



GC'2015

Paris, 18 et 19 mars

LES CO-PRODUITS DE L'ACIERIE INOX COMME GRANULATS DANS LE BETON

Gildas ADEGOLOYE, Anne-Lise BEAUCOUR,
Sophie ORTOLA, Albert NOUMOWE



UGITECH

Providing special steel solutions



SOMMAIRE

- ❑ Contexte de l'étude
 - Les laitiers sidérurgiques
 - Problématique, objectif et démarche
- ❑ Granulats de laitiers d'aciérie électrique inox
 - Processus de production
 - Caractérisation et conformité pour le béton
- ❑ Bétons de granulats de laitiers d'aciérie électrique inox
 - Formulations
 - Caractéristiques mécaniques
 - Indicateurs de durabilité et stabilité dimensionnelle
- ❑ Conclusions

✓ Qu'est-ce que le laitier ?

Laitiers (chaux + silice) = Coproduits de l'industrie sidérurgique



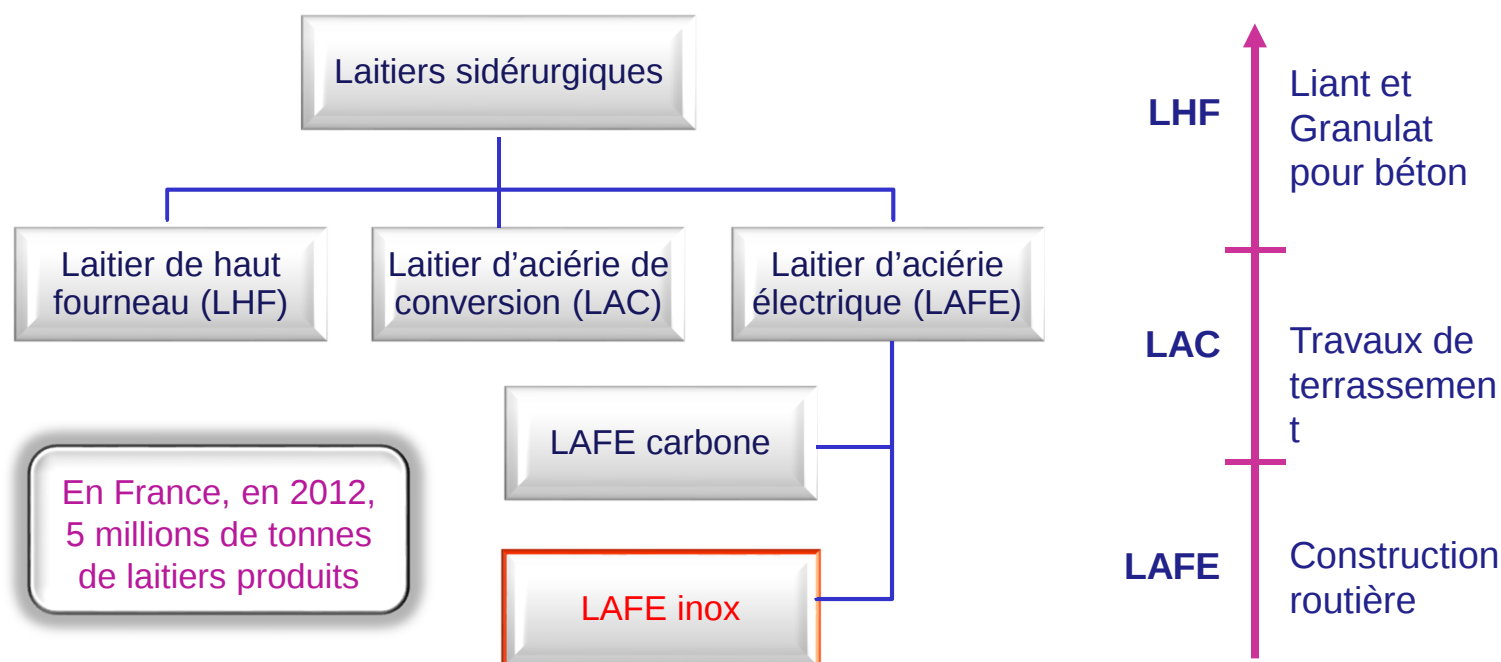
Acier = Fer + Carbone (< 2%)

