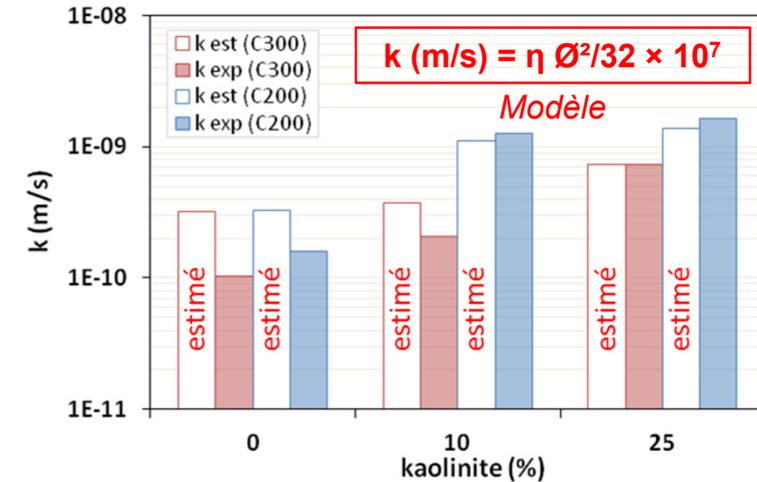
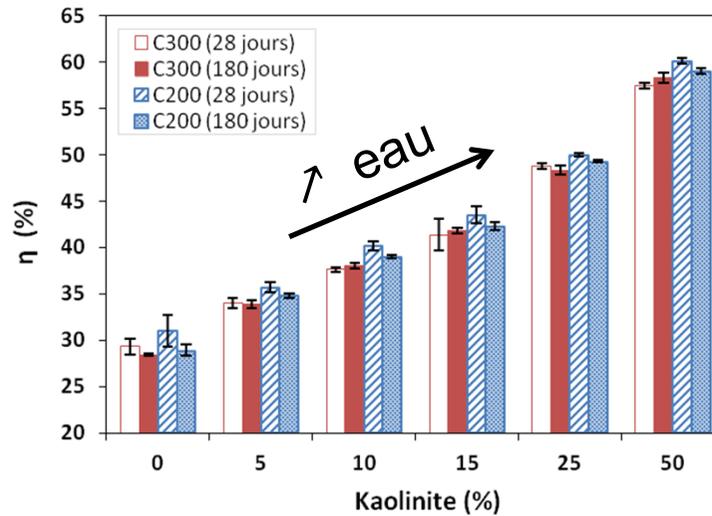


(Mohamed, 2010)



dimensions

Propriétés physiques

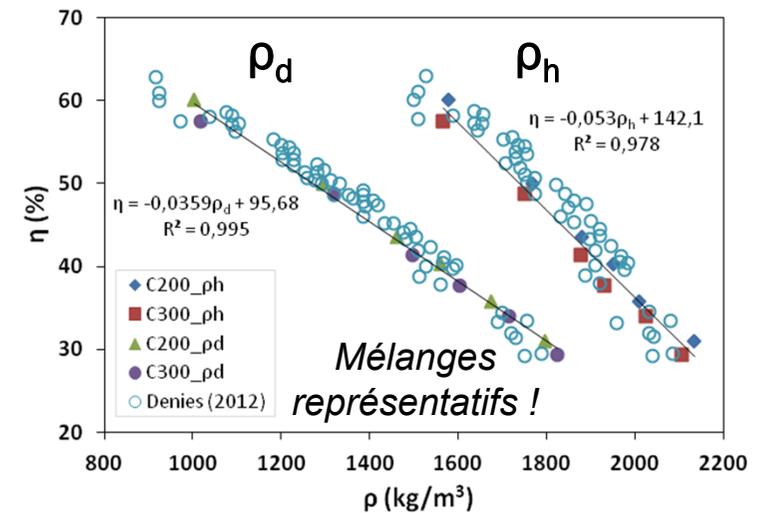


- › Porosité accessible à l'eau: 30 à 60 %
- › Distribution de la taille des pores :
unimodale (avec argile) / **bimodale** (sans argile)

