Intégration dans le béton de déchets industriels. Etude de durabilité de liants alternatifs.

Mickael SAILLIO

Ingénieur de Recherche

24 septembre 2014

Comportement Physico-chimique et Durabilité des Matériaux (CPDM)

Directeur du laboratoire : Loïc DIVET

mickael.saillio@ifsttar.fr

Sommaire

Contexte & Problématique écologique liée à la fabrication du béton

Exemples de solutions :

1) Liants alternatifs au clinker

- Laitier , cendres volantes, métakaolin
- Poudres de verre, boues calcinées ….

2) Utilisation de granulats alternatifs

- Granulats recyclés issus de la déconstruction
- Granulats alternatifs riches en sulfates

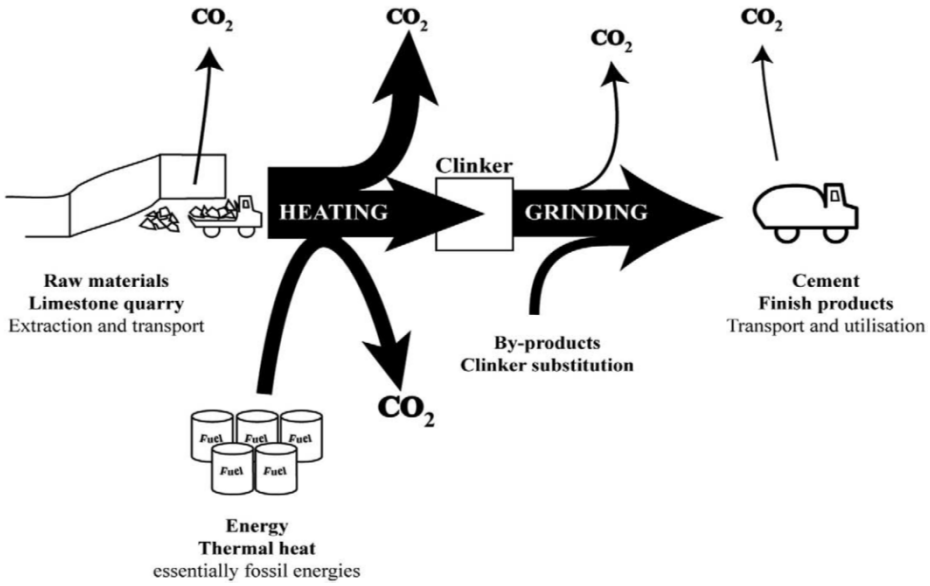
Conclusions et les perspectives

Contexte & Problématique

La production de ciment a un coût écologique important

(dégagement CO_2 et consommation d'énergie)

Schéma de la production du ciment



(Habert et al. 2010)

Usine de ciment

(Jiangsu group, 2006)

Comment remplacer le ciment ?

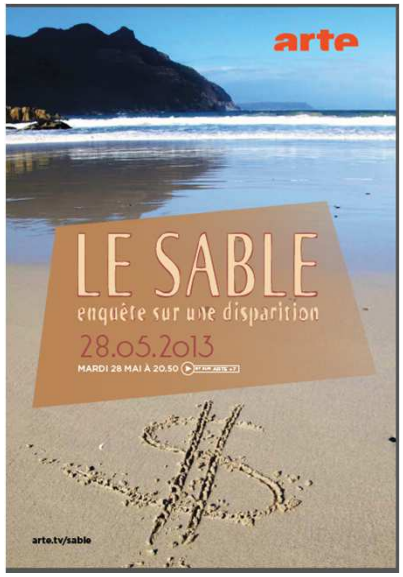
⇒ Utilisation de liants alternatifs (laitiers, cendres volantes et métakaolin, poudres de verre, boues calcinés…)

⇒ Bétons bio-sourcés

Contexte & Problématique

Epuisement des ressources et production de déchets

Documentaire



(ARTE, 2013)

Récolte du sable

(ARTE, 2013)

Décharge de déchets bétons

(actu-environnement.com, 2013)

60 tonnes pour une maison moyenne
1 500 tonnes pour un hôpital
10 000 tonnes par Km d'autoroute
4 00 000 tonnes pour une centrale nucléaire

300 00 000 tonnes de déchets
60 % sont recyclés et utilisés pour les routes (France)

=> Recyclage de granulats provenant de matériaux issus de la déconstruction

=> Utilisation de granulats alternatifs en les adaptant au béton utilisé

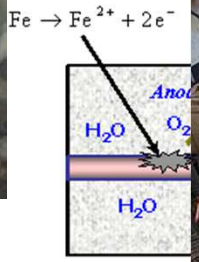
Mais quelle durabilité pour ces matériaux ?

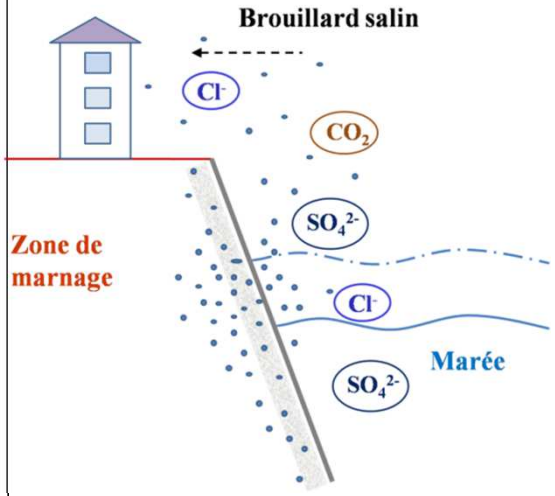
Contexte & Problématique

Pénétration des agents agressifs et durée de vie d'un ouvrage

Ions Chlorure et sulfate et CO_2 => formations de produits expansifs (rouille, ettringite,….)

Bâtiment de Paris, 2007





NGUYEN 2007

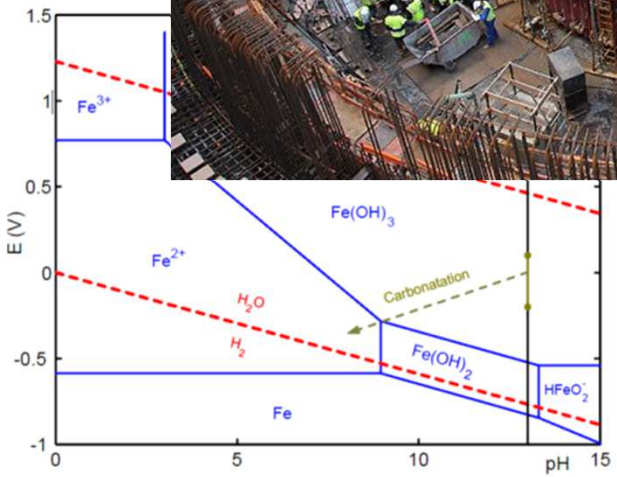


Diagramme de POURBAIX

Flamanville, EDF, 2009

Béton-le-magazzine.fr juillet aout 2006

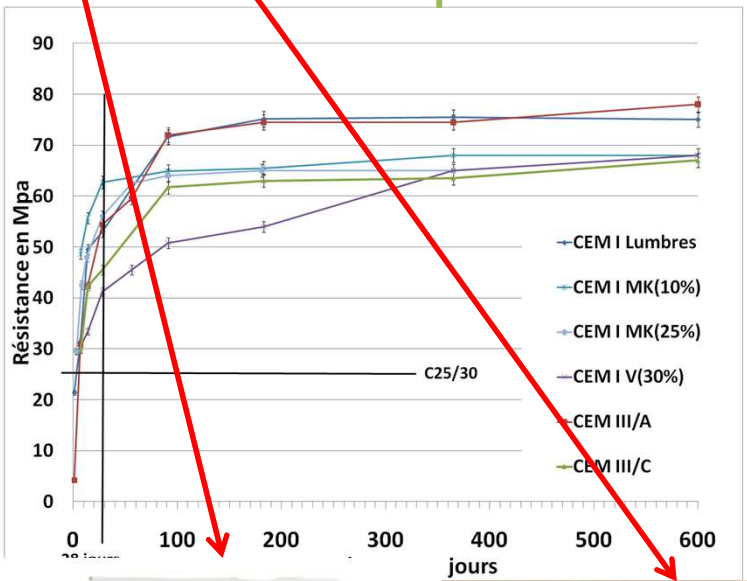
=> Nécessité d'études de durabilité pour tous les matériaux