Aciers carbonés ou
faiblement alliés
(teneur en Cr ≤
10,5%)

Aciers inoxydables ou
fortement alliés
(teneur en Cr > 10,5%)

L'utilisation de plus en plus croissante de l'acier génère une quantité considérable de laitiers

✓ Différents types de laitier et niveau de valorisation



Importance d'une valorisation régulière et nécessité d'autres voies de valorisation des LAFE (notamment LAFE inox)

CONTEXTE

GRANULATS DE LAE INOX

BETONS DE GRANULATS LAE INOX

CONCLUSIONS

Les Laitiers sidérurgiques

Problématique, objectif et démarche

Verrous industriels

✓ Problématiques

État de l'art

- Teneur en chrome
- Absence de norme ou de recommandation spécifique
- Stabilité des granulats de laitier (CaO libre, MgO libre, ...)
- Faisabilité de béton de structure
- Durabilité des bétons

- Quelques études sur la minéralogie du laitier LAFE inox
- Aucune étude sur les granulats de LAFE stabilisé
- Aucune étude sur leur utilisation comme granulats dans le béton

Contexte normatif :

EN 206 « Béton », EN 12620 « granulats pour béton » et NF P 18-545 « granulats »

« Pour les matériaux moins courants, des exigences complémentaires peuvent être définies dans des documents contractuels spécifiques » EN

12620

✓ Objectif et démarche

Caractérisation physique et minéralogique des granulats de laitiers
inox et leur influence sur les propriétés du béton