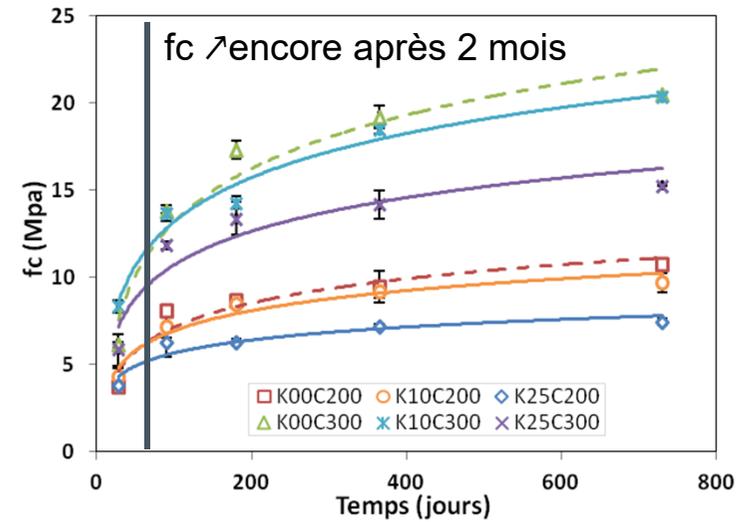
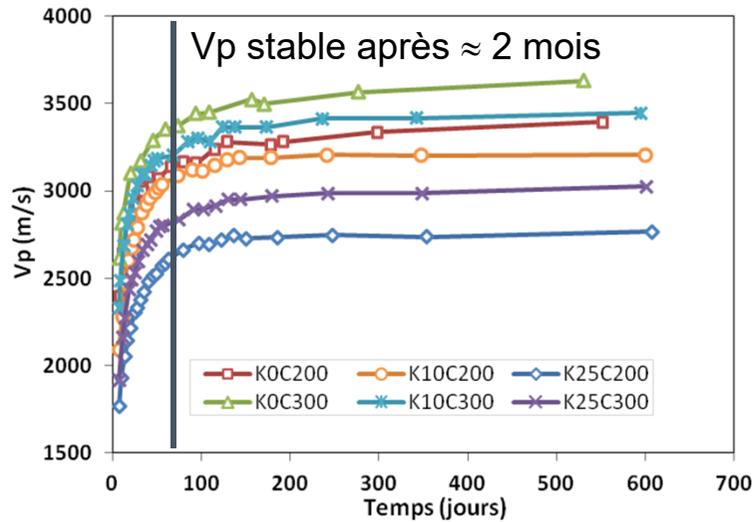
Relation η - ρ :

comparaison avec une étude en Belgique

16 sites de construction (limon, sable)



Propriétés mécaniques : temps de cure



› Augmentation logarithmique :