1) Liants alternatifs au clinker

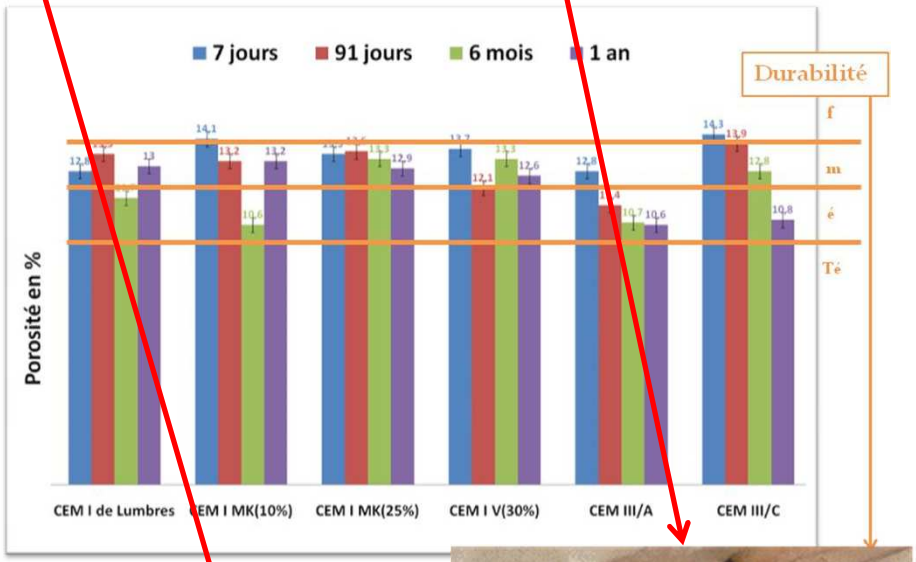
Substitution partielle du clinker (1ère génération)

CEM I + laitiers (CEM III/A et CEM III/C), cendres volantes (CEM I V), métakaolin (CEM I MK)…

Résistance en compression



Porosité



Au bon ciment pas cher

=> Résistance mécanique acceptable pour des bétons destinés au bâtiment

Gégout, 2012

Thèse SAILLIO, 2012

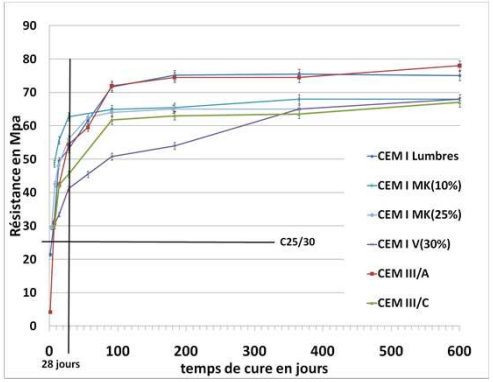
Pb : comportement de ces liants vis-à-vis de la durabilité ?

1) Liants alternatifs au clinker

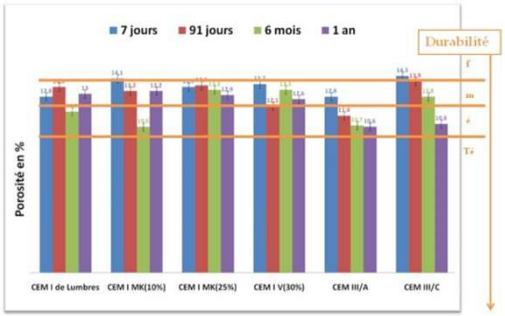
Comparaison entre liants (1ère étude)

CEM I + laitiers (CEM III/A et CEM III/C), cendres volantes (CEM I V), métakaolin (CEM I MK)…

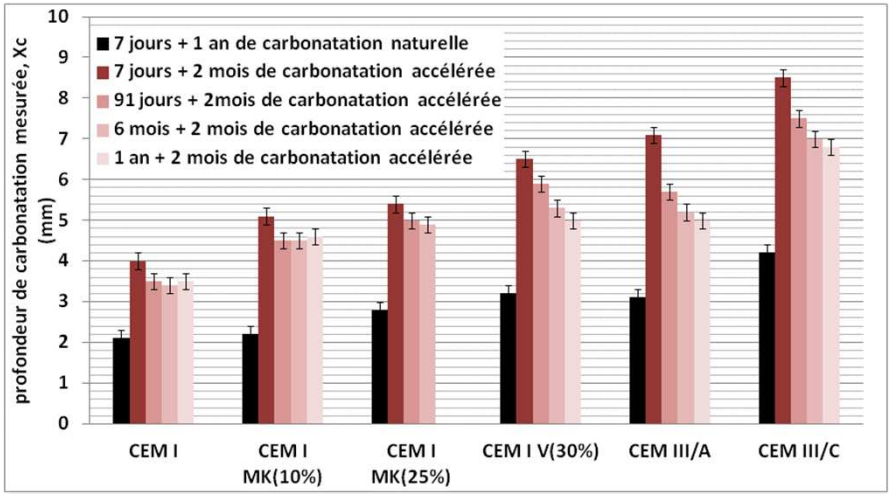
Résistance en compression



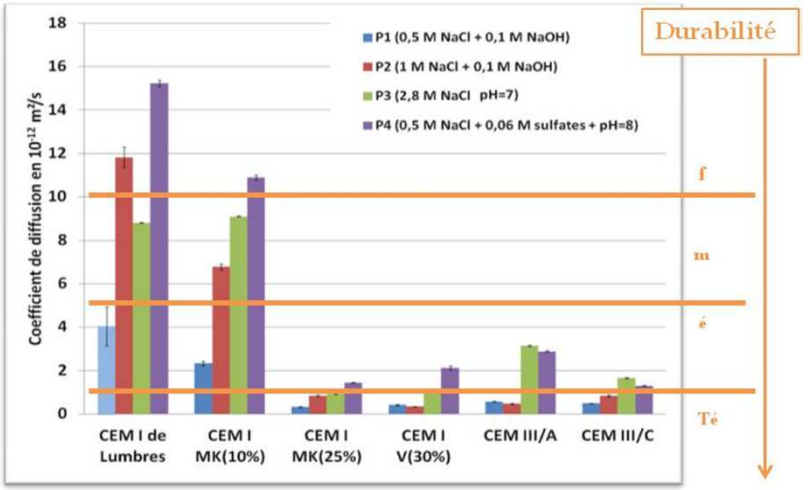
Porosité



Perméabilité au CO_2 (due à la pollution)



Perméabilité aux Chlorures et sulfates (zone côtière ou sels de déverglaçage)

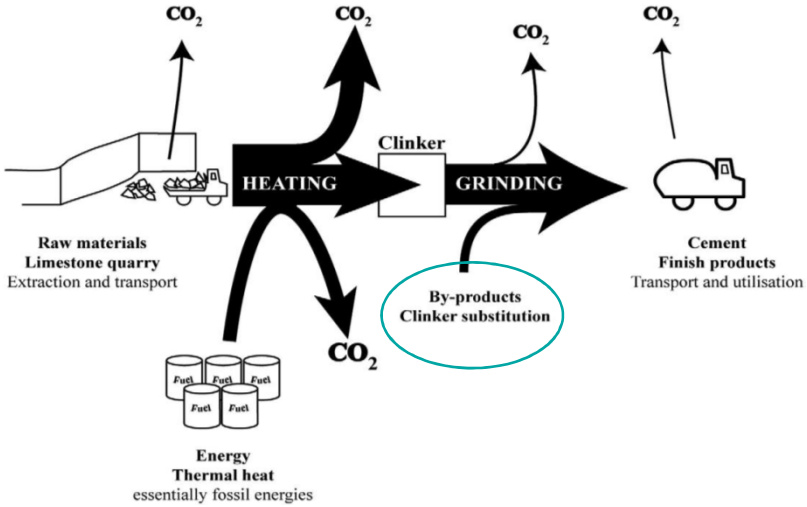


=> Avantages et inconvénients

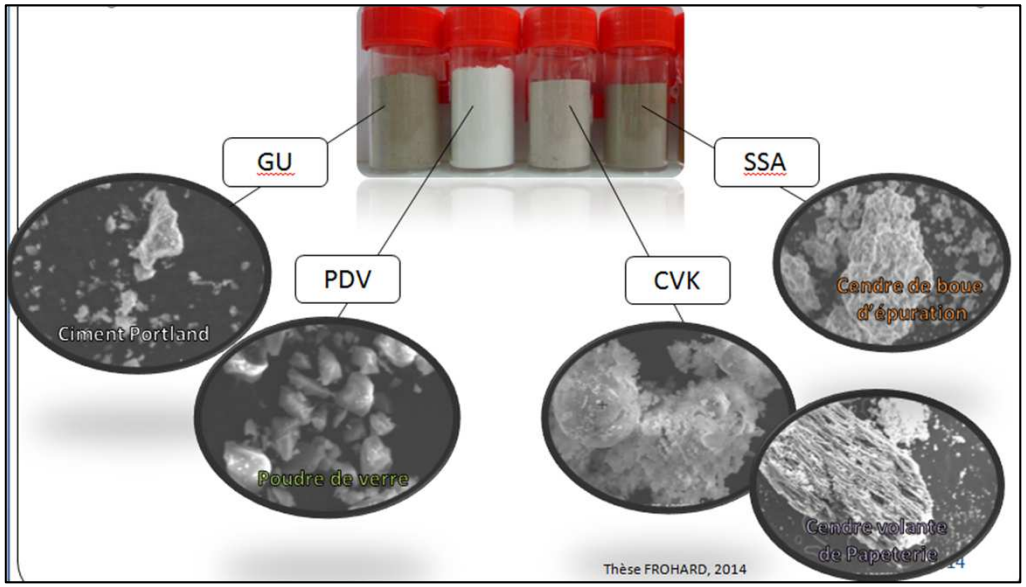
Thèse SAILLIO, 2012

Construction et développement durable

Stratégie : remplacer en partie le ciment par des déchets locaux d'industrie



(Habert et al. 2010)