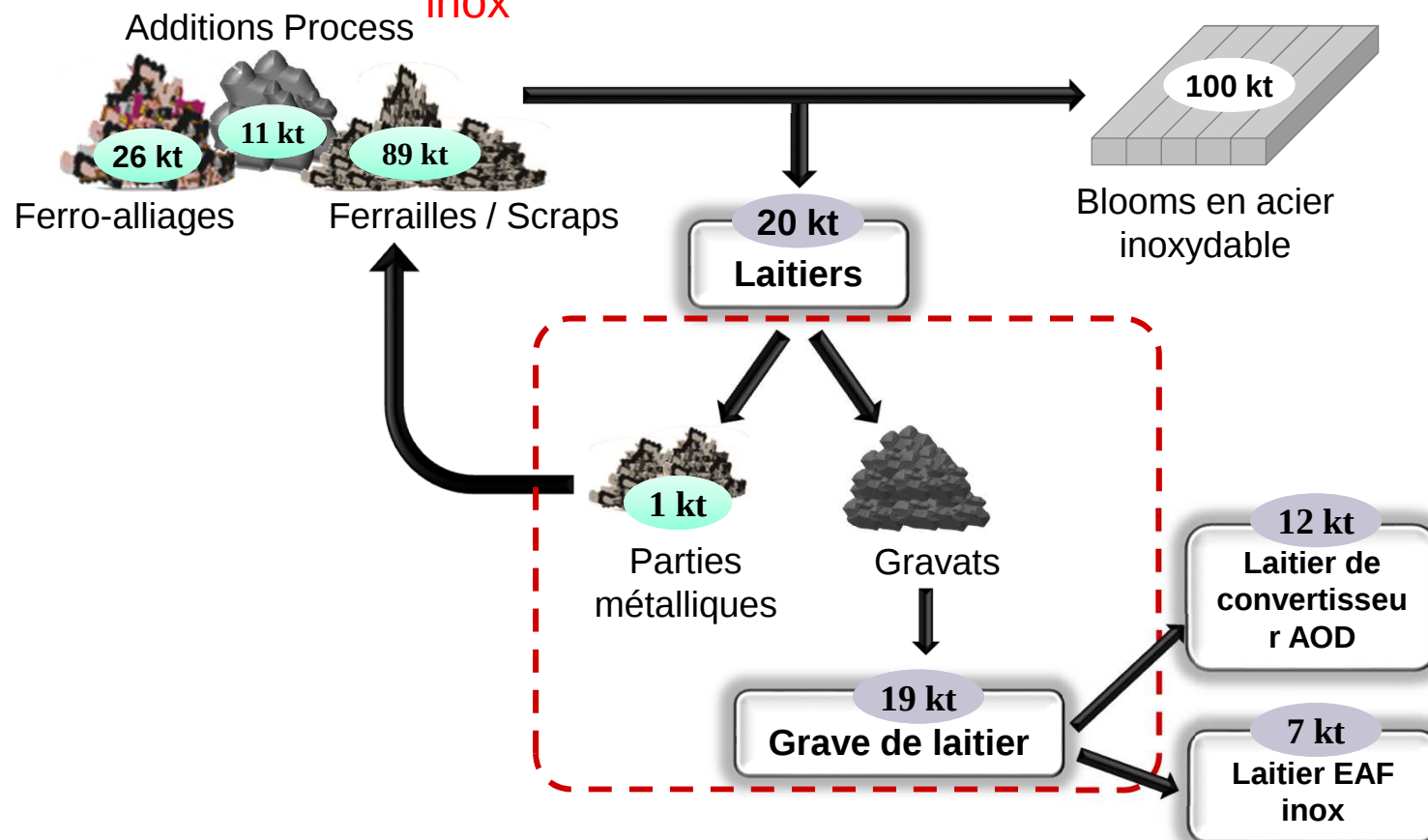
Démarche

- Compositions des granulats
- Conformité vis-à-vis des normes
- Réalisation des bétons de granulats LAE inox
- Performances physiques et mécaniques
- Indicateurs de durabilité et stabilité dimensionnelle

Finalités

- Valorisation régulière et pérenne (bâtiment = marché plus régulier)
- Préservation des ressources en granulats naturels
- Economie des coûts de stockage
- Disponibilité de ressources locales en granulats pour béton

✓ Différents types de laitier d'aciérie
inox



✓ Caractéristiques physiques et mécaniques

Concassés, surface rugueuse et aspect hétérogène (compact à caverneux)



Laitier de EAF inox
4/22,4
(couleur gris foncé)

	EAF inox	AOD stabilisé	Silico- calcaire
Densité réelle	2,79	2,83	2,46
Absorption d'eau (%)	2,6	3,0	1,7
Porosité (%)	7,2	8,4	4,2
Los Angeles (%)	23	16	30



Laitier AOD stabilisé
4/22,4
(couleur vert clair)
d'oxydes

- Plus résistants à la fragmentation que les granulats silico-calcaires
- Tenir compte de l'absorption d'eau dans les formulations de béton

✓ Caractéristiques chimiques

EN 1744-1, 3 échantillons par
granulat

Teneur (%)	Laitier EAF inox	Laitier AOD stabilisé	Recommandations EN 12620
Chlorure soluble dans l'eau (article 7)	0,0005	0,0020	$\leq 0,01$
Soufre total (article 11)	0,26	0,18	≤ 1
Sulfates solubles dans l'acide (article 12)	0,02	0,21	$\leq 0,8$
CaO libre (article 18)	0,07	0,07	-

- Pas de perturbation de la prise et risque limité de corrosion des armatures
- Risques limités de formation d'ettringite et de détérioration des parements de béton (tache de rouille ou éclatement superficiel)
- Pas de risque de gonflement dû aux sulfates
- CaO libre (EAF inox et AOD stabilisé) < CaO libre LAC (4 à 10%)

✓ Autres
caractéristiques

Aplatissement

Pas pertinent pour les
granulats de laitier
concassés

Impuretés prohibées

Pas d'impuretés prohibées
dans les granulats de laitier

Éléments coquilliers

Les granulats de laitier ne
sont pas d'origine marine

Boulettes d'argile

Pas de boulettes d'argile
dans les granulats de laitier

Alcali-réaction

Bonne cristallisation des granulats
Risque limité d'alcali silice

Phases minérales expansives

Absence de CaO libre au DRX et au
MEB-EDX; Quantité minoritaire de
MgO libre dans le laitier AOD

Désintégration de silicate bicalcique

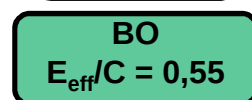
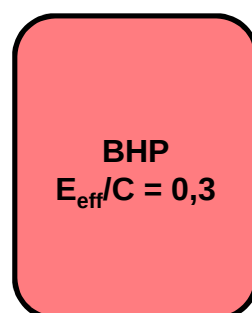
Absence de gamma silicate
bicalcique (si laitier stabilisé)

