

---

# Quels autres matériaux peut-on utiliser pour faire du béton?

## Les additions / SCMs

---

Prof. Karen Scrivener  
Laboratoire des Matériaux de Construction

# Sommaire

---

1. Pourquoi substituer le Ciment Portland?
2. Propriétés nécessaires
3. Les matériaux hydrauliques
4. Les matériaux pouzzolans
5. Les « fillers »
6. Les ciments ternaires
7. Effet sur les performances du béton
8. Exemples d'utilisation
9. L'essentiel

# 1. Pourquoi substituer le Ciment Portland?

---

- Aspect écologique
- Aspect économique
- Aspect performances: (mechanique) **durabilité**

# Effet sur les performances du béton

---

L'addition de matériaux remplaçant le ciment Portland permet d'avoir de **nouvelles propriétés** de béton.

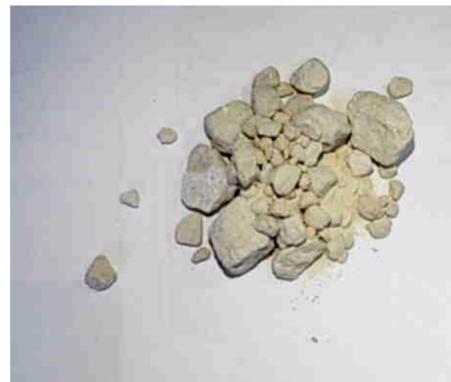
Parmi celles-ci:

- Masse volumique plus faible
- Chaleur dégagée plus faible
- Réaction plus lente, décoffrage plus tardif
- Porosité réduite
- Résistance mécanique plus élevée à long terme
- Meilleure durabilité

# 1. Pourquoi substituer le Ciment Portland?

---

Additions au clinker lors du broyage:



Clinker

+

Régulateur  
de prise  
(Gypse)

+

Additions

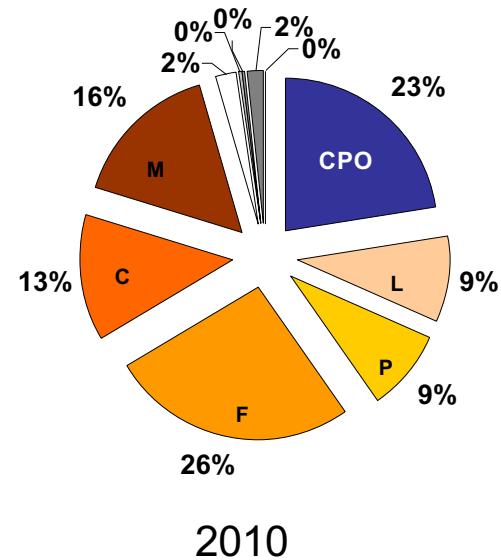
# 1 Melanges fait en usine

Laitier	Indicates the main type of cement:
Fumée de silice	CEM I = Portland cement
Pouzzolane (non calcinée)	CEM II = Portland-composite cement
Pouzzolane calcinée	CEM III = blast furnace cement
cendres volantes (silice éléée)	CEM IV = pozzolanic cement
Cendres volants (chaux élevée)	CEM V = composite cement
Calcaire	Indicates the level of constituents: A = low / B = medium / C= high
Schistes calcinées	Indicates the type of constituent: - S = ground granulated blast furnace slag - D = silica fume - P = natural pozzolana - Q = natural calcined pozzolana - V = siliceous fly ash - W = calcareous fly ash - L/LL = limestone - T = burnt shale - M = more than one constituent
	Indicates strength class (32.5 / 42.5 / 52.5)
	N for normal early strength
	R for rapid early strength

Example:

# 1. Pourquoi substituer le Ciment Portland?

Types de ciments produits par Holcim



En suisse

Type de ciment	Livraison 2018 (source: cemsuisse)
CEM II / A-LL 42.5N	32%
CEM II / B-M(T-LL) 42.5N (Optimo)	57.7%
CEM I 42.5 N (Normo 4)	
CEM I 52.5R (Normo 5)	7.6%

- Ciment Portland Ordinaire
- L Ciment au laitier
- P Ciment pouzzolanique
- F Ciment aux cendres volantes
- C Ciment au calcaire
- M Ciments composés
- Ciment de maçonnerie
- Cement pour puits pétroliers
- Cement blanc
- Liants spéciaux
- MIC & autres matériaux cimentaires

Source, Holcim

# 1. Pourquoi substituer le Ciment Portland?

Addition au béton lors du malaxage en centrale:



## 2. Les propriétés nécessaires

---

Les matériaux qui substituent le ciment Portland sont appelés “**additions**”

Il y a 2 grandes catégories:

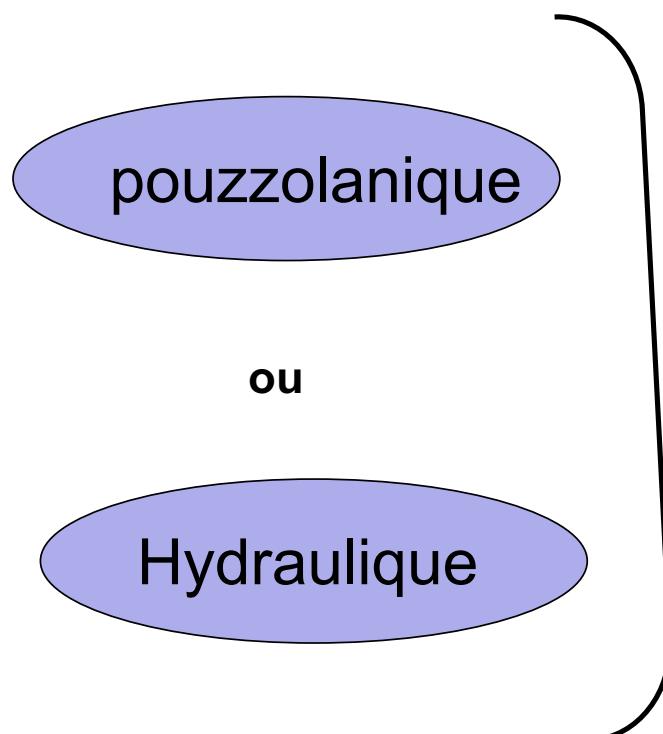
- Les additions **réactives** : en anglais
- Les additions **non-réactives (fillers)**

Dans les deux cas, les additions doivent compenser en résistance la réduction de Ciment Portland