Additions cimentaires :

Cendres volantes — Laitiers

Métakaolin — Fillers

Extension des types d'additions cimentaires

Cendre volantes alternatives : Papeterie — Écorce de riz — Bagasse (canne à sucre)

Boues d'épurations calcinées — Laitiers alternatifs — Sédiments de dragage

Poudre de verre — Fumées de titane

Thèse FROHARD, 2014

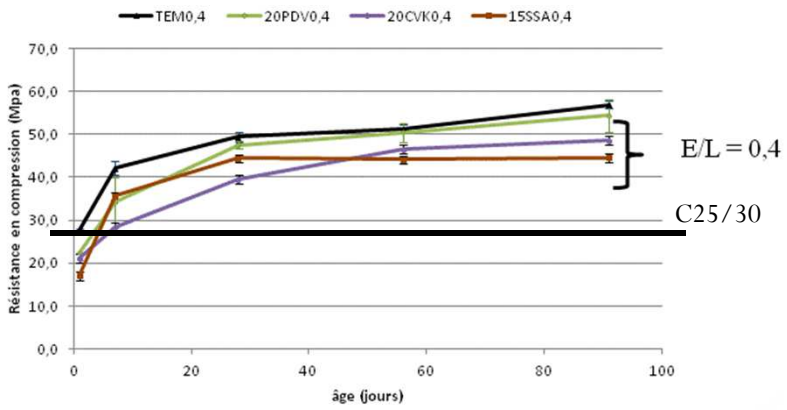
Comparaison entre liants (2ème étude)

Réactivité

+ réactive

- réactive

Fine	Phase réactive	Phase formées
• PDV	• S	• C-S-H
• CVK	• MK, CŜ, C, CH	• C-(A)-S-H, Aft,
• SSA	• A-S, C-P(-H)	• C-(A)-S-H, C(A)PH, $C_xA_yH_z$



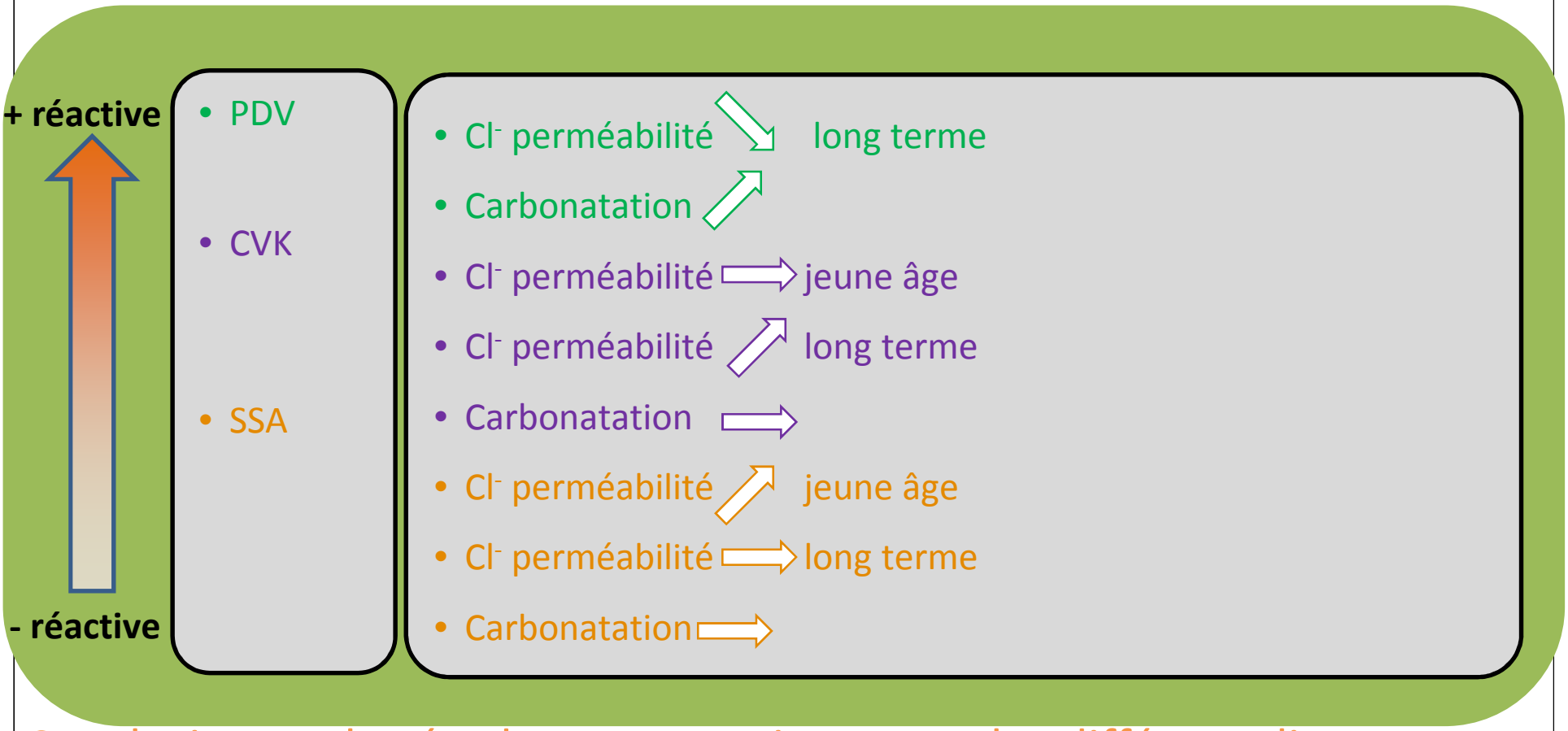
⇒ Réactivité variable

⇒ Phases formées différentes

Mais résistance mécanique semblable

Thèse FROHARD, 2014

Comparaison entre liants (2ème étude)



Conclusion sur les études comparatives entre les différents liants

- La substitution partielle du ciment par des déchets industriels est possible
- Les additions minérales présentent des avantages et des inconvénients, il convient donc de les utiliser *en tenant compte de l'environnement du matériau*

=> **Études de durabilité**

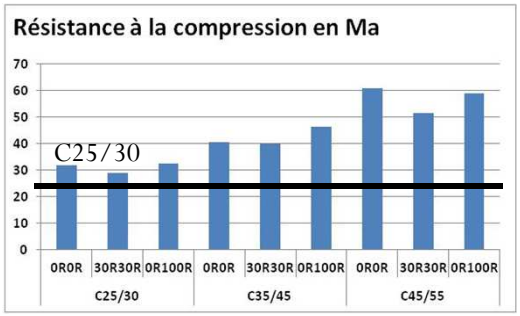
Thèse FROHARD, 2014

2) Utilisation de granulats alternatifs

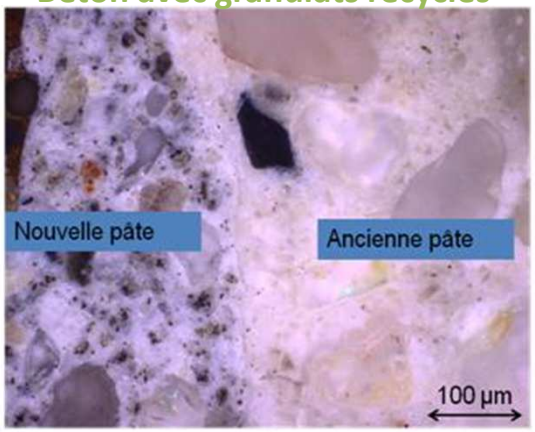
Recyclage de granulats provenant de la déconstruction (1ère étude)

⇒Projet RECYBETON

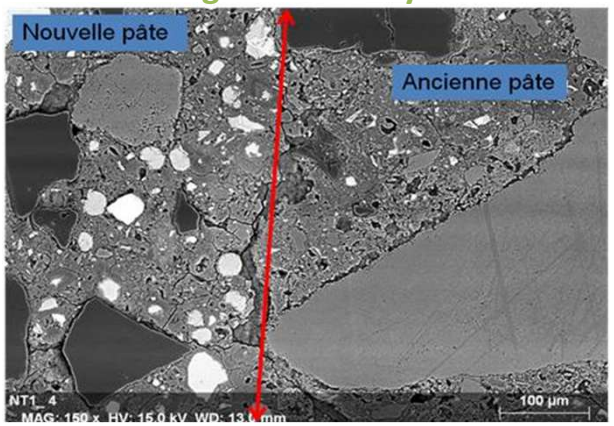
Pb : comportement de l'ancienne pâte ?