Les granulats de laitiers EAF inox et AOD stabilisé satisfont aux critères de la
norme EN 12620 vérifiés dans cette étude

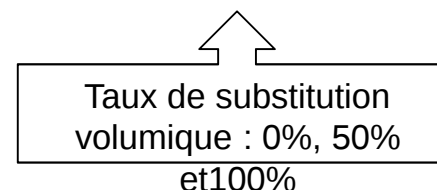
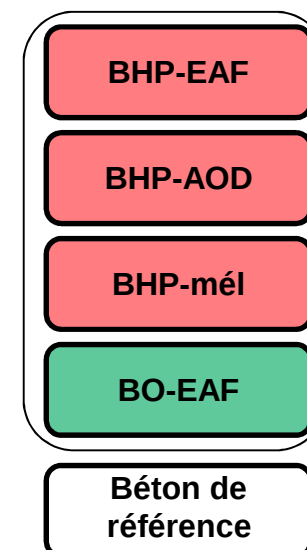
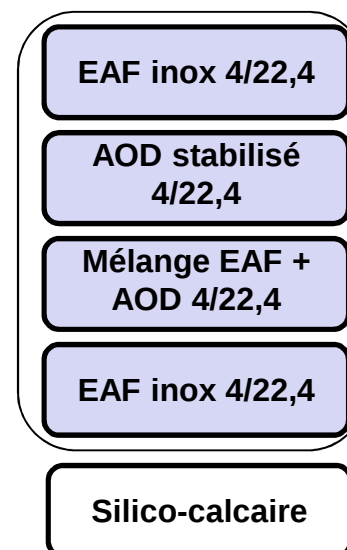
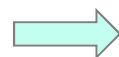
Seront à compléter : sensibilité au gel et dégel (EN 1367-1) alcali-réaction
(EN 18-454)

CONTEXTE	GRANULATS DE LAE INOX	BETONS DE GRANULATS LAE INOX	CONCLUSIONS
Formulation	Propriétés mécaniques	Durabilité et stabilité	

✓ Composition des bétons



CEM I 52,5N



10 formulations au total

Intérêts BHP

- Meilleure résistance mécanique de la matrice cimentaire
- Faciès de rupture trans-granulaires
- Mise en évidence du rôle des granulats

Intérêts BO

- Comparaison aux bétons courants
- Confirmer ou infirmer les résultats des BHP

✓ Résistances en compression et en traction à 28 jours (BHP)