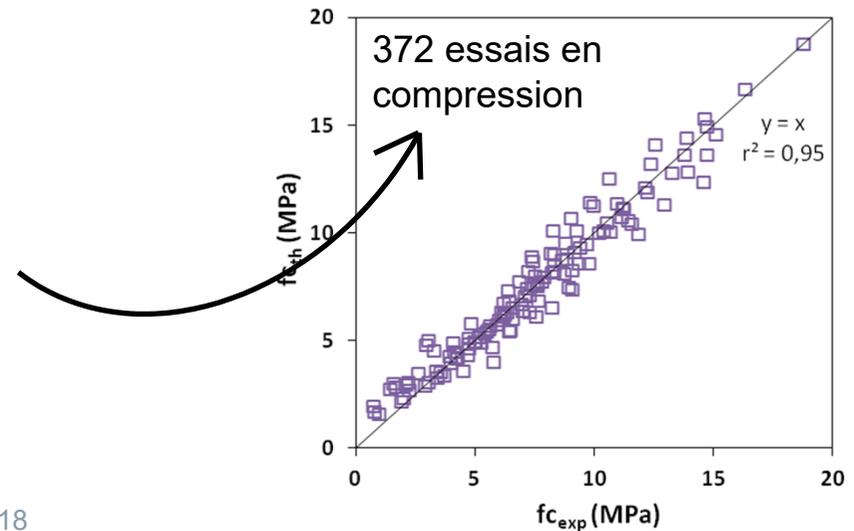
→ $fc(\text{MPa}) = a \ln(t) + b$

› Estimation de la résistance :

→ $fc(t) = 0,32 fc_{28} (\ln(t) - 0,26)$

› Cinétique à long terme :

→ pas la même pour fc et Vp



Durabilité: attaques sulfatiques externes

› Trois types de dégradations :

Lixiviation, fissuration, desquamation...

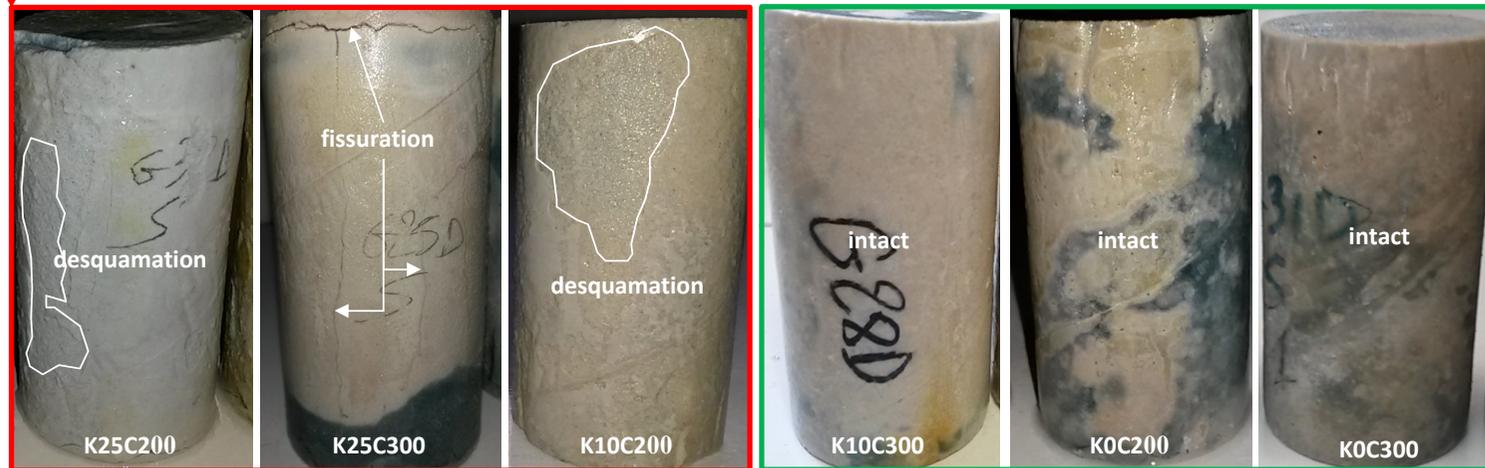
› Influence des paramètres de formulation :

K25C200, K25C300, K10C200 → **altéré** (10^{-9} à $7 \cdot 10^{-10}$ m/s)

K10C300, K0C200, K0C300 → **intact** (10^{-10} à $2 \cdot 10^{-10}$ m/s)

› Influence de la durée d'immersion :

Accentuation des désordres en fonction du temps: **12 mois**



26 AVRIL 2018

FNTP - CFMS

7

Durabilité: attaques sulfatiques externes

› Trois types de dégradations :

Lixiviation, fissuration, desquamation...