Béton avec granulats recyclés



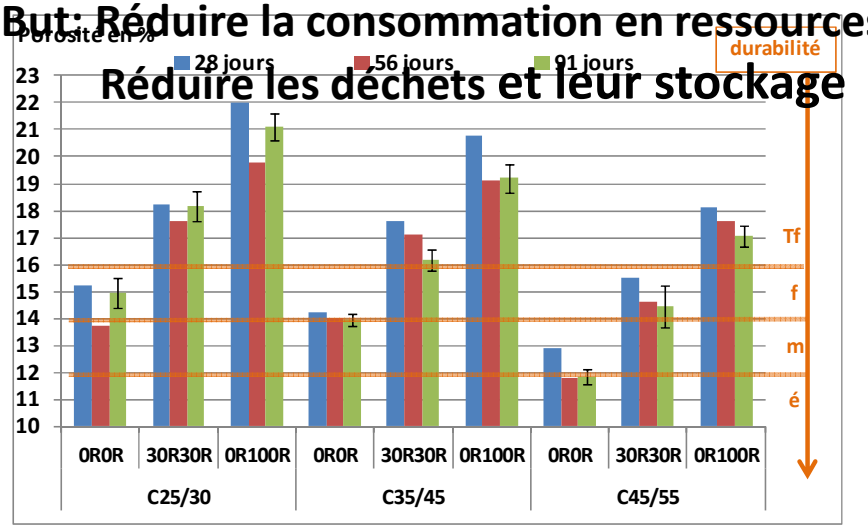
Béton avec granulats recyclés au MEB

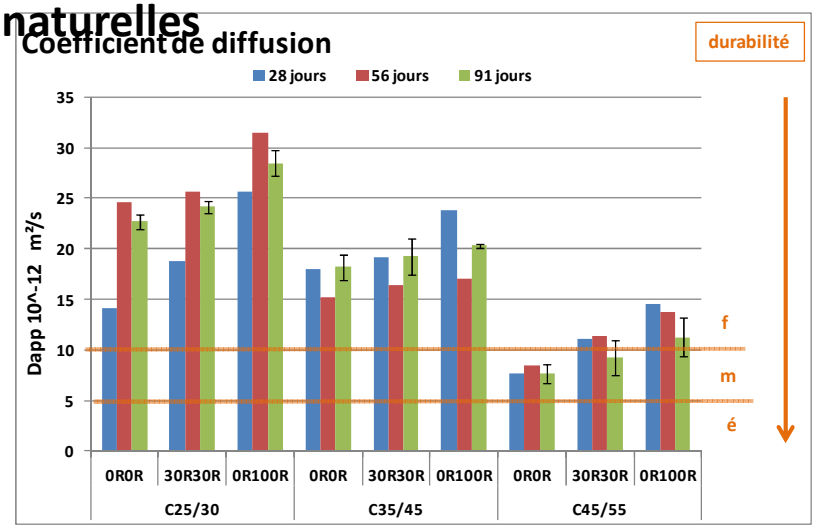


Post-doc SAILLIO, 2012

But: Réduire la consommation en ressources naturelles

Réduire les déchets et leur stockage





⇒ Diminution de la durabilité mais acceptable pour les bâtiments si remplacement partielle (y compris résistances en compression)

Solution => Traiter ces granulats pour les rendre moins perméables

Utilisation de granulats riches en sulfates (2ème étude)

Utilisation d'une ressource locale en granulats

Tunnel de base

16 millions de m^3 de matériaux excavés

→ 25% valorisé en granulats à béton

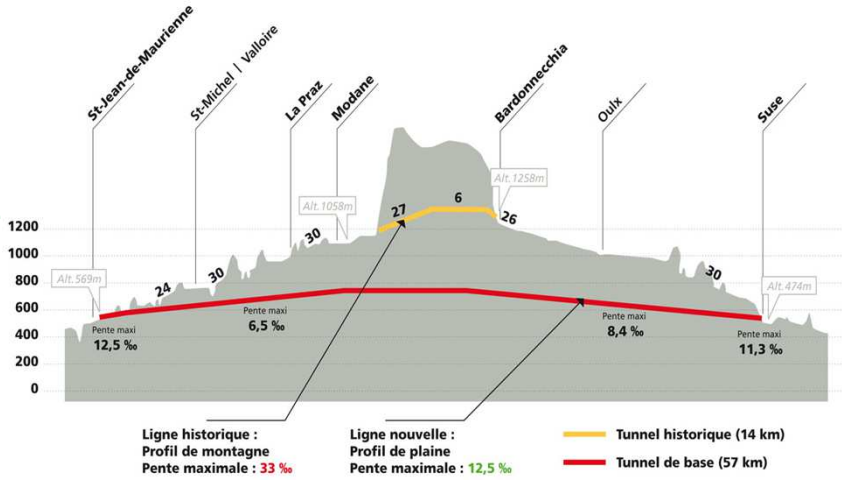
LYON TURIN FERROVIAIRE

Thèse COLAS, 2012

Enjeux de la valorisation

- Gestion économe et durable des ressources naturelles
- Diminution de l'impact environnemental

Station locale de traitement des matériaux



PB : Une partie des matériaux riches en sulfates

SO_3 (granulats) = 1,6 et 4,3%

60% Anhydrite – 40% Gypse

($CaSO_4$) ($CaSO_4.2H_2O$)

Non conformes en tant que granulats à béton

$SO_3 \leq 0,2\%$ [NF EN 12620+A1, 2008]

<u>Risque</u>

Développement d'une réaction sulfatique interne (RSI)

Thèse COLAS, 2012

Scénario du risque de RSI

Thèse COLAS, 2012

- Solubilisation des sulfates issus des granulats dans le béton
- Formation de gypse « tardif » par réaction entre les ions sulfate et calcium
- Réaction du gypse avec les composants du ciment

→ **Formation de produits sulfatés expansifs (Ettringite / Thaumasite)**

Dommages pour la structure du béton

Structure endommagée par formation d'ettringite [LCPC, 2007]

Béton endommagé par formation de thaumasite [Photo LCPC]

Plusieurs solutions proposées

Déterminer le comportement des sulfates contenus dans les matériaux excavés

Sans traitement

Risque élevé de RSI

- Accessibilité rapide des sulfates

- pH alcalin favorise la lixiviation

→Traitement des matériaux excavés avant utilisation

✓ Suppression de la fraction < 0,315 mm

SO_3(sable) = 3,3% → 1,4%

✓ Lavage des matériaux excavés

SO_3(sable) = 3,3% → 1,9%

SO_3=1,1%

Définir un ciment adapté à ce type de granulats

Ciment anhydre classique

clinker (95%) + ***gyps*** *(5%)*

Liant ***régulateur d*** ***prise***

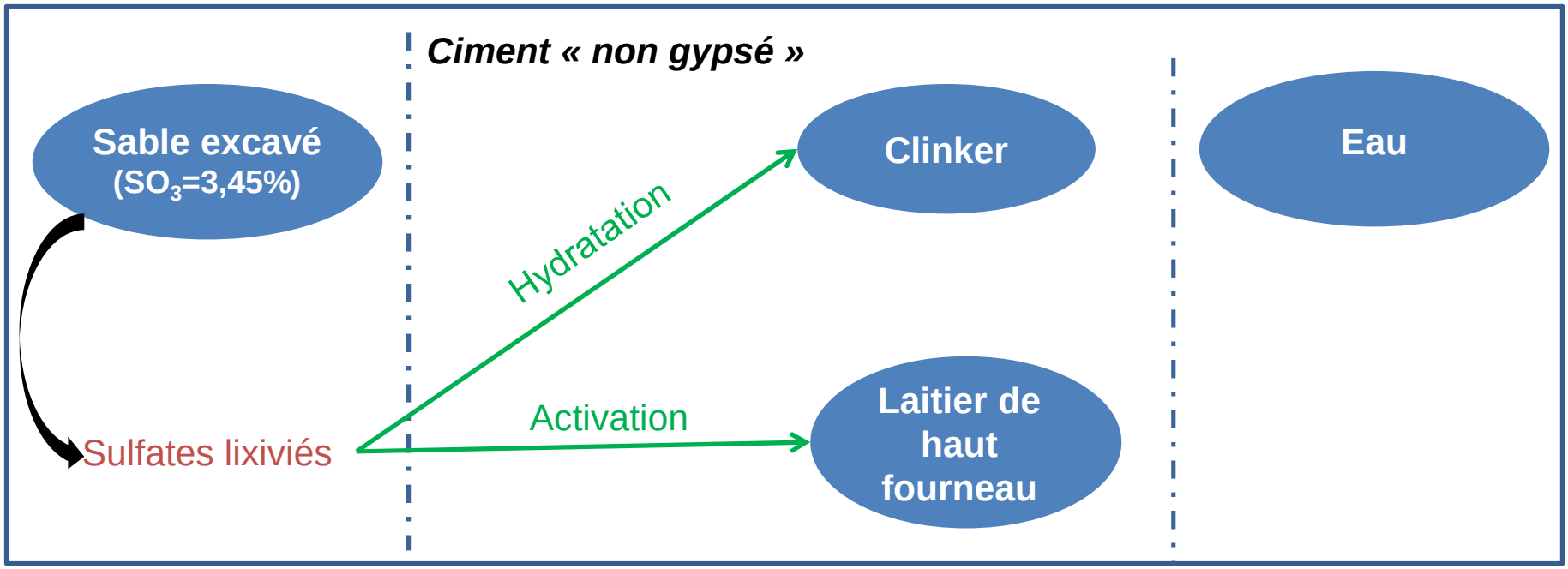
$CaSO_4.2H_2O$

Thèse COLAS, 2012

Adaptation du ciment en fonction du granulat

Mortier de béton équivalent (MBE)