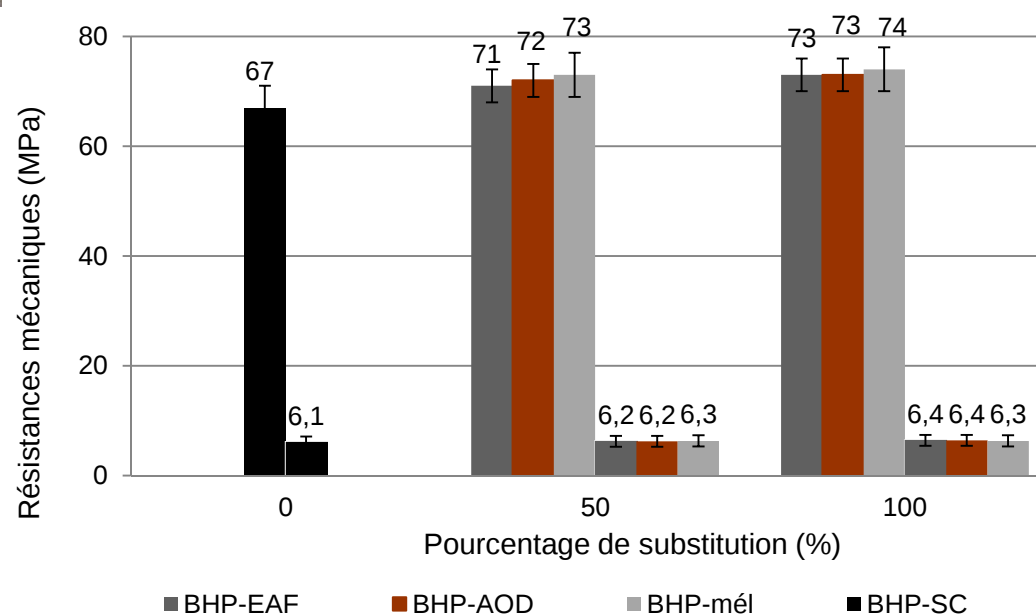


Essai de
compression

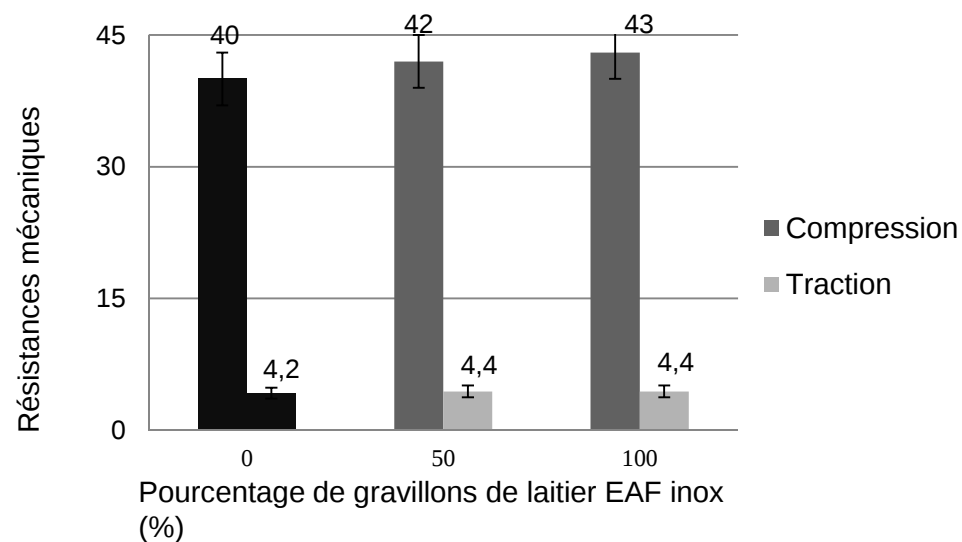
- Normes NF EN 12390-2 et NF EN 12390-3
- 6 éprouvettes 16x32 cm par formulation étudiée
- Taux de chargement 0,5 MPa/s



Essai de
traction par
fendage



✓ Résistances en compression et en traction à 28 jours (BO)



- Légère augmentation des résistances en compression : 9 % pour BHP et 7,5 % pour BO
- Faible augmentation des résistances en traction
- Augmentations dues à la résistance ($LA \leq 25$) et à la surface rugueuse et poreuse des granulats de laitier

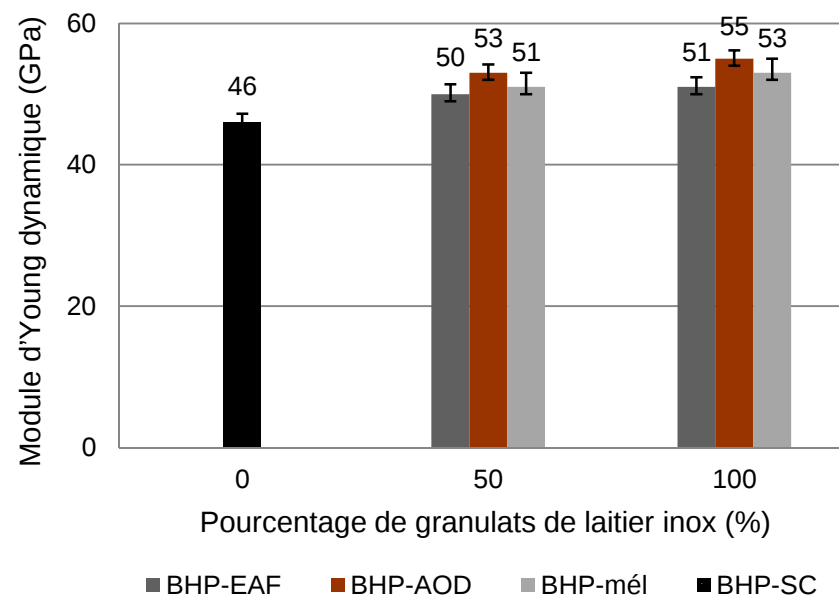
CONTEXTE	GRANULATS DE LAE INOX	BETONS DE GRANULATS LAE INOX	CONCLUSIONS
Formulation	Propriétés mécaniques		Durabilité et stabilité