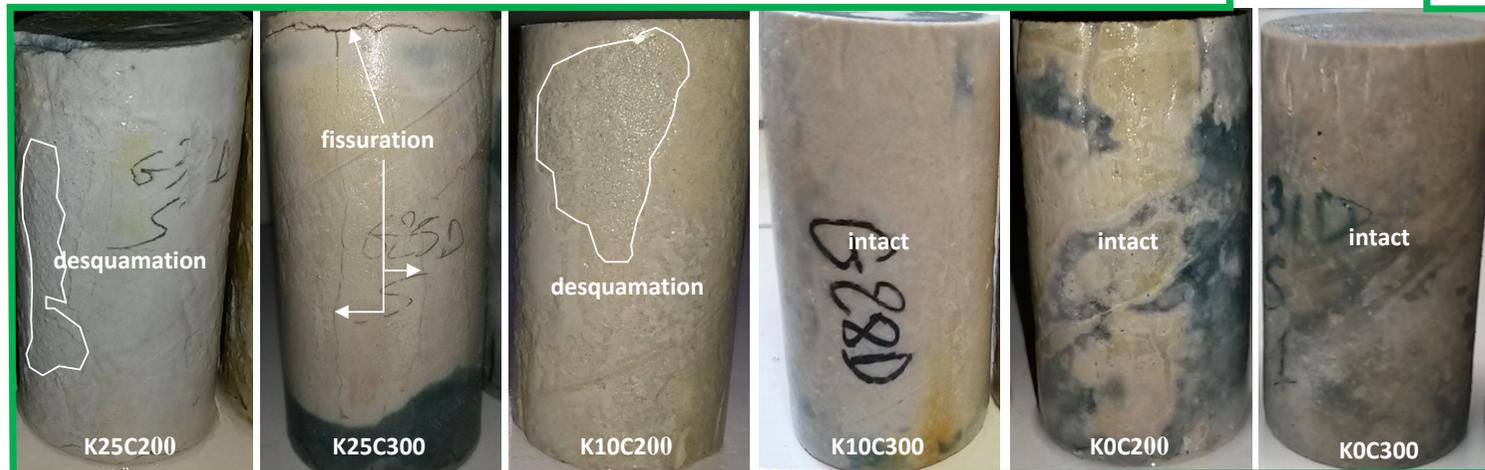
› Influence des paramètres de formulation :

K25C200, K25C300, K10C200 → **altéré** (10^{-9} à 7.10^{-10} m/s)

K10C300, K0C200, K0C300 → **intact** (10^{-10} à 2.10^{-10} m/s)

› Influence de la durée d'immersion :

Accentuation des désordres en fonction du temps: **12 mois**



26 AVRIL 2018

FNTP - CFMS

8

Durabilité: attaques sulfatiques externes

› Trois types de dégradations :

Lixiviation, fissuration, desquamation...

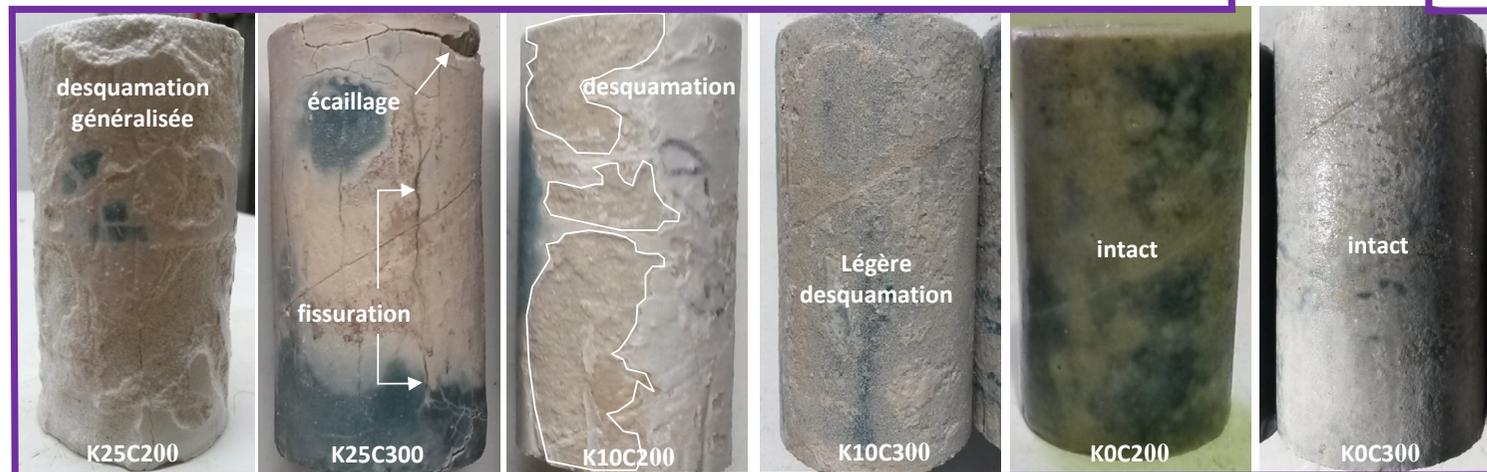
› Influence des paramètres de formulation :