Ciment de type CEM III/B (72% de LHF)



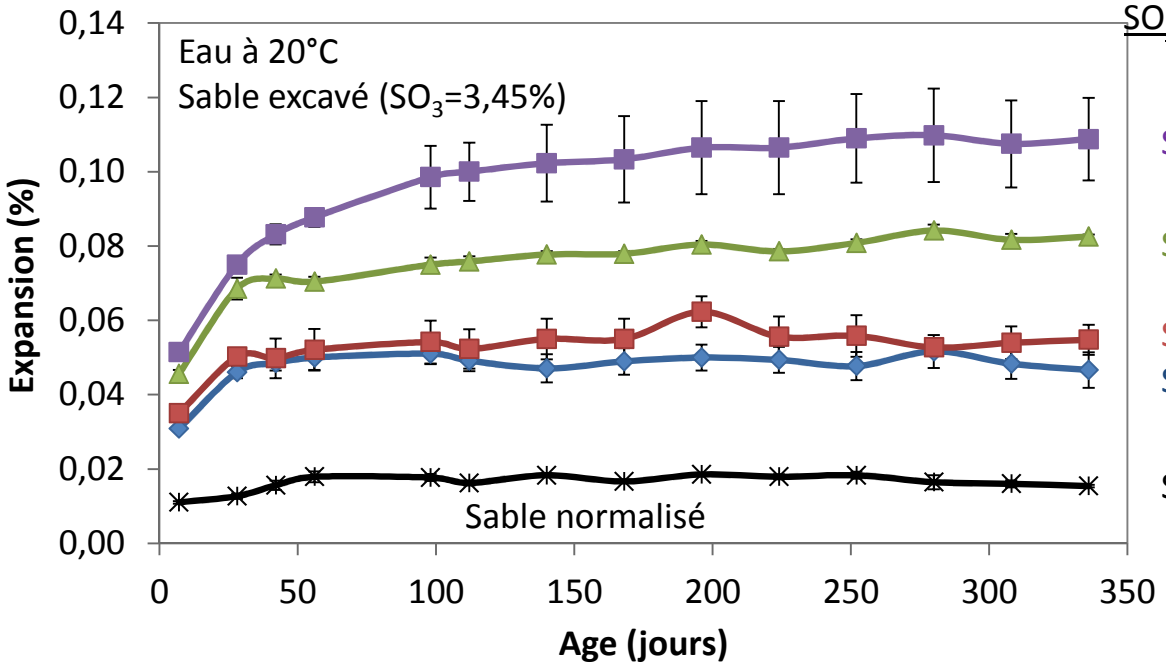
Sulfates lixiviés du sable → Réactions d'hydratation du ciment → ↓ sulfates libres dans le matériau → ↓ de la RSI

Thèse COLAS, 2012

Adaptation du ciment en fonction du granulat

Essai accéléré

Principe de l'essai pour évaluer le comportement des ciments face à l'ettringite



SO_3 (total) dans le matériau	Teneur en gypse dans le ciment
SO_3=2,92%	Gypse=5,5%
SO_3=2,57%	Gypse=3,5%
SO_3=2,18%	Gypse=1,5%
SO_3=2,15%	Gypse=0,0%
SO_3=0,81%	Gypse=5,5%

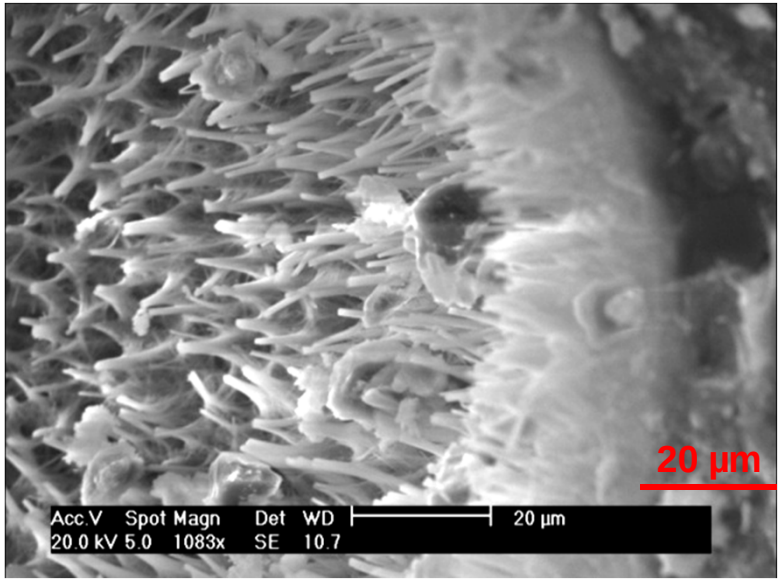
Expansion proportionnelle à la teneur en SO_3 du matériau

↓de la teneur en sulfates de calcium du ciment →↓ de l'attaque sulfatique interne

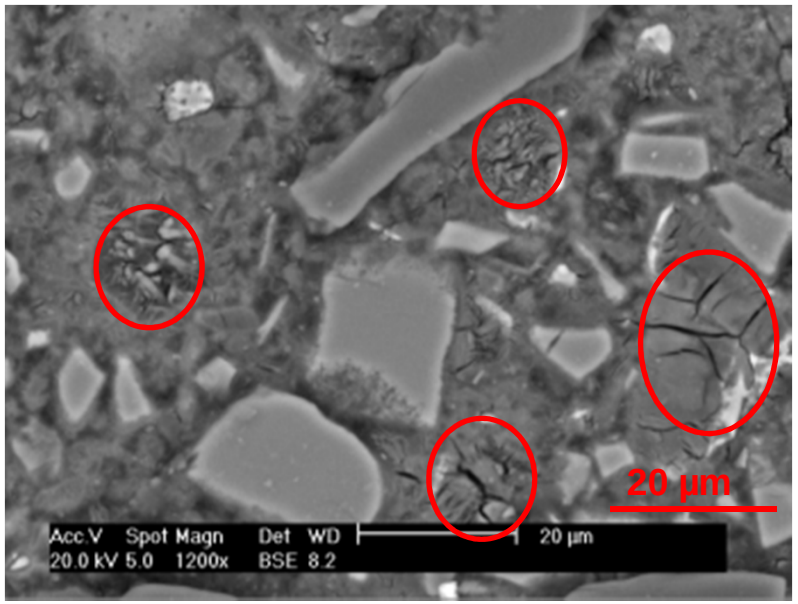
Thèse COLAS, 2012

Adaptation du ciment en fonction du granulat

Analyses au MEB à 90 jours



Ciment avec 0,0% de gypse
+ Sable excavé (SO_3=2,15%)