## 2. Les propriétés nécessaires

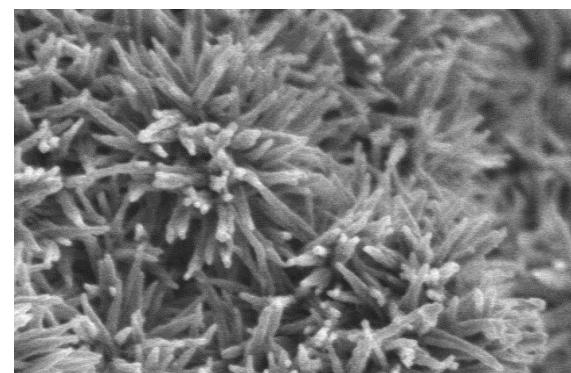
---

Les additions **réactives** - SN EN 206-1 type II



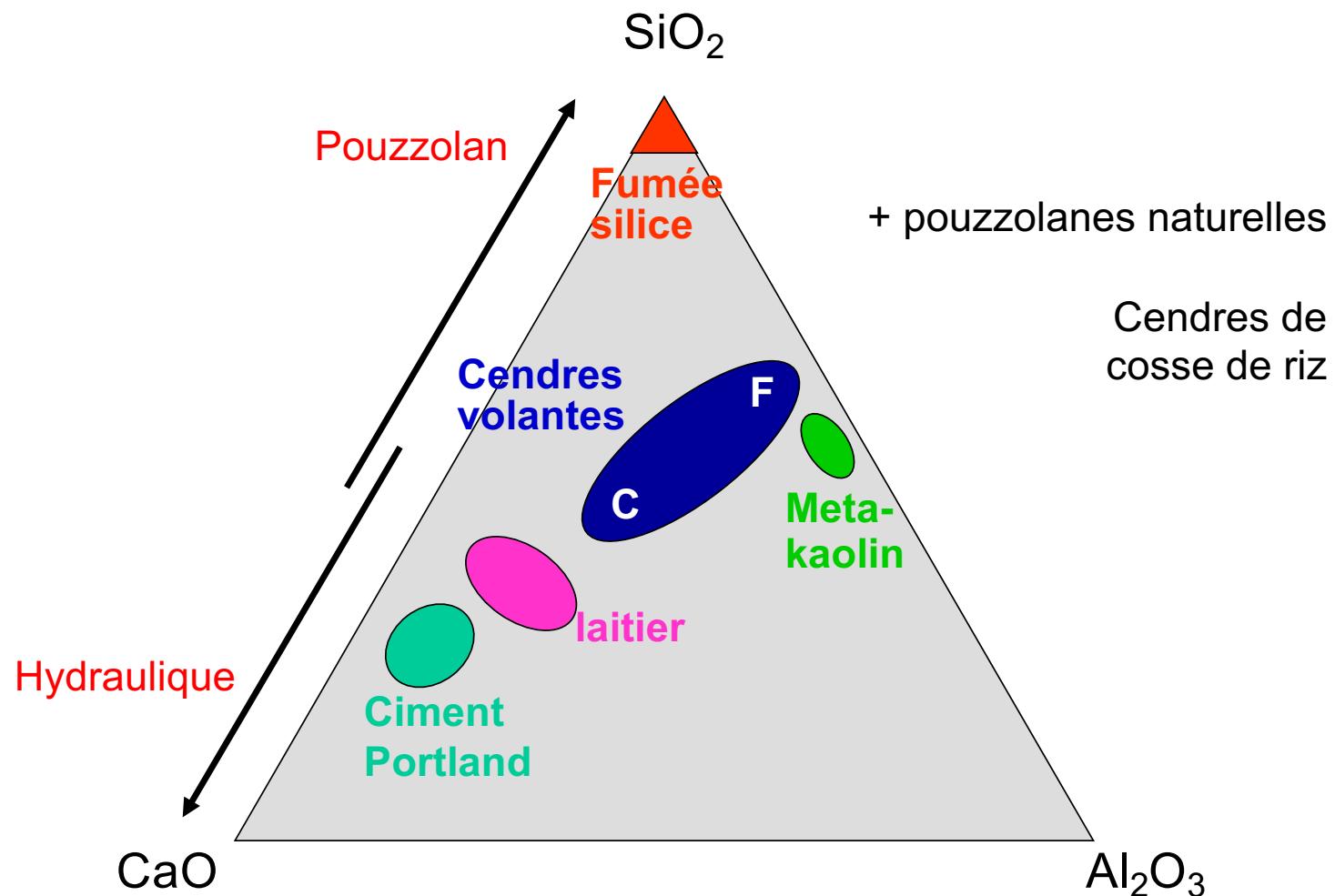
Réagissent et forment du  
**C-S-H**

= comme le ciment Portland  
mais plus lentement



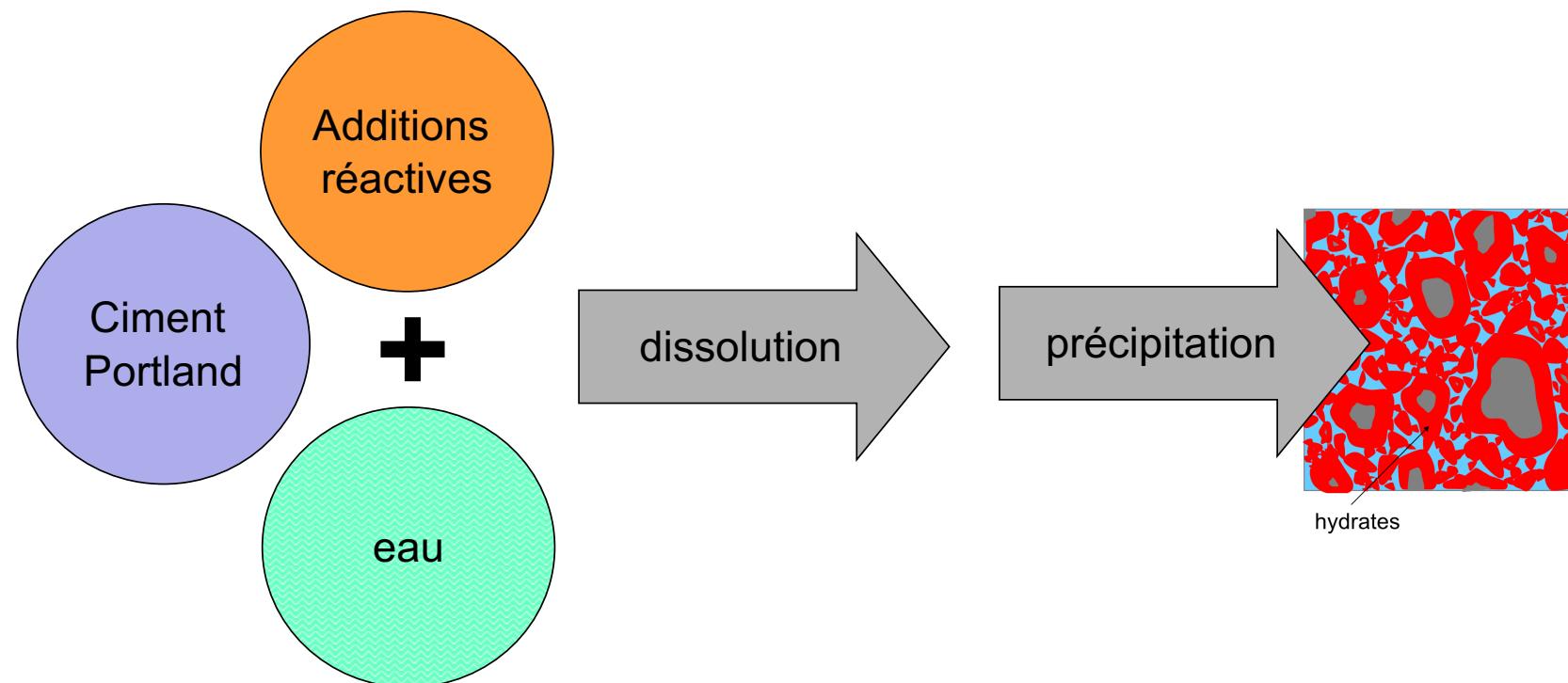
**Calcium Silicate Hydrates**

## 2. Les propriétés nécessaires

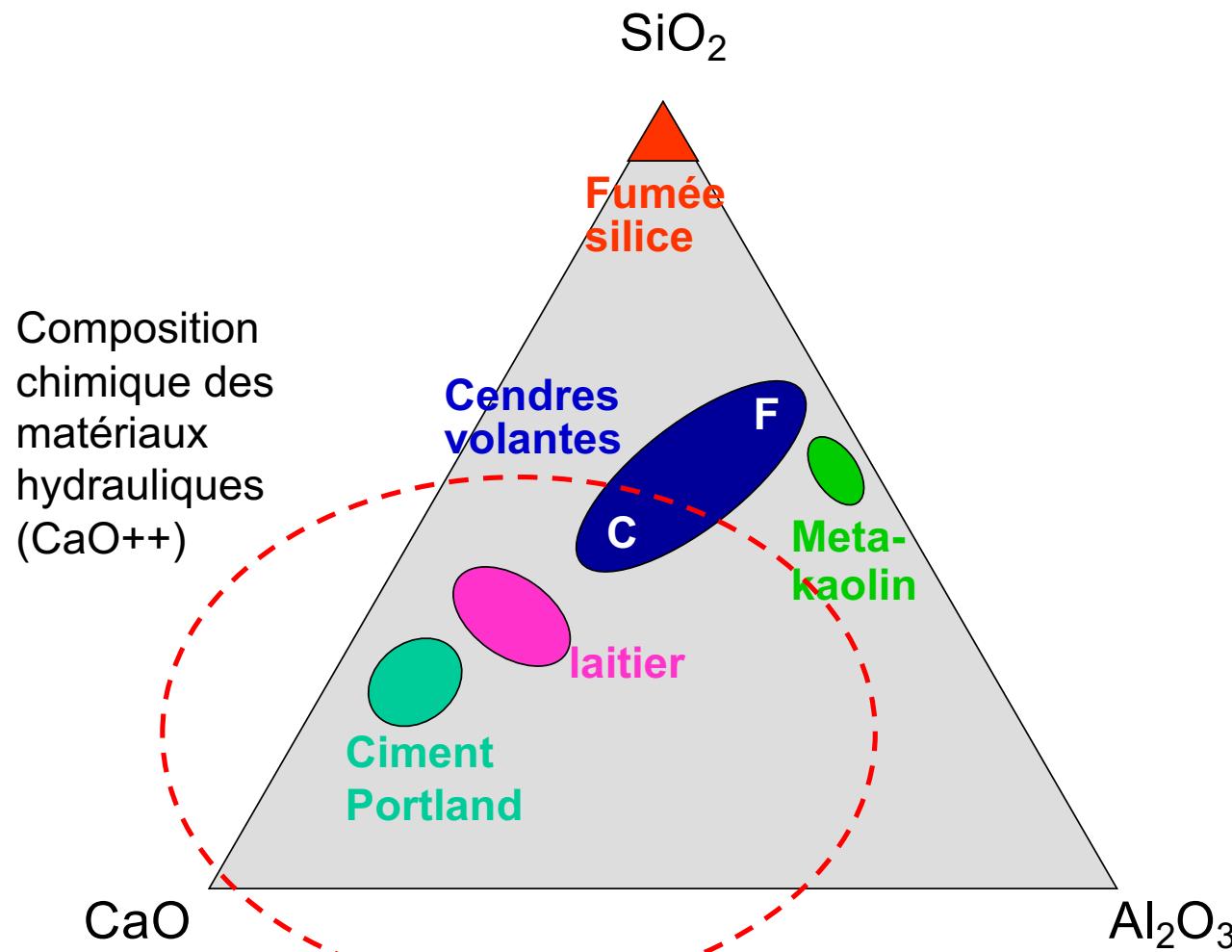


## 2. Les propriétés nécessaires

---



### 3. Les matériaux hydrauliques



13

13

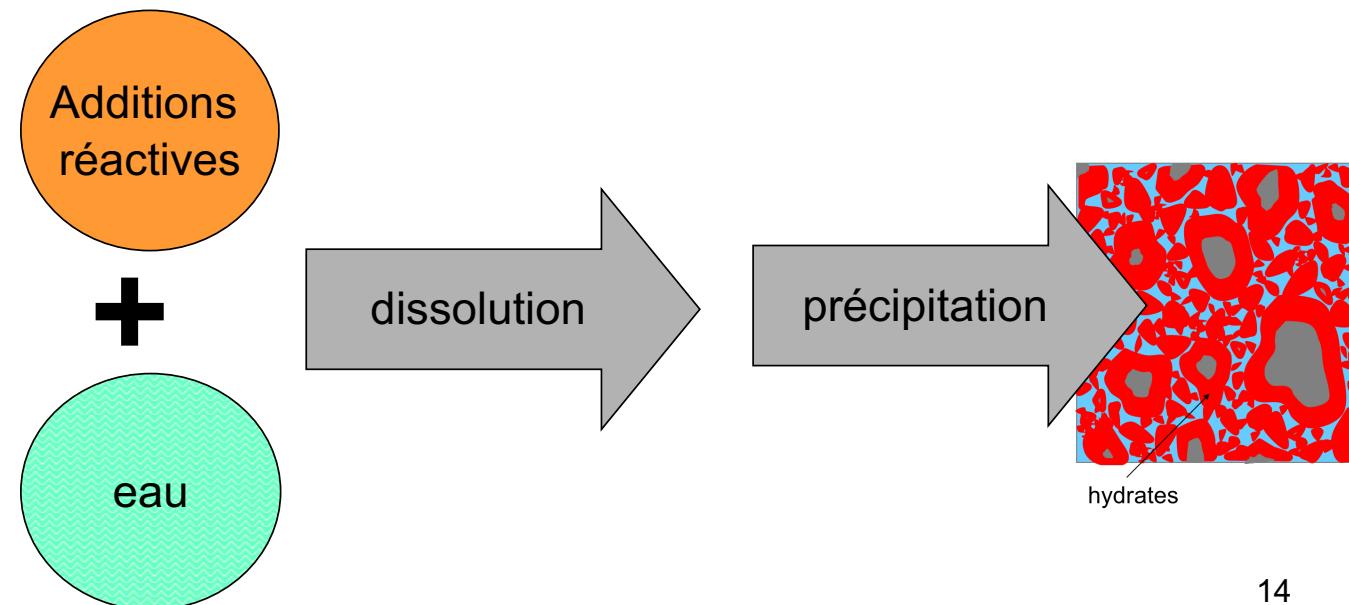
### 3. Les matériaux hydrauliques

---

Réaction **hydraulique**:

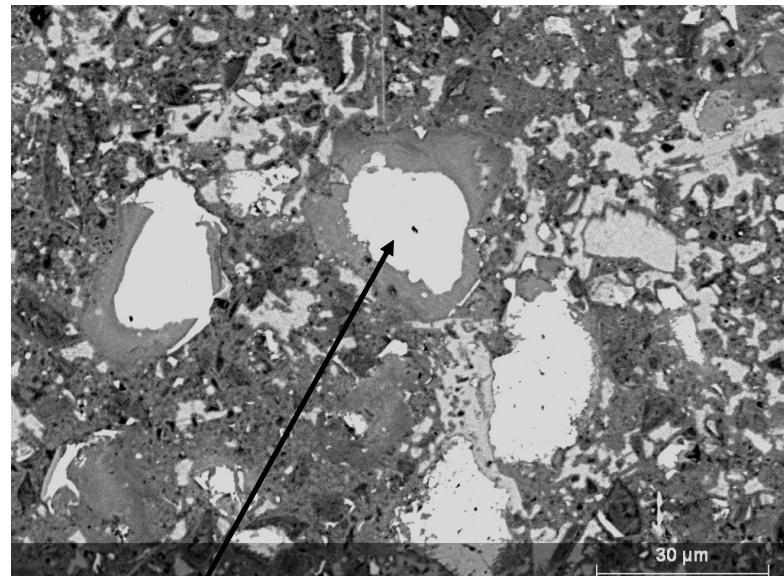
Addition réagit avec l'eau pour former des hydrates

Le ciment est un matériau hydraulique



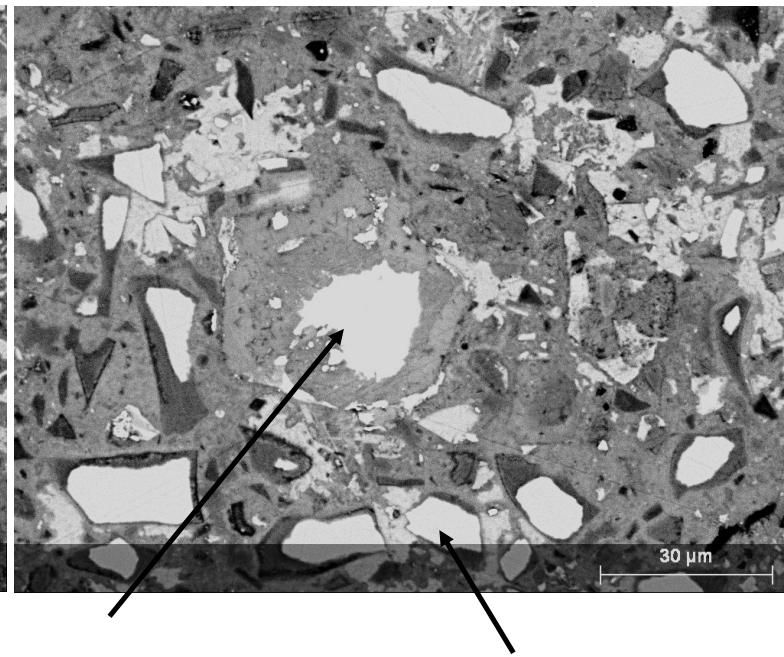
### 3. Les matériaux hydrauliques

100% Cement Portland  
hydraté



Grain de ciment  
hydraté

60% Cement Portland  
+ 40% addition hydrauliques  
hydraté 1an



Grain de ciment  
hydraté

Additions  
hydrauliques

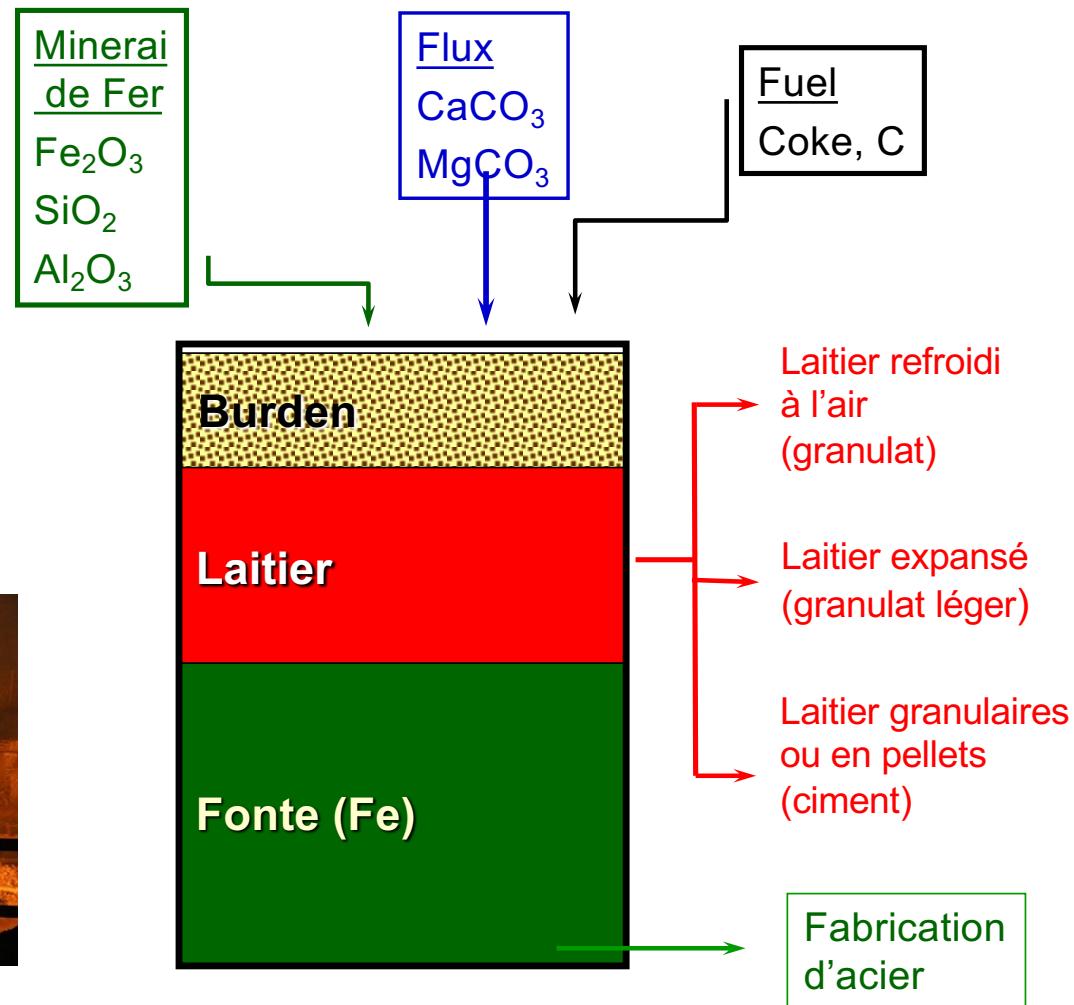
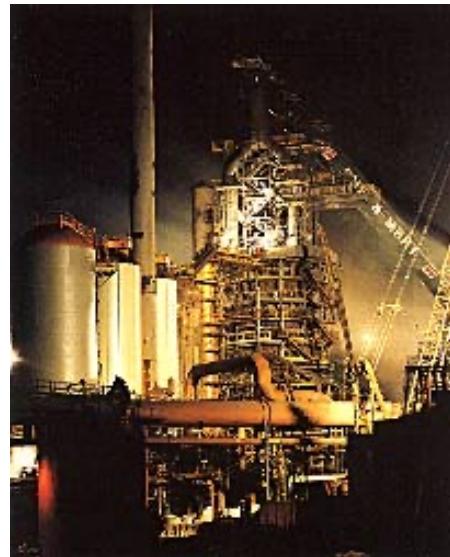
### 3. Les matériaux hydrauliques

---

Exemple de matériau hydraulique utilisé aujourd'hui dans le ciment:

Le Laitier de haut fourneau

### 3.1. Laitier de haut fourneau

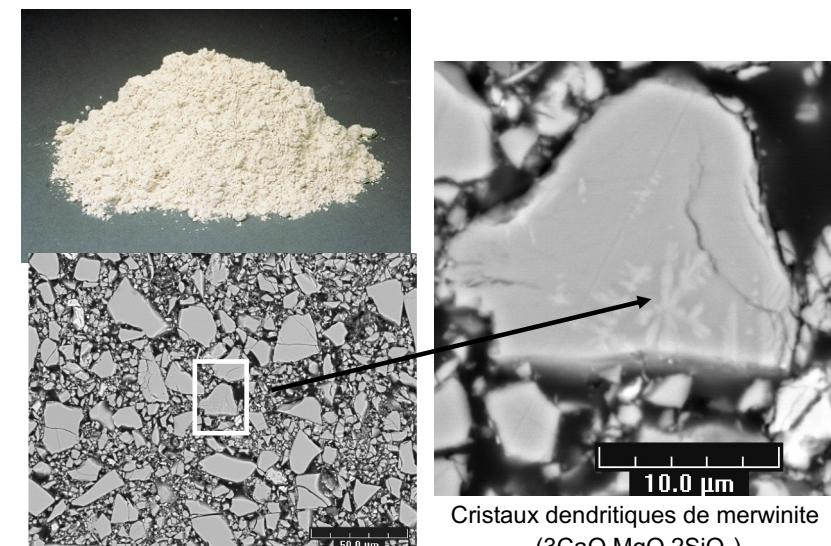
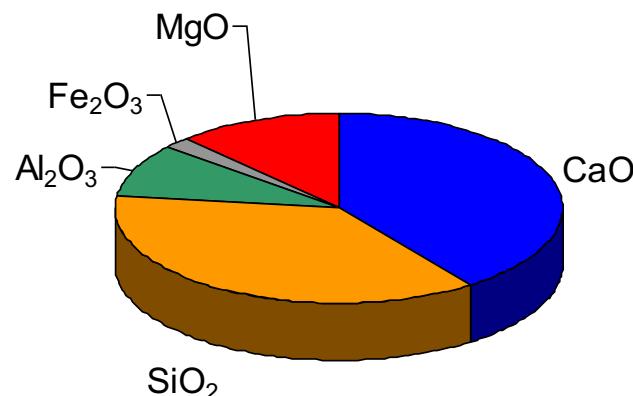


## 3.1. Laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau granulé moulu (Ground Granulated Blast-Furnace Slag ou GGBS) est un matériau vitreux, sous-produit formé par les scories fondues produites dans les hauts fourneaux pour la production de fer utilisé servant à la fabrication de l'acier.

Le laitier rapidement refroidi a typiquement des propriétés **hydrauliques latentes**

Quand le laitier est moulé, il donne une poudre de forme **angulaire et irrégulière**



Composition chimique typique

### 3.1. Laitier de haut fourneau

---

Dû à sa forte teneur en CaO le laitier n'est pas un pouzzolane

Il est lentement hydraulique  
(réagit avec l'eau pour former des hydrates similaires au ciment)

La vitesse de réaction est augmentée (**activée**) par  
la chaux ou les alcalis  
Donc aussi le ciment qui contient ses éléments

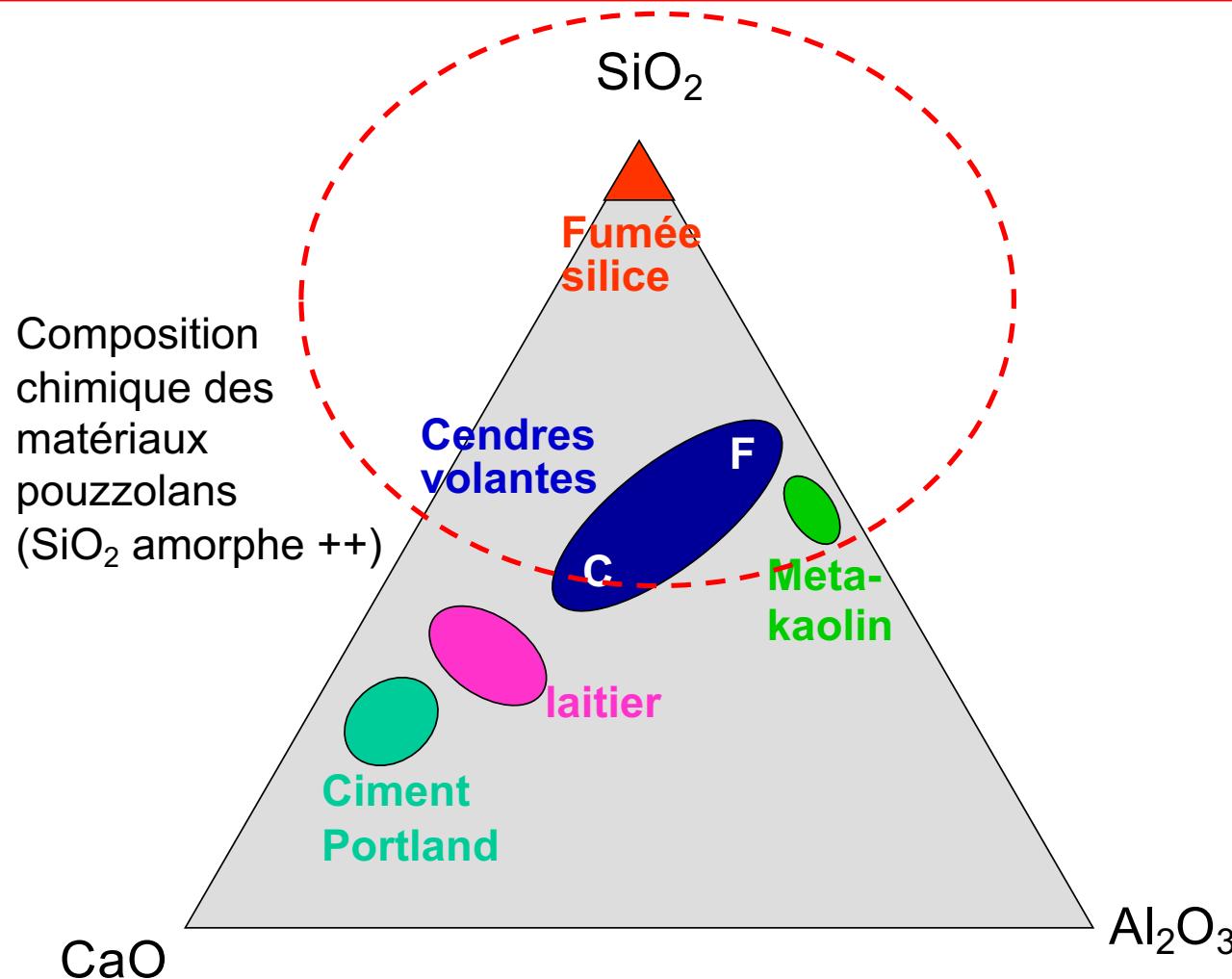
### 3.1. Laitier de haut fourneau

Type	Désignation Ciment	Notation	Composition en % massique		
			Principaux		Secondaire
			Clinker	Ajout	
I	Portland	I	95-100	0	0-5
II	Portland au laitier	II / A-S	80-94	6-20	0-5
		II / B-S	65-79	21-35	0-5
	Portland à la F.S.	II / A-D	90-94	6-10	0-5
	Portland au calcaire	II / A-L	80-94	6-20	0-5
	... etc	II / B-L	65-79	21-35	0-5
III	Ciment de haut fourneau	III / A	35-64	36-65	0-5
		III / B	20-34	66-80	0-5
		III / C	5-19	81-95	0-5
IV	Ciment pouzzolaniqu e	IV / A	65-89	11-35	0-5
		IV / B	45-64	36-55	0-5
V	Ciment composé (*)	V / A	40-64	36-60	0-5
		V / B	20-39	61-80	0-5

30-95%  
de  
substitution

### 3. Les pouzzolans

---



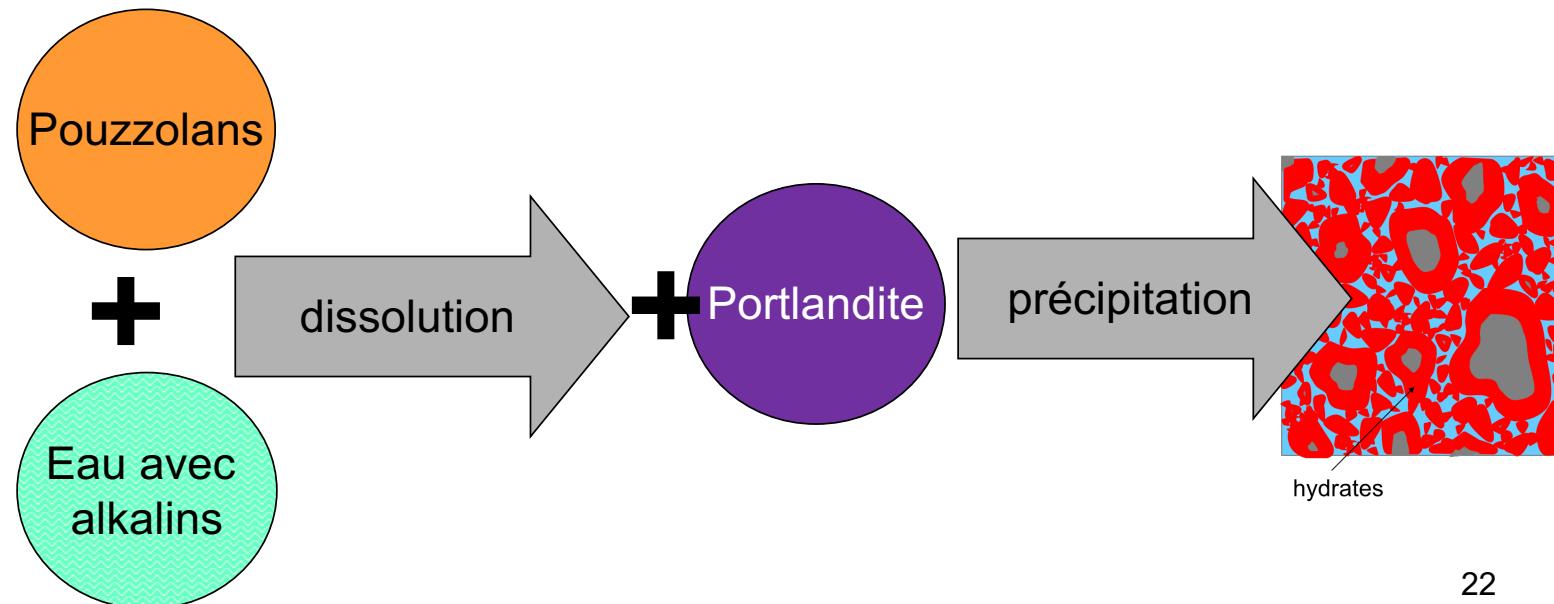
### 3. Les pouzzolans

---

Réaction pouzzolanique:



La réaction pouzzolanique consomme la Portlandite  $\text{Ca(OH)}_2$  contrairement à l'hydratation du ciment Portland qui en libère



## 4. Les pouzzolans

---

Réaction pouzzolanique:



Dissolution

Précipitation

## 4. Les pouzzolans

---

Tous les pouzzolans n'ont pas la même réactivité

→ Tests de réactivité:

- Test mécanique:
  - Test de compression (Strength Activity Index)
- Test chimique:
  - Test Chapelle
  - Frattiniti test
  - Consommation de la Portlandite en fonction du temps
  - **R3 (ASTM C1897)**

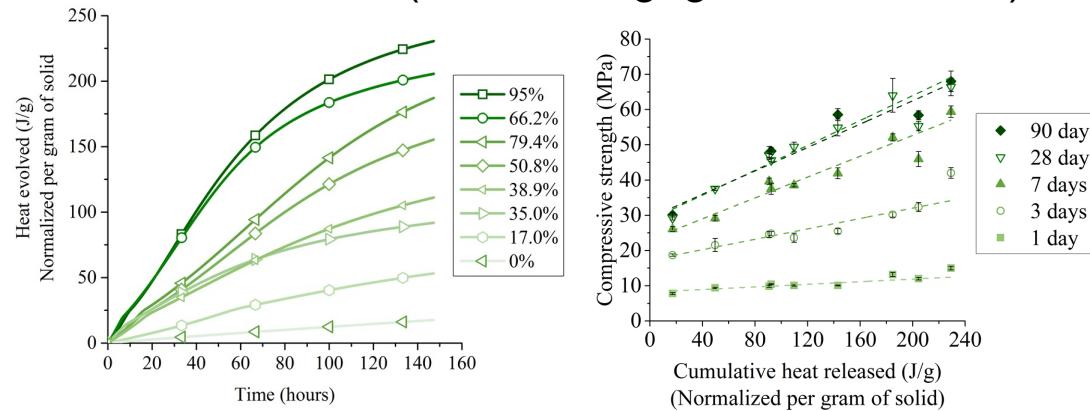
## 4. Les pouzzolans

Tous les pouzzolans n'ont pas la même réactivité

→ Dernier test de réactivité chimique de pouzzolanicité  
R3: ASTM C1897

Mélange de  
Portlandite / Matériaux Pouzzolan (+Calcaire)

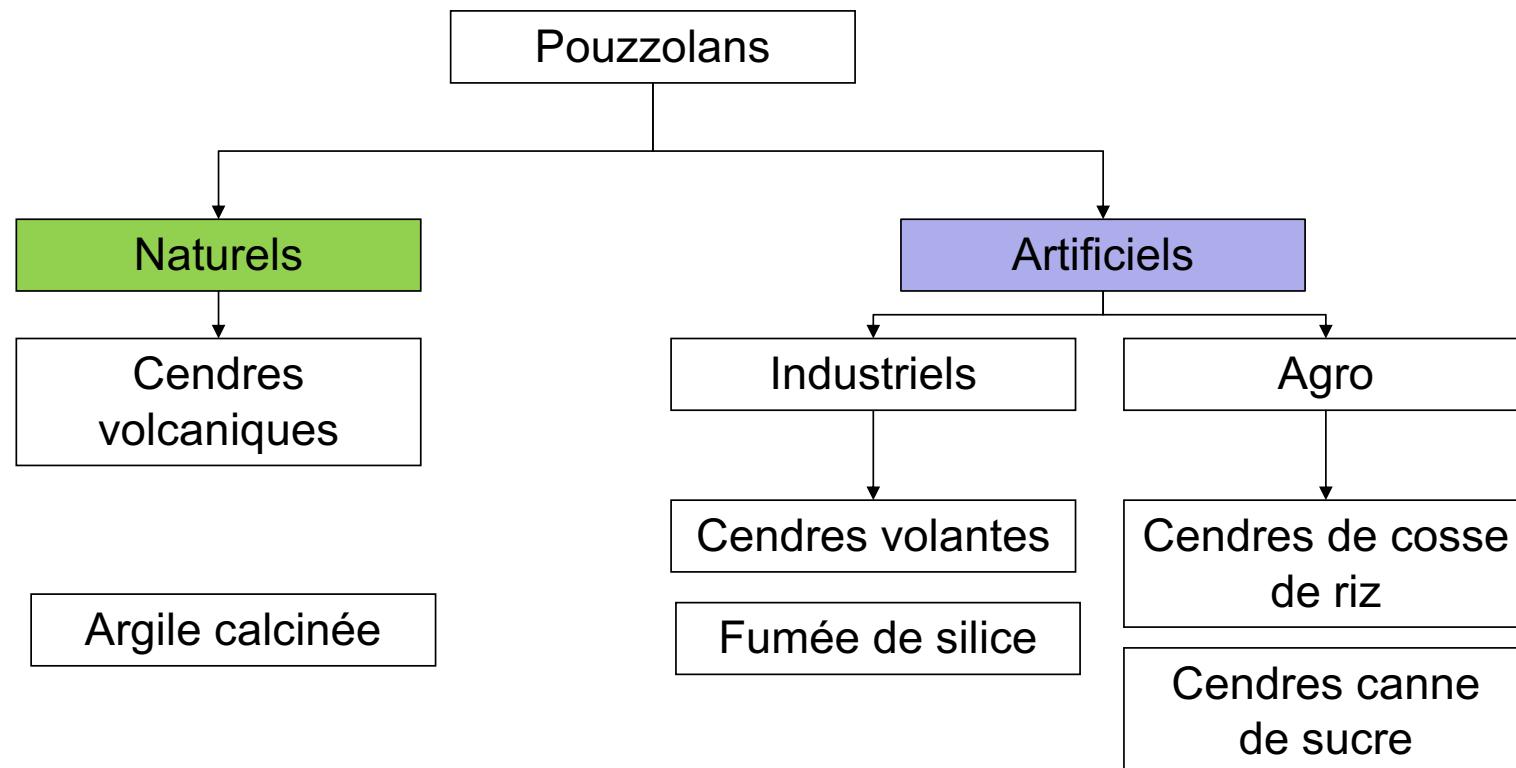
Méthode: Calorimétrie (chaleur dégagée en continu)



Source: François Avet, Ruben Snellings, Adrian Alujas Diaz, Mohsen Ben Haha, Karen Scrivener, Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays, Cement and Concrete Research, 2016,

## 4. Les pouzzolans

---



## 4.1. Les pouzzolans naturels

---



Les volcans produisent des cendres riches en verre de silice et alumine.

## 4.1. Les pouzzolans naturels

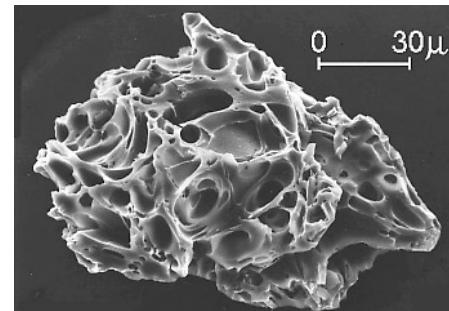
---

### Les Pouzzolanes: Pierre ponce vitreuse et cendre

- **Composition:**
  - Verre volcanique (principal composant réactif, typiquement < 50% du poids)
    - Porosité liée au type d'éruption, i.e. à la viscosité du magma  
Plus le magma est visqueux, plus la pierre ponce sera poreuse