✓ Module d'Young à 28 jours (BHP)

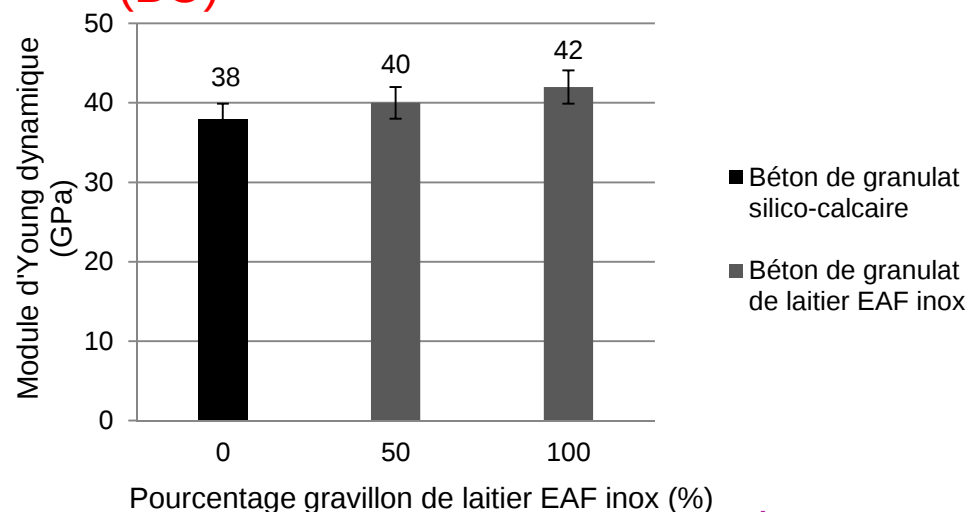
- Mesures ultrasoniques inspirées de EN 12504-4
- 3 éprouvettes cylindriques 15 x 10 cm par formulation et par âge
- Etuvage des disques à 80°C pendant 30 jours
- Impulsion vibratoire (temps de propagation)



Mesures ultrasoniques



✓ Module d'Young à 28 jours (BO)



Les bétons de granulats de laitier sont plus rigides que les bétons de granulats silico-calcaires

- Gain de 10% pour les bétons de granulats 100% laitier de EAF inox, de 20% pour les bétons de granulats 100 % laitier AOD stabilisé et 15 % pour le mélange EAF + AOD
- Augmentation due au module d'Young des granulats de laitier

CONTEXTE	GRANULATS DE LAE INOX	BETONS DE GRANULATS LAE INOX	CONCLUSIONS
Formulation	Propriétés mécaniques	Durabilité et stabilité	

✓ **Indicateur de durabilité : porosité accessible à l'eau**

- Porosimétrie par pesée hydrostatique (AFPC-AFREM)
- 9 échantillons par béton et par âge

BHP		SC	EAF50	EAF100	AOD50	AOD100	mél50	mél100
Porosité (%)	Moyenn e	9,9	10,9	12,4	11,1	12,1	11,1	12,4
	Écart-type	0,52	0,71	0,29	0,47	0,38	0,67	0,63

- Porosité supérieure à celle des bétons de granulats silico-calcaires

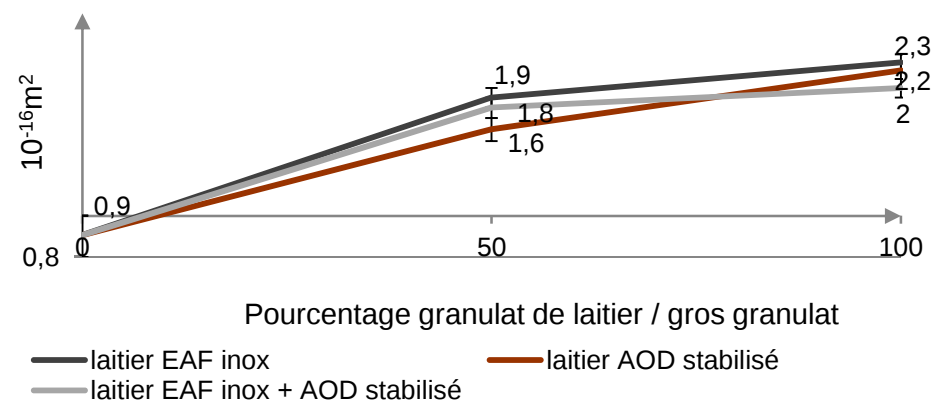
- Porosité convenable pour des classes d'environnement courantes
- Porosité intéressante vis-à-vis des propriétés thermiques