K25C200, K25C300, K10C200 → **altéré** (10^{-9} à $7 \cdot 10^{-10}$ m/s)

K10C300, K0C200, K0C300 → **intact** (10^{-10} à $2 \cdot 10^{-10}$ m/s)

› Influence de la durée d'immersion :

Accentuation des désordres en fonction du temps: **22 mois**

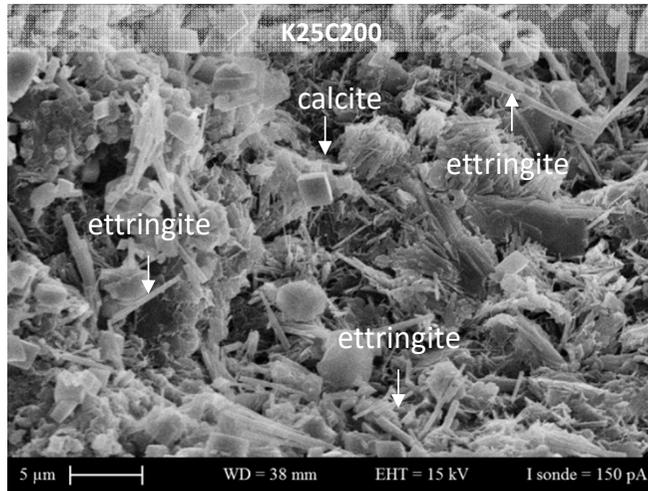
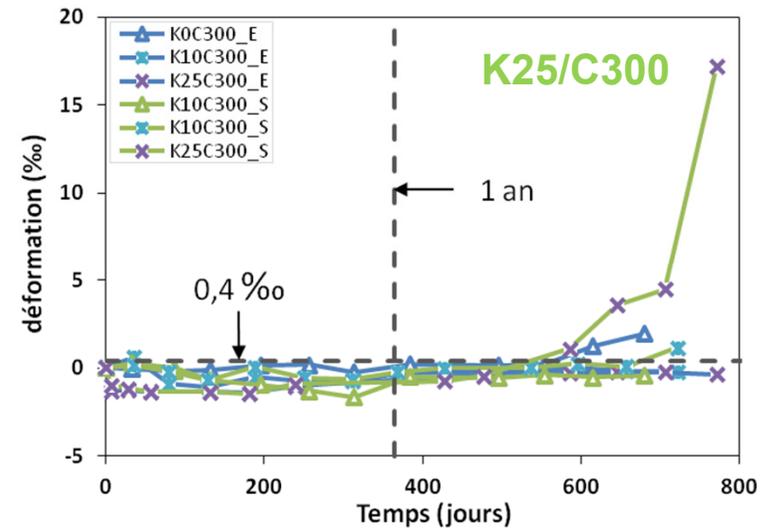
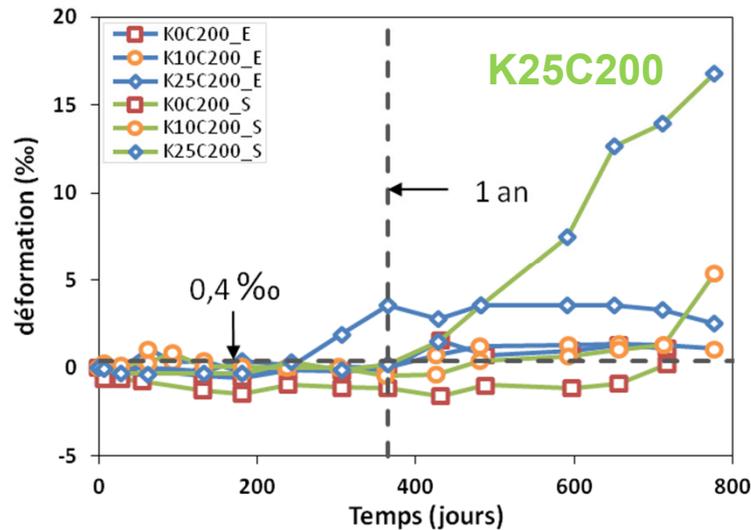