fragment de scorie, Stromboli



Particule de cendre vésiculaire, Mt. St. Helens

## 4.1. Les pouzzolans

---

Pouzzolans naturels - gisements



## 4.2. Cendres volantes « Fly ash »

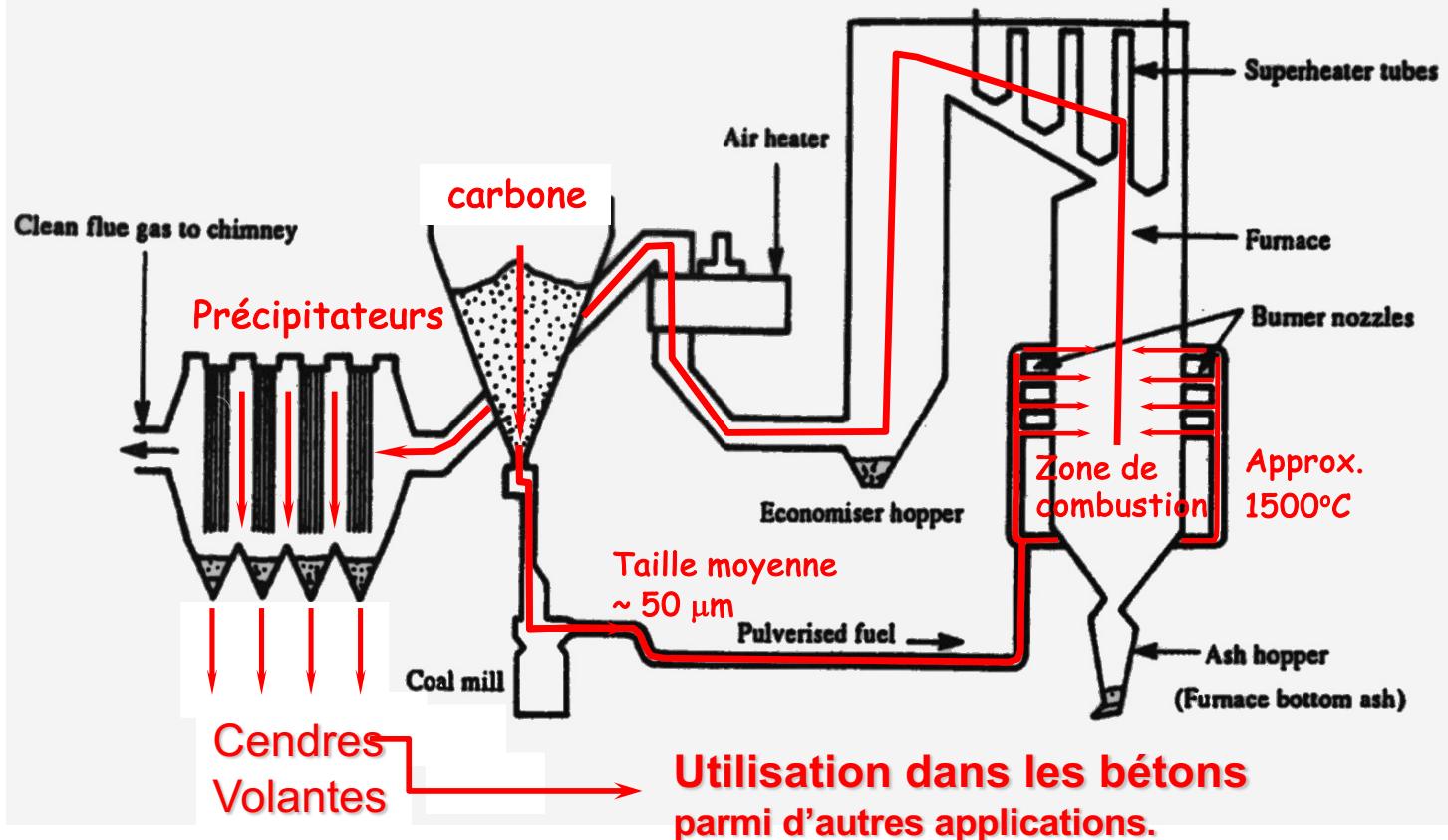
---

Un des **déchets** issus de la **combustion du charbon** dans les chaudières industrielles et dans les chaudières de centrales électriques au charbon



## 4.2. Cendres volantes « Fly ash »

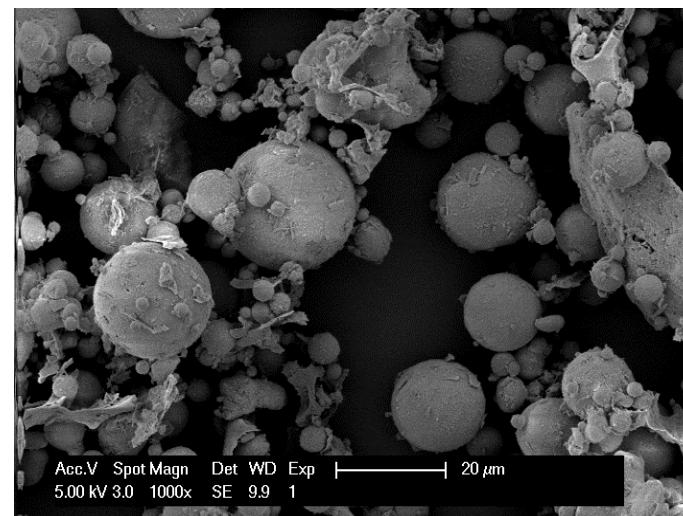
Thermal Generating Station - Boiler Layout



## 4.2. Cendres volantes « Fly ash »

---

- Combustion à 1450 °C ou à plus haute température:
  - Fonte des composants: formation d'une phase vitreuse
  - Transformation des composants: phases haute-température
  - Certains composants ne sont pas affectés
- Principalement composées de particules vitreuses sphériques (1-300 µm), se formant en gouttelettes lorsque refroidies rapidement (phase réactive)
- Une portion significative de phases cristallines réfractaires subsiste (non-réactive)



## 4.2. Cendres volantes « Fly ash »

---

- Matériaux **très hétérogène**
  - 60-95 % amorphe, le reste cristallin
  - Variabilité de la composition grain par grain

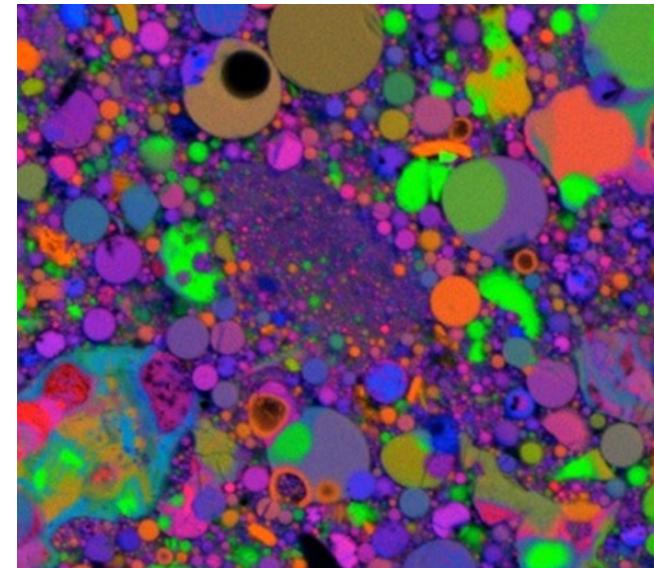
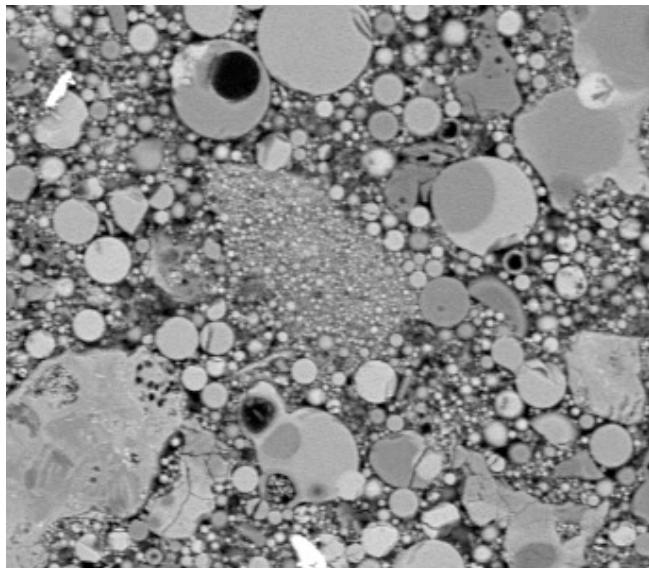
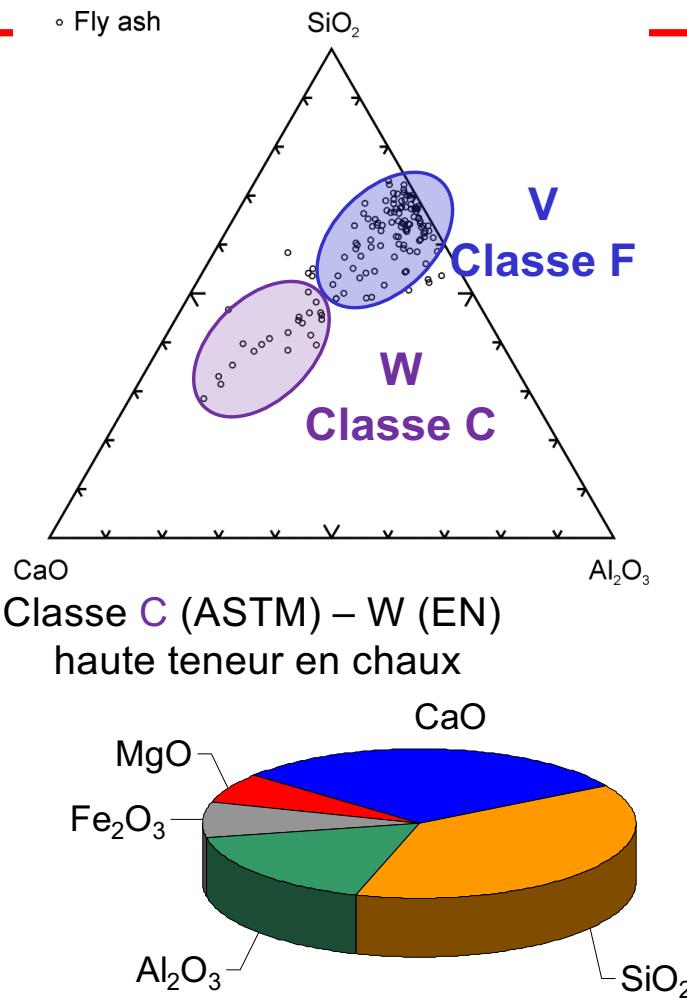
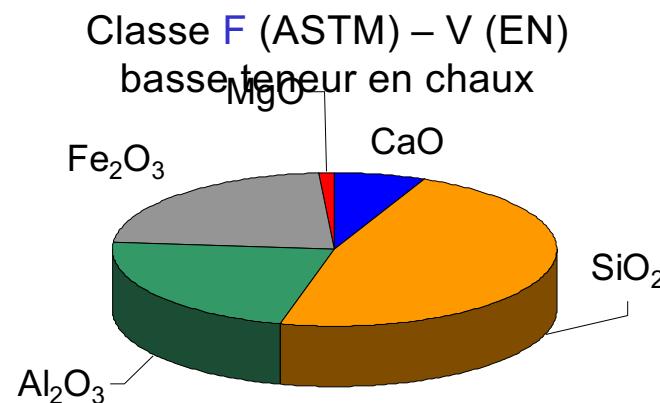


Image “chimique”

## 4.2. Cendres volantes « Fly ash »

- Classification basée sur la composition:
  - $\text{CaO} < 10\%$  Classe F / V
  - $\text{CaO} > 10\%$  Classe C / W