✓ Indicateur de durabilité : perméabilité au gaz

- Recommandations AFPC-AFREM
- 3 disques 5 x 15 cm par formulation étudiée, étuvage à 80°C pendant 30 jours
- Injection d'azote dans le disque et régime permanent
- Perméabilités apparentes (1 à 3 bars)

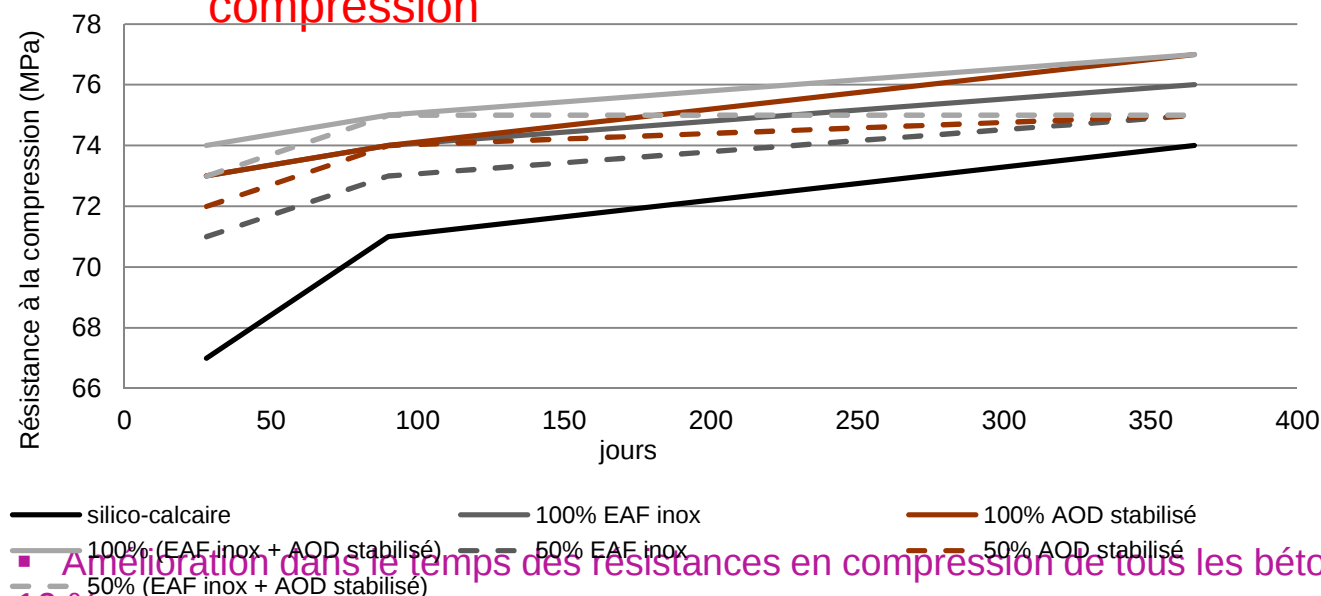


Mesure de la perméabilité



- Perméabilité supérieure à celle des bétons de granulats silico-calcaires
- Bétons plus sensibles à la pénétration d'agents agressifs et aux cycles de gel-dégel
- Perméabilité convenable aux classes d'environnement courantes

✓ Suivi dans le temps de la résistance en compression



Amélioration dans le temps des résistances en compression de tous les bétons : 10 %

pour les BHP-SC, 4 à 5 % pour les BHP de granulats de LAE inox entre 28 et 365 jours

- Pas de chute de résistances en compression due à d'éventuelles réactions chimiques provoquées par les granulats de laitier inox