26 AVRIL 2018

FNTP - CFMS

9

Durabilité: attaques sulfatiques externes



- > **Guide du LCPC** sur les RSI (2007) → $\epsilon < 0,4 \text{ ‰}$ après 1 an
- > Gonflement important avec **25 % d'argile** :
 200 kg/m³ de ciment → à partir de **365 jours** d'immersion
 300 kg/m³ de ciment → à partir de **480 jours** d'immersion
- > **Gonflement** → en lien avec la formation d'ettringite (Aft) ?

Durabilité: cycles humidification/séchage

› Objectif :

→ engendrer un **vieillissement accéléré** pour évaluer la **durabilité**.



180 jours de cure
endogène
Début des cycles

| 3, 6, 12 et 24 cycles | | |
|---|-------------------------------------|---|
| Humidification | 2 protocoles de séchage | |
| 2 jours d' immersion dans l'eau | « accéléré » | « long » |
| | 24h dans une étuve à 53°C | 2 semaines dans une chambre climatique à 20 °C et 50 %HR |

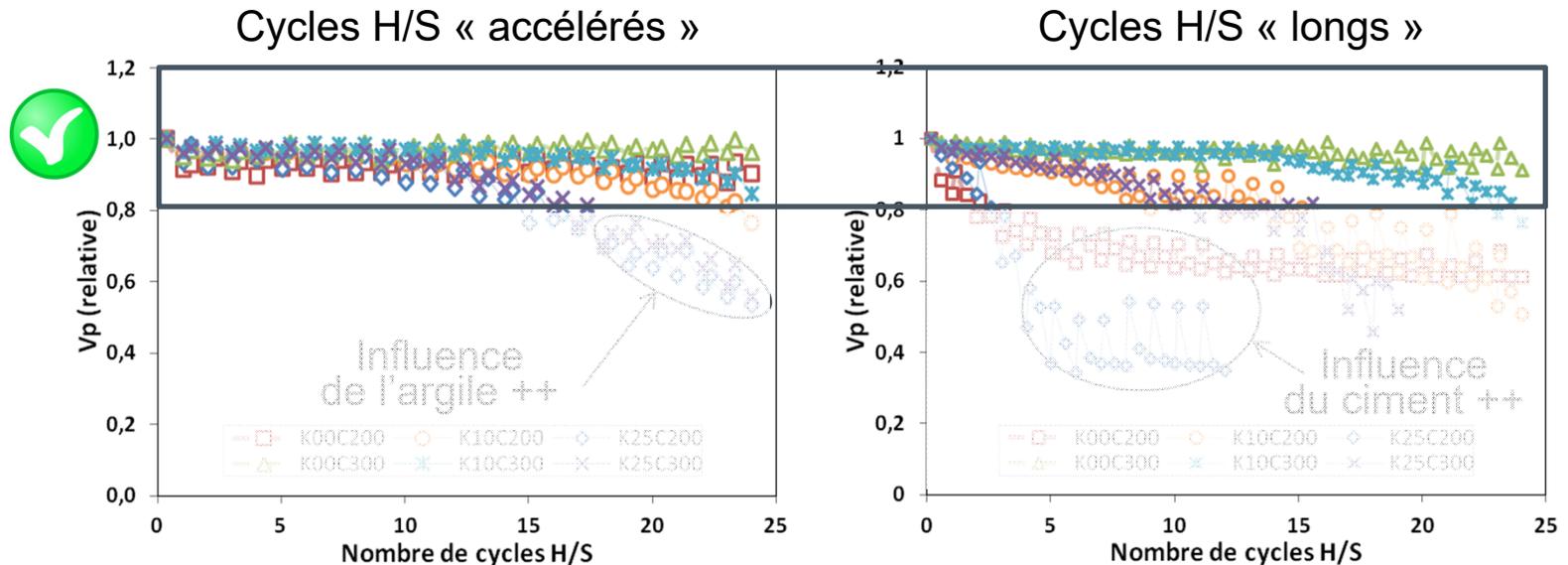


Dessiccation

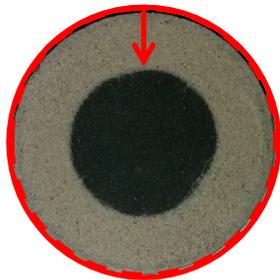
› 2 types de cycle :

Vitesse de séchage & température → **niveau de dégradation ?**

Durabilité: cycles humidification/séchage



Progression radiale du séchage

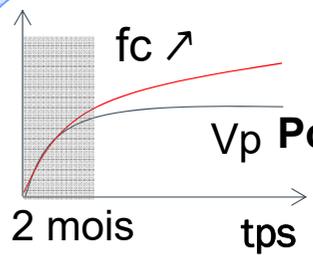