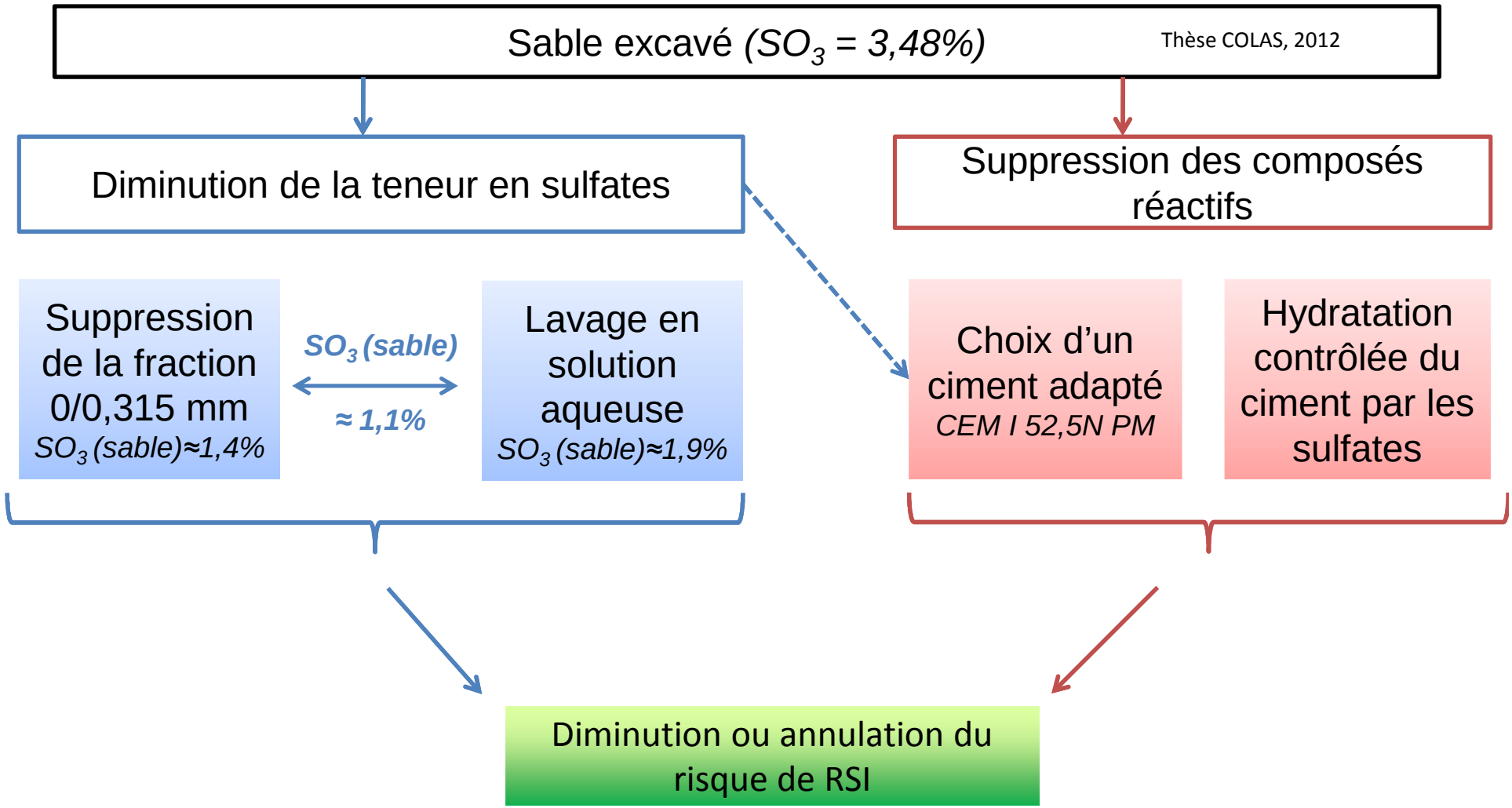


Ciment avec 5,5% de gypse
+ Sable excavé (SO_3=2,92%)

Ettringite bien cristallisée dans vacuoles → Non expansive

Ettringite sous forme de nodules dans la pâte de ciment → Expansive

Thèse COLAS, 2012



Conclusion sur les études sur granulats alternatifs

- Réduction de la durabilité des bétons
- **Mais** possibilité d'appliquer des traitements sur ces granulats et d'adapter les liants pour les rendre compatible avec les attentes industrielles

Conclusions & perspectives

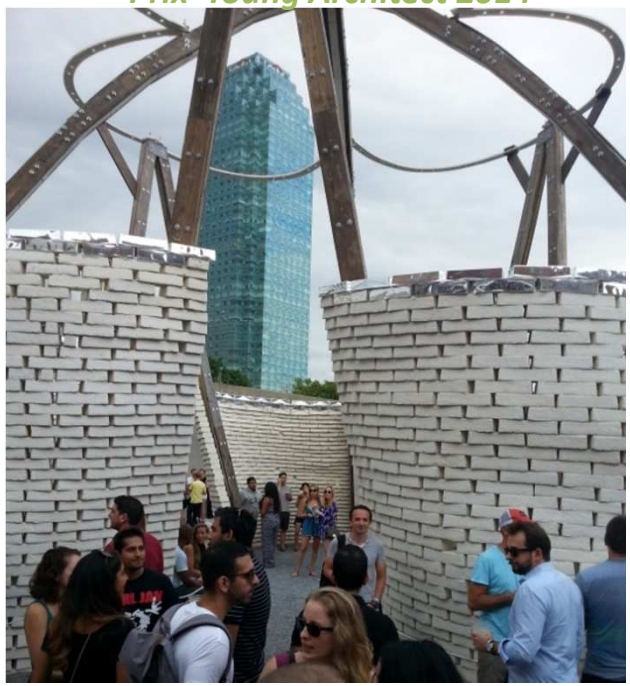
Des solutions concrètes existent afin de réduire l'impact écologique lié à la production du béton :

- **Liants alternatifs (laitier, cendres volantes, métakaolin, poudre de verre, boues…)**
- **Granulats alternatifs (granulats recyclés issus de la déconstruction, granulats riches en sulfates…)**

- **Utilisation de granulats issus de la déconstruction contenant des plâtres (riches en sulfates)**
- **Matériaux bio-sourcés (bétons en fibres de chanvres, cannes à sucre …)**

Briques de maïs

Ouvrage en briques de maïs
Prix Young Architect 2014



(MoMa , New York, 2014)

Merci de votre attention

Les bétons

Granulats + ciment + eau + adjuvant + additions minérales (fumées de silice, cendres volantes, laitier, métakaolin)

Hydratation du clinker (C_2S, C_3S, C_3A et C_4AF)

+

Réactions des additions minérales (réactions pouzzolaniques, activation du laitier…)

Matériaux sains

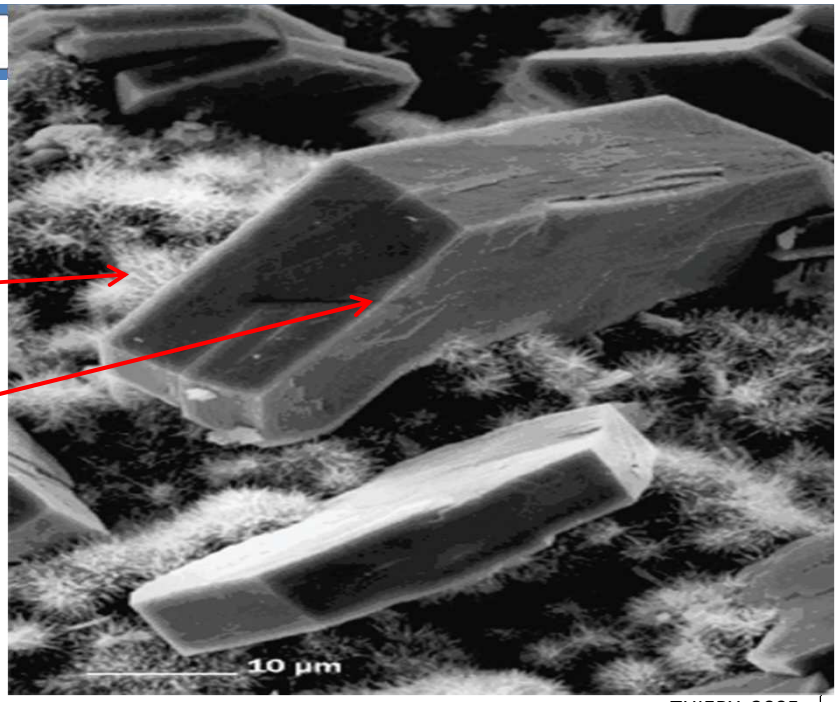
Les principales phases hydratées de la matrice cimentaire en équilibre avec la solution interstitielle

C-S-H (40-60 %)

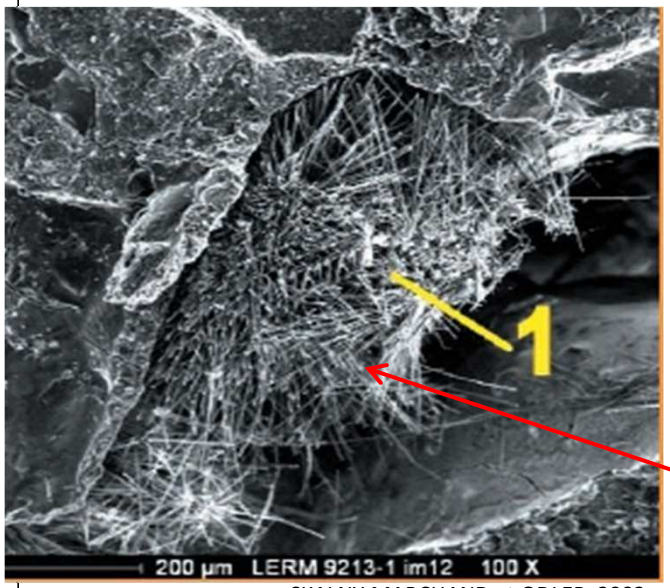
Responsables des propriétés mécaniques et de la fixation physique des ions