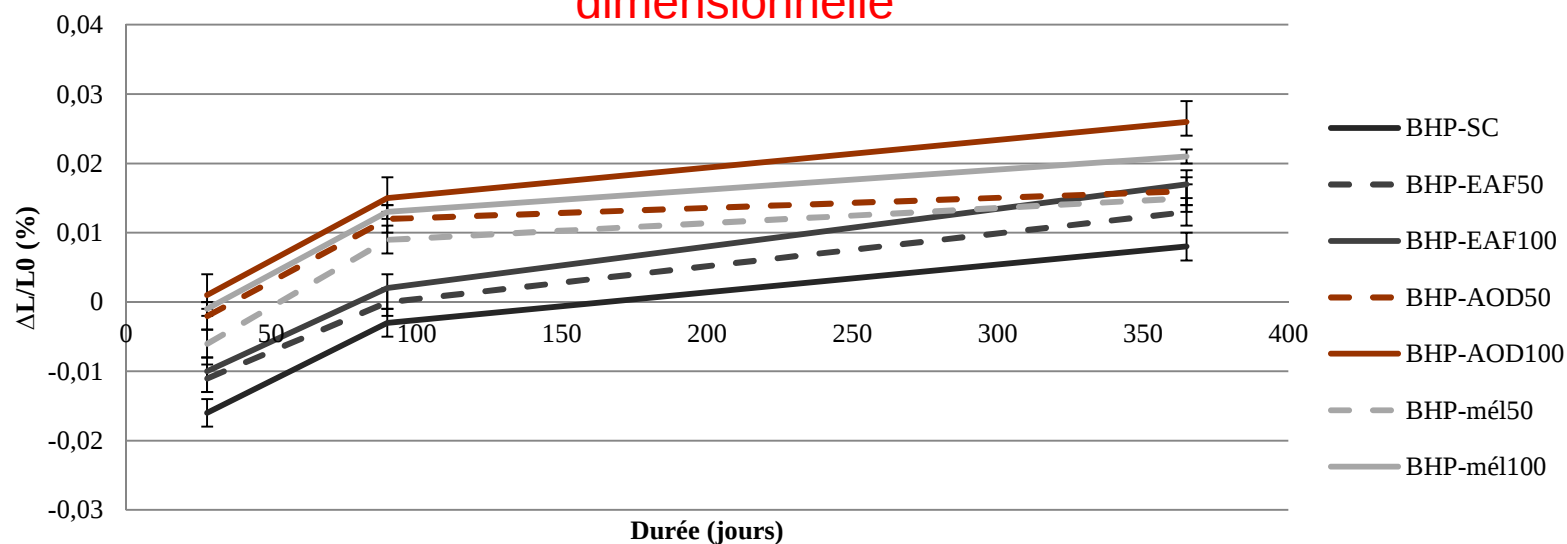
✓ Stabilité
dimensionnelle



Mesure de
gonflement

- 3 éprouvettes 7 x 7 x 28 cm conservées dans l'eau à 20°C
- 24 mesures par éprouvette et par échéance (28, 90 et 365 jours)
- Vérification des variations de masse aux mêmes échéances

✓ Stabilité
dimensionnelle



- Retrait d'auto-dessiccation entre 24h et 28 jours pour les bétons de granulats silico-calcaires et les bétons de granulats EAF inox
- Retrait non observé pour les bétons de granulats AOD stabilisé
- Gonflement à 365 jours des bétons de granulats de laitier supérieur à celui des bétons de granulats silico-calcaires
- Les différences de comportements entre les bétons se produisent avant 28 jours

✓ Conclusions

Granulats de LAE
inox plus denses, plus
rigides et plus
résistants

- Augmentation de 7 à 9 % des résistances en compression des bétons
- Augmentation de 10 à 20 % du module d'Young des bétons

Porosité et coefficient
d'absorption d'eau
plus élevés des
granulats LAE inox

- Bétons légèrement plus poreux, plus perméables et plus sensible à la pénétration d'agents agressifs
- Intéressant pour les propriétés thermiques

Faibles teneurs en
CaO libre et MgO
libre dans les
granulats AOD
stabilisé

- Léger gonflement des bétons à 365 jours
- Compensation du retrait d'auto-dessiccation des bétons

Merci de votre attention

gildas.adegoloye@u-cergy.fr