- › La \searrow de Vp traduit l'**ouverture de microfissures**
- › Cycles H/S « accélérés » : \searrow de Vp à partir de 12 cycles
Séchage périphérique → conductivité hydraulique
- › Cycles H/S « longs » : \searrow de Vp dès le début des cycles
Séchage + homogène → résistance en traction

Conclusion

Hydromécanique

- ✓ *Résistance*
- ✓ *Vitesse des ondes P*
- ✓ *Taille des pores*
- ✓ *Porosité et perméabilité*



2 mois tps

$fc \nearrow$

V_p

Sensibilité au séchage (protection in situ ?)

Poreux ($30\% < \eta < 60\%$) → «bétons légers»

Perméable ($10^{-8} \text{ m/s} < k < 10^{-10} \text{ m/s}$)

Résistance aux sulfates ($k < 10^{-9} \text{ m/s}$)

\nearrow de k en fonction des cycles H/S

cinétique d'endommagement

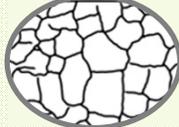
$k \nearrow$  $k \searrow$ 

Durabilité

- ✓ *Indicateurs de durabilité*
- ✓ *Cycles H/S*
- ✓ *Attaques chimiques*

Gonflement
 \nearrow de masse
&
Microfissures
 $\searrow V_p$

Sulfates


Cycles H/S


$K \leq 10 \%$
 $C \geq 300 \text{ kg/m}^3$

durable

$E \geq 15 \text{ Gpa}$
 $\varepsilon \leq 9400 \mu\text{m}$

$V_p \geq 3250 \text{ m/s}$
 $\rho \geq 1550 \text{ kg/m}^3$

$\eta \leq 40\%$
 $k \leq 10^{-9} \text{ m/s}$