Portlandite (5-20 %)

Responsables du maintient du pH voisin de 13 (passivation des armatures) de la SI



THIERY, 2005



SKALNY,MARCHAND et ODLER, 2002

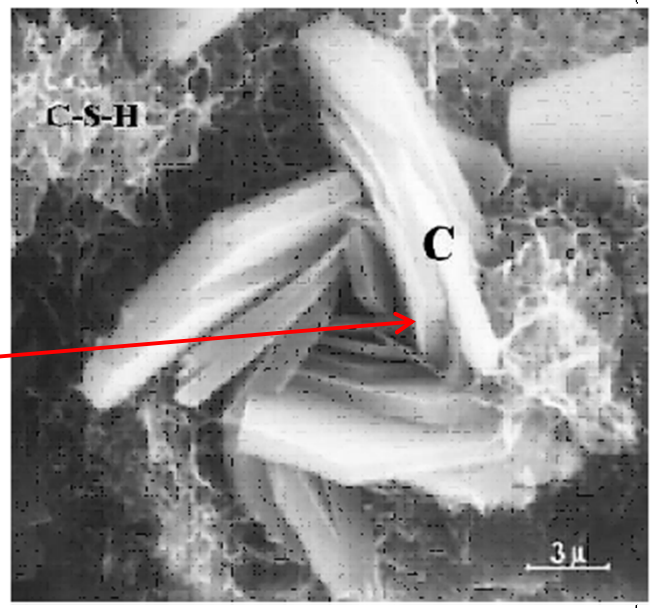
Phases aluminates (≈15 %)

Réaction chimiques avec les agents agressifs présents

Cl^-, SO_4^{2-}, CO_3^{2-}….

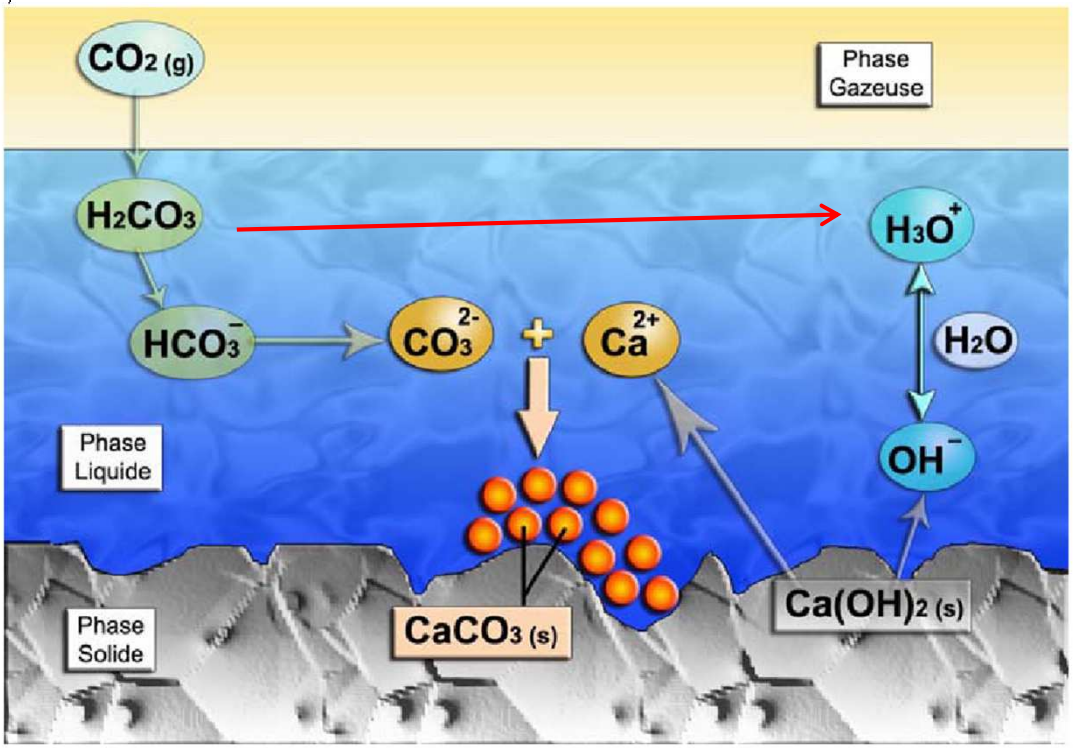
-AFm (sels de Friedel Monocarboaluminate,…)

-AFt (Ettringite)



NGUYEN, 2007

I) La carbonatation



Thierry, 2005

San Francisco city

Ponts des invalides à Paris, LERM, 2010

Rôle de tampon de la portlandite

=> rétablir le pH proche de 13

$$Ca(OH)_2 + H_2CO_3 \rightarrow CaCO_3 + 2\,H_2O$$

Les C-S-H, les phases aluminates ou les anhydres peuvent aussi être dégradés (décalcification, formation de gel de silice, ….)

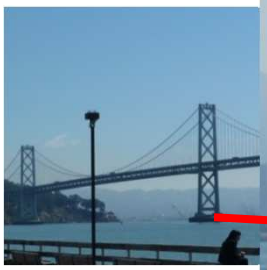
$$C_xS_yH_z + H_2CO_3 = x\,CaCO_3 + y\,SiO_2.tH_2O + (x - t + z)\,H_2O$$

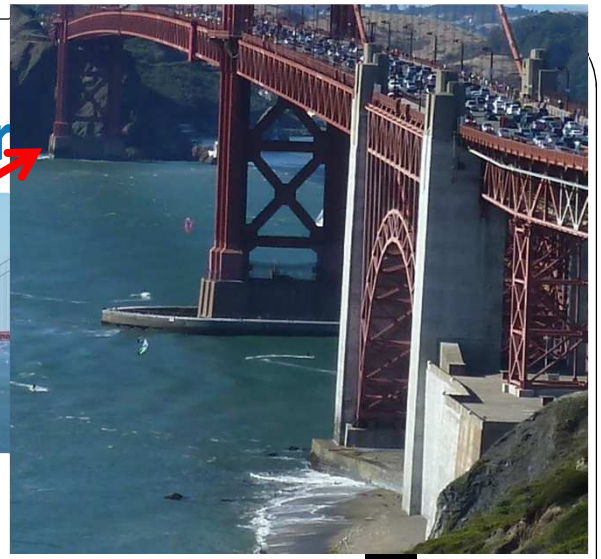
$$C_2S + 2\,CO_2 + n\,H_2O = (SiO_2.nH_2O) + 2\,CaCO_3$$

$$C_3S + 3\,CO_2 + n\,H_2O = (SiO_2.nH_2O) + 3\,CaCO_3$$

DUNSTER, 1989
GROVES, 1990
CHAUSSADENT, 1999

s ions chlorur





Milieu agressif

Béton

O_2

Diffusion

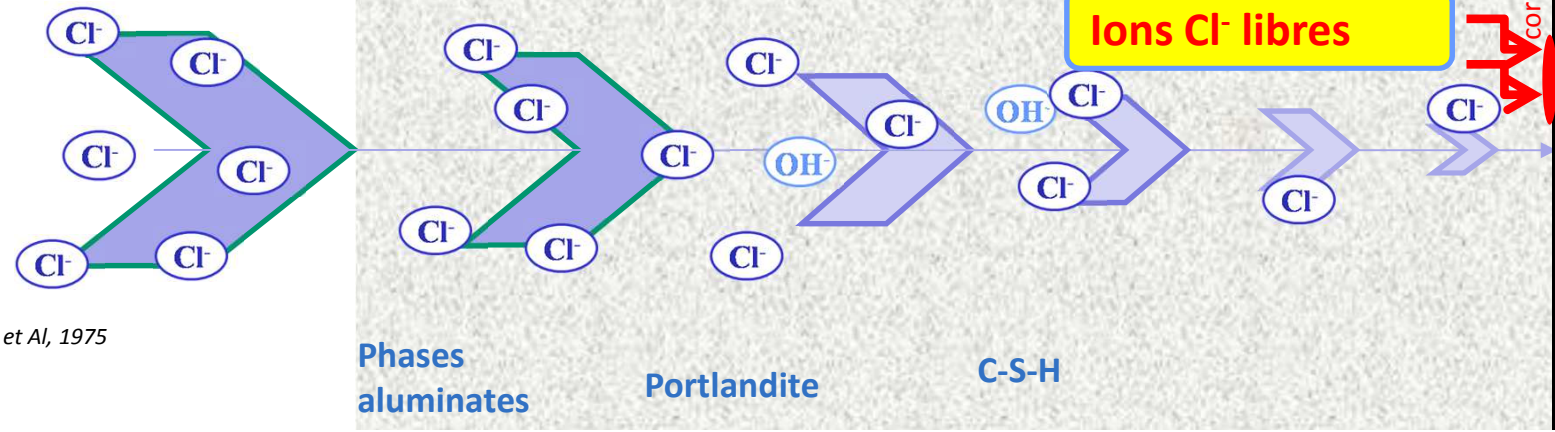
Précipitation/dissolution des phases

Interactions électrostatiques

Ions Cl^- libres

corrosion

Armature métallique



Regourd et Al, 1975

NEVILLE, 1995
NILSSON, 1996
CASTELOTTE, 2001
N Guyen, 2007

Béton

Formulation

- Liant : 400 kg/m^3

- Sable 0/4 mm : 770 kg/m^3 – x kg/m^3

(*sable 0/4 mm pour ajustement de la teneur en sulfates : mélange 50/50 en masse, de gypse et d'anhydrite préparés par concassage au laboratoire*)