## 4.2. Cendres volantes: Avantages

---

- Amélioration de l'ouvrabilité ( $e/I \downarrow$  pour même cône d'Abra.ms (slump))
- Réduction de la chaleur d'hydratation
  - Réduire le risque de fissuration thermique dans les grandes masses
- Réduction de la porosité
  - Augmentation de la résistance à terme
  - Diminution de perméabilité
    - Augmentation de la durabilité
- Réduction du risque de réaction alcali-silicate

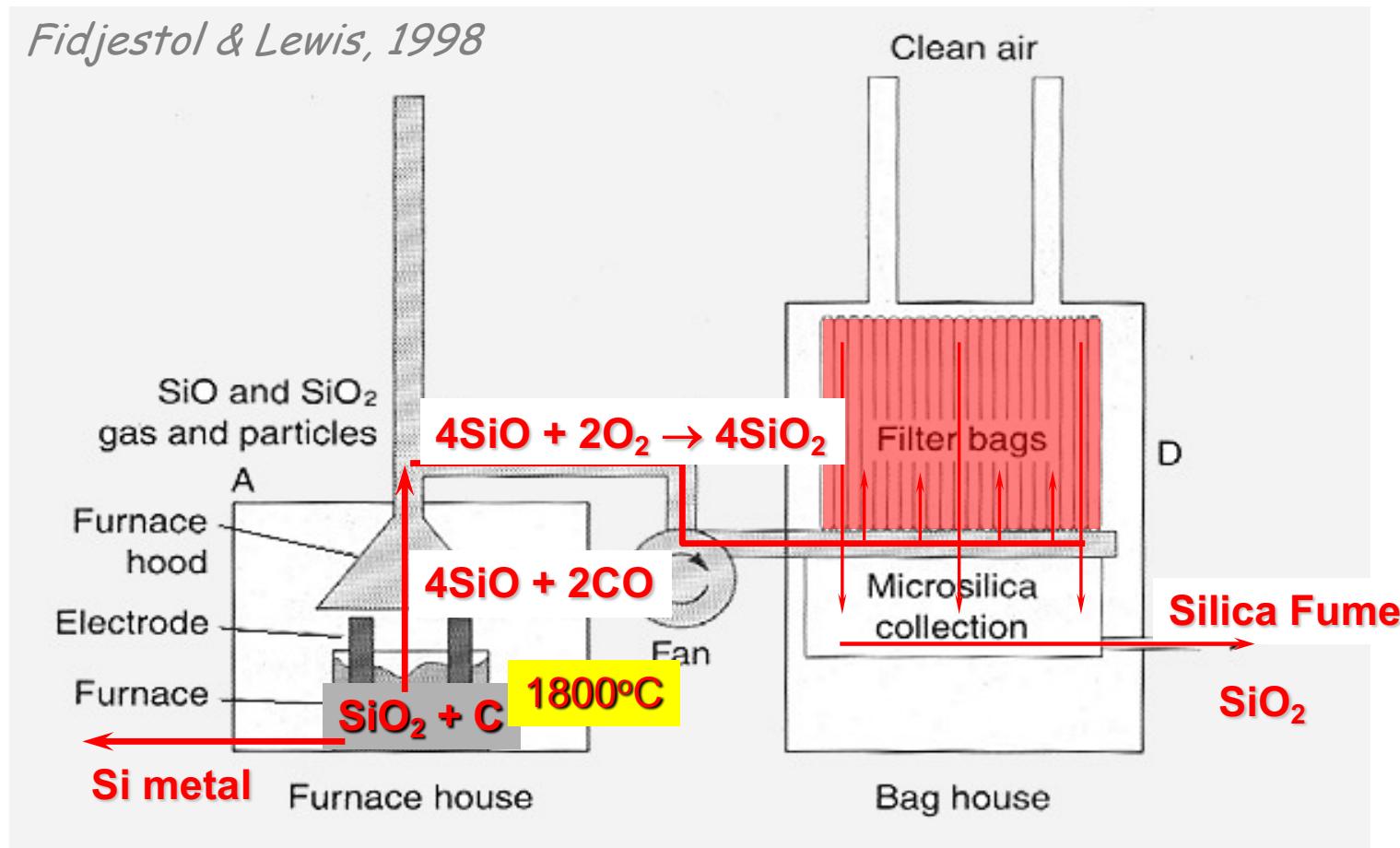
## 4.3. Fumée de silice

---

La fumée de silice est une silicate ultra-fine et non cristalline produite dans des fours à arc électriques, c'est un sous-produit de l'industrie de production de métaux de silicium et de l'alliage ferrosilicium



## 4.3. Fumée de silice

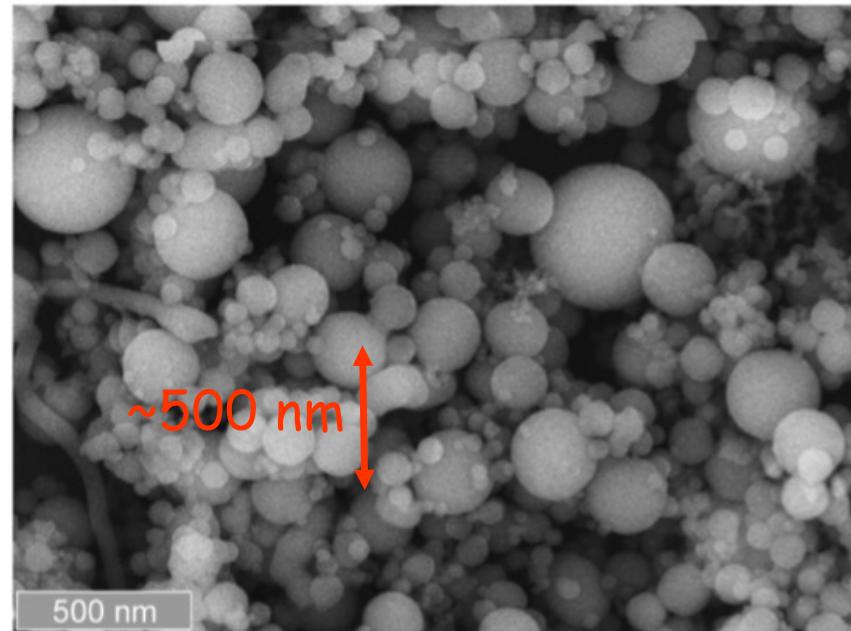


## 4.3. Fumée de silice

---

Sa taille particulièrement fine, sa grande surface et sa nature amorphe font de la fumée de silice une pozzolane hautement réactive

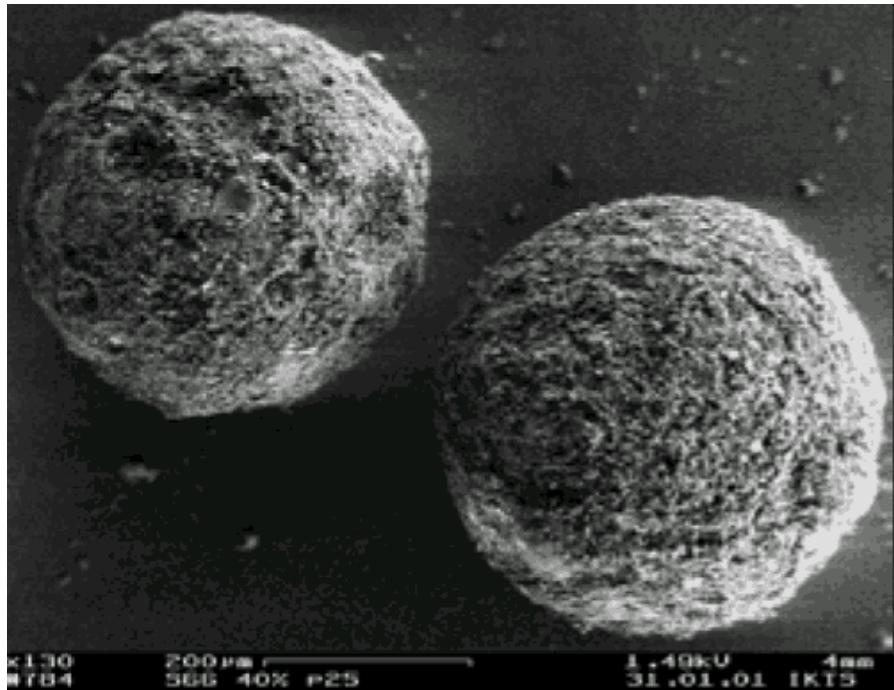
- Au moins 85%  $\text{SiO}_2$
- Basse teneur en carbone
- diamètre moyen des particules: 0.1  $\mu\text{m}$   
(1/100<sup>th</sup> de la taille moyenne d'un grain de ciment)
- Surface spécifique : 15 000  $\text{m}^2/\text{kg}$   
(contre 350  $\text{m}^2/\text{kg}$  pour CPO)



**Figure 2.20.** SEM picture of a typical silica fume with average particle diameter of 0.1  $\mu\text{m}$ . [Used by permission of Elsevier, from Jo et al. (2007), *Construction and Building Materials*, Vol. 21, Fig. 1, p. 1352.]