- Gravillon 4/8 mm : 280 kg/m^3

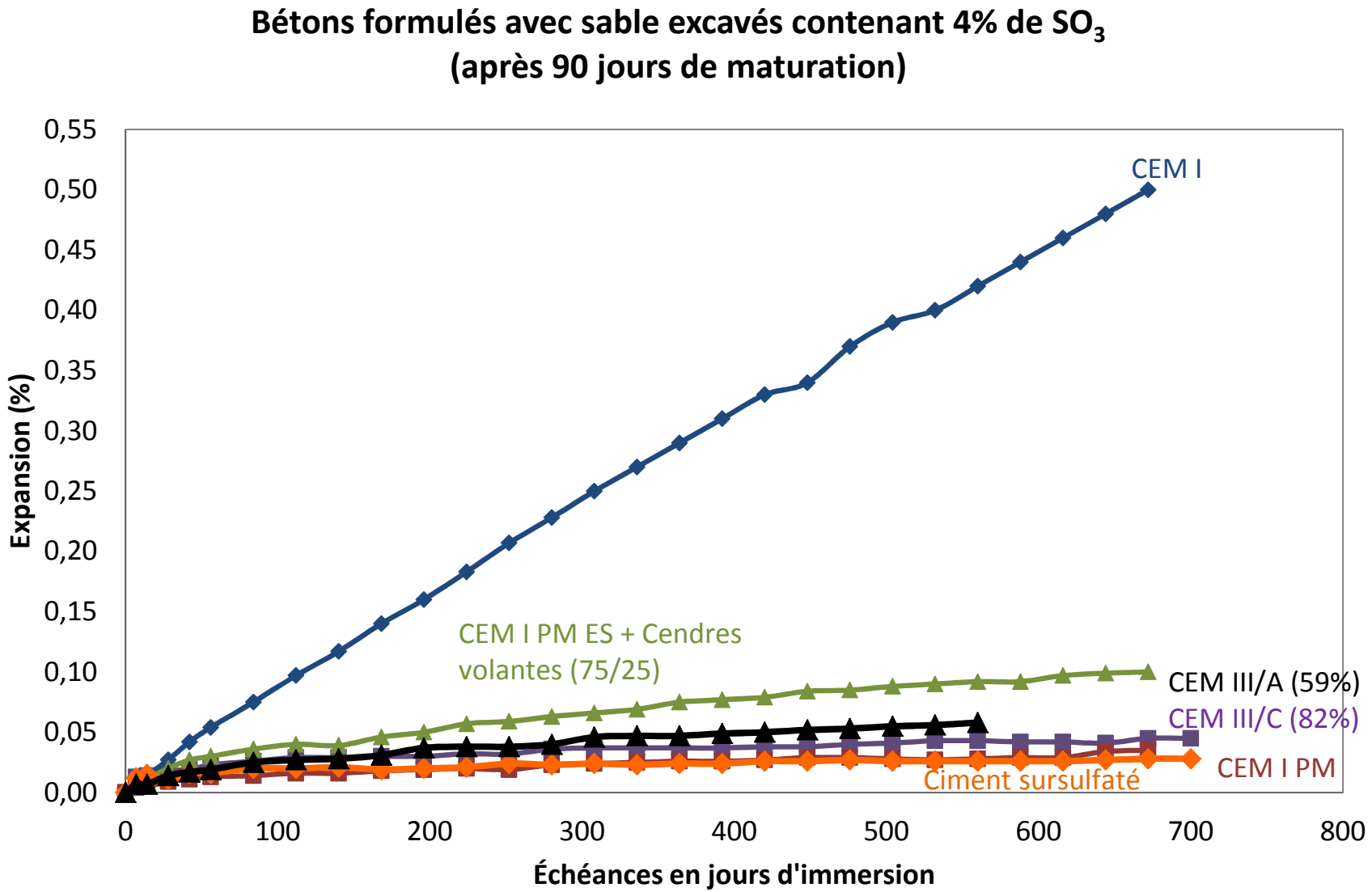
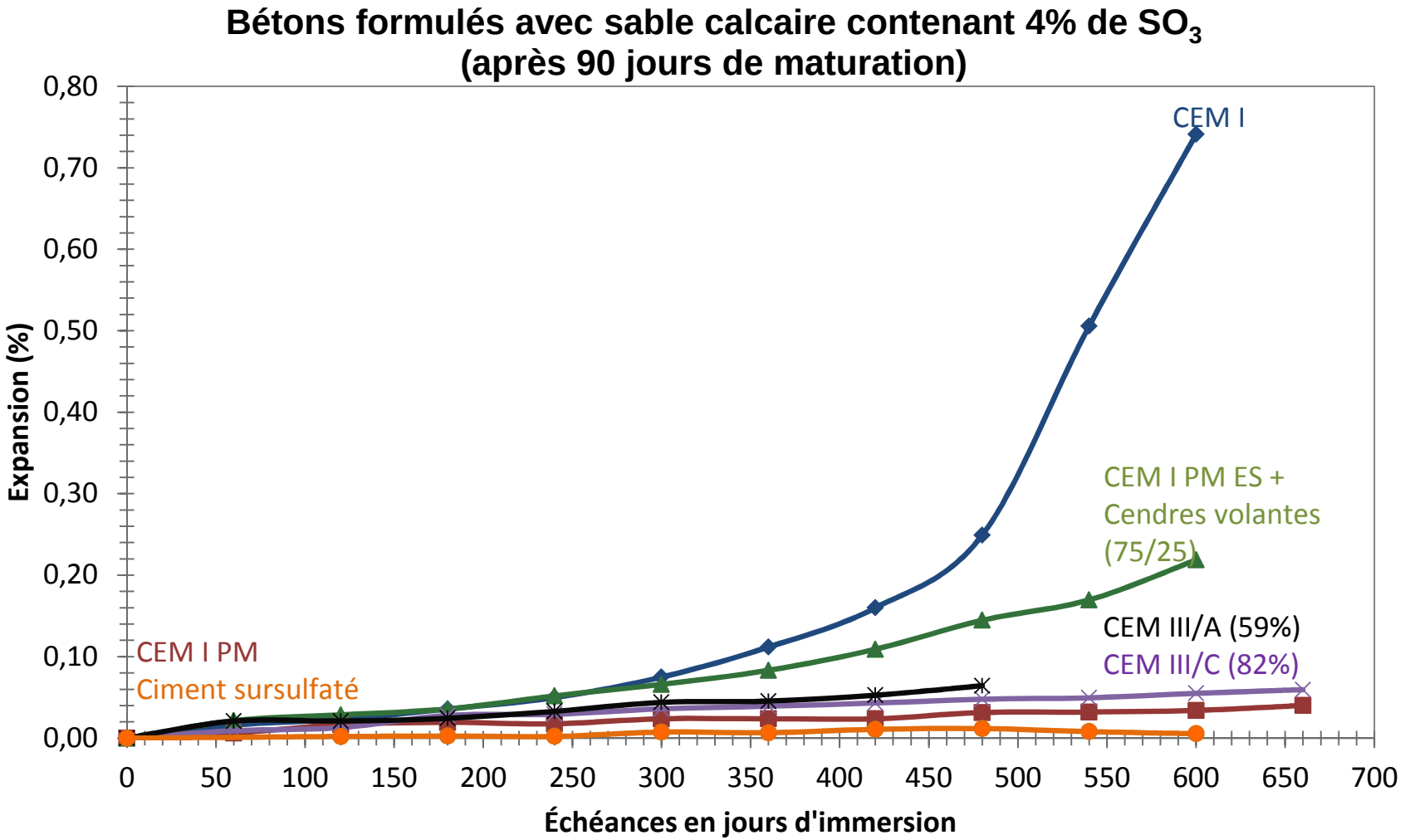
- Gravillon 8/16 mm : 700 kg/m^3

- Eau efficace : 192 kg/m^3

- Plastifiant / Réducteur d'eau - CIMPLAST Neo20 – AXIM

(*ajusté selon la nature du liant*)

Béton – Ettringite (LERM)



Béton – Thaumasite (Vicat)