## 4.3. Fumée de silice

---

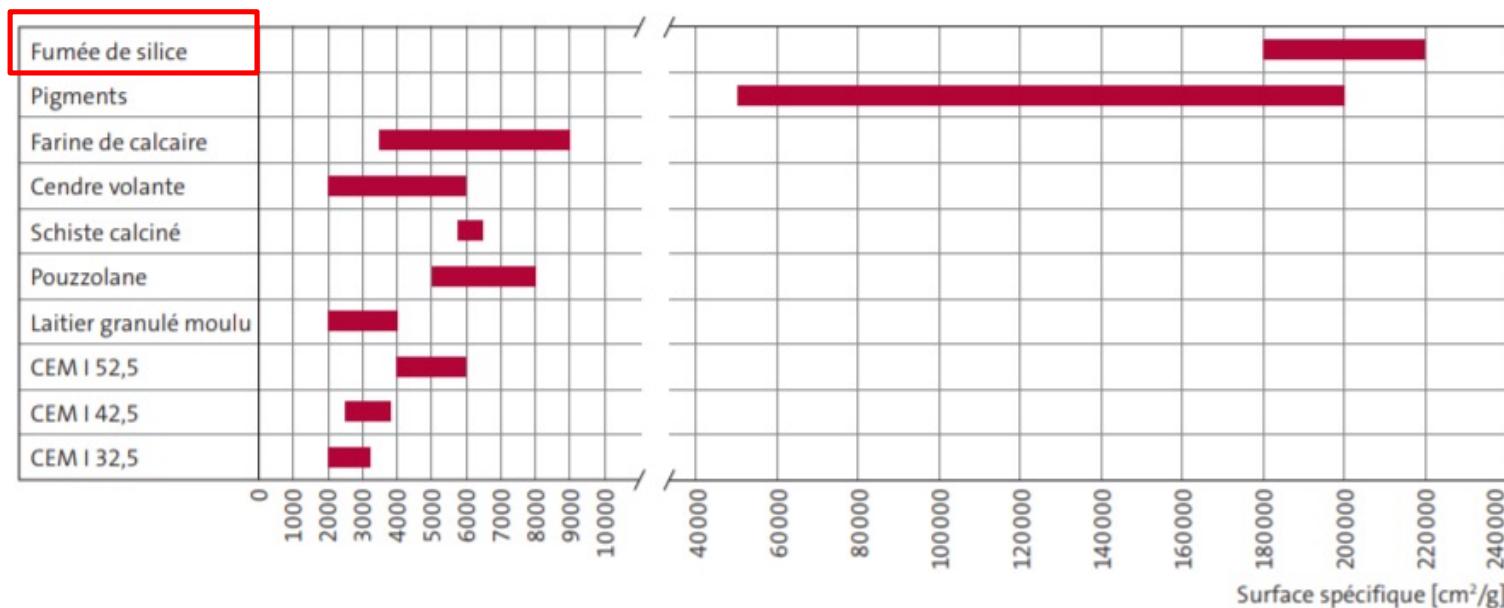


- Agglomérats de particules très fines de silice 99%
- Important de disperger les agglomérats

## 4.3. Fumée de silice

---

Extremement fines  
particules → impact sur la  
PSD du béton

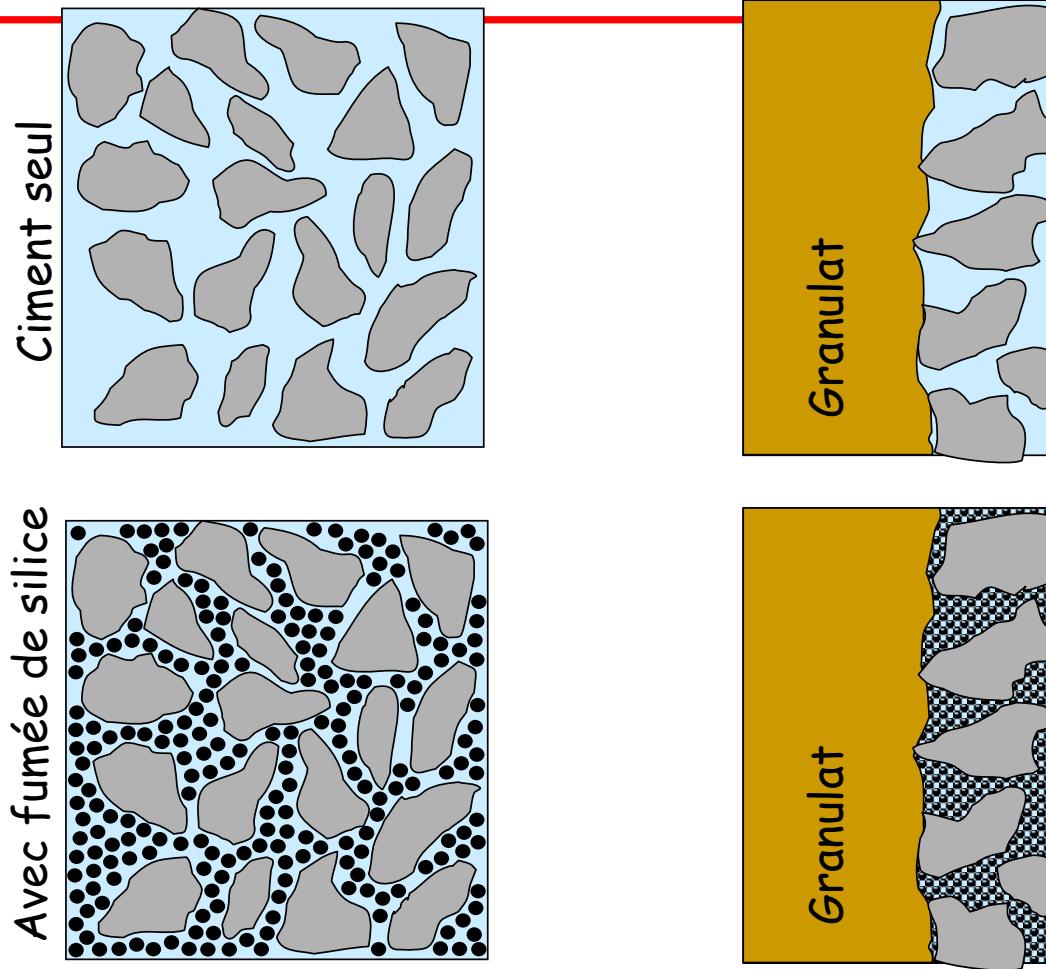


## 4.3. Fumée de silice

---

- La quantité de fumée silice disponible et très petit
- Produit de bon qualité 3-4 x plus cher par rapport au ciment
- Utilisation dans béton haut performance
- Ajouts 5-10%

## 4.3. Fumée de silice: Microfillerisation



Amélioration  
de l'interface  
entre  
granulats  
et pâte  
de ciment

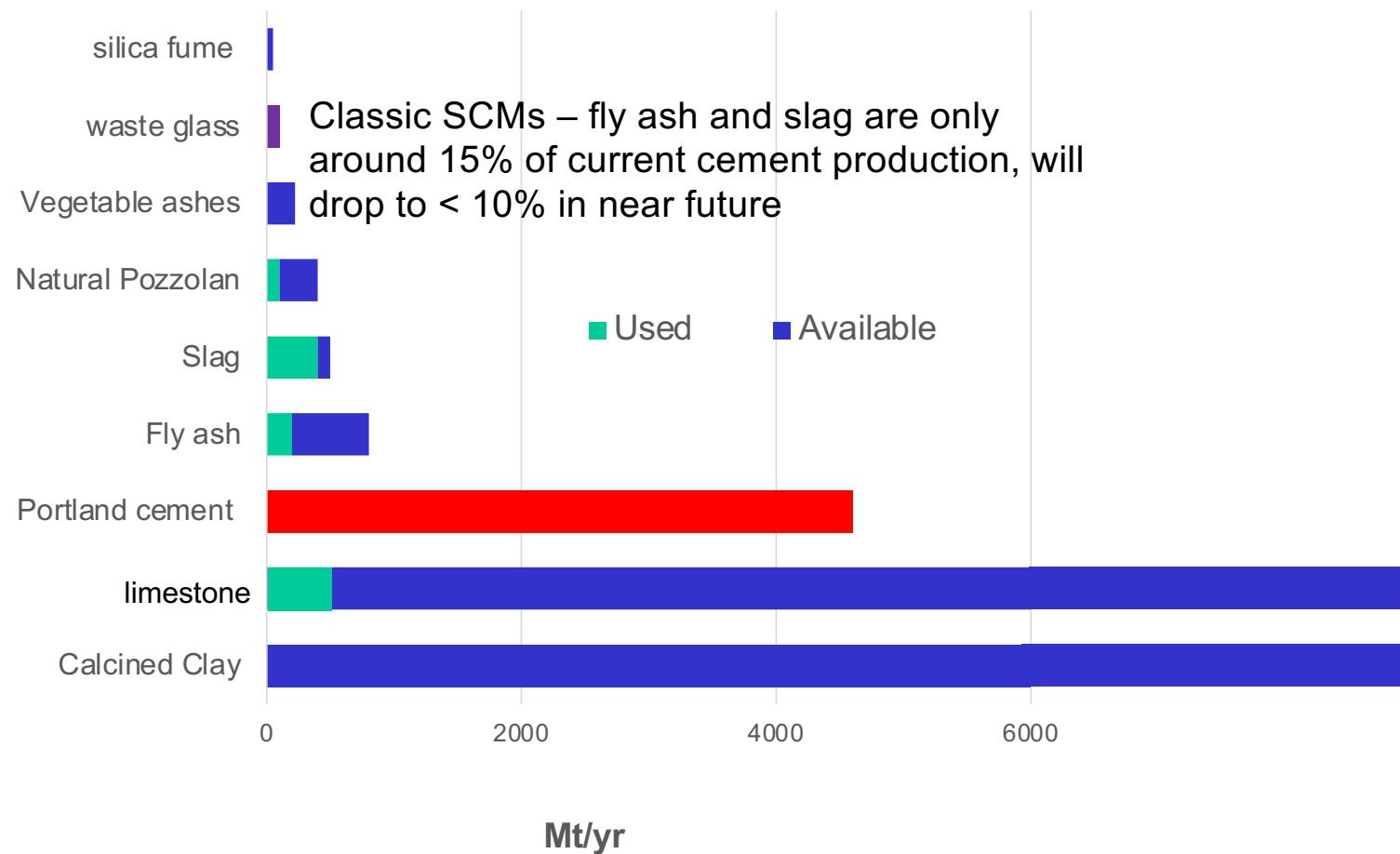
## 4.3. Fumée de silice: Avantages

---

- Réduction du ressuage et de la ségrégation
- Réduction de la porosité
  - Augmentation de la résistance
  - Diminution de la perméabilité
    - Augmentation de la durabilité
- Amélioration de la liaison entre pâte et granulat.
- Composant utilisé dans la plupart des bétons de haute performance
- Prix ++ > ciment

# Available SCMs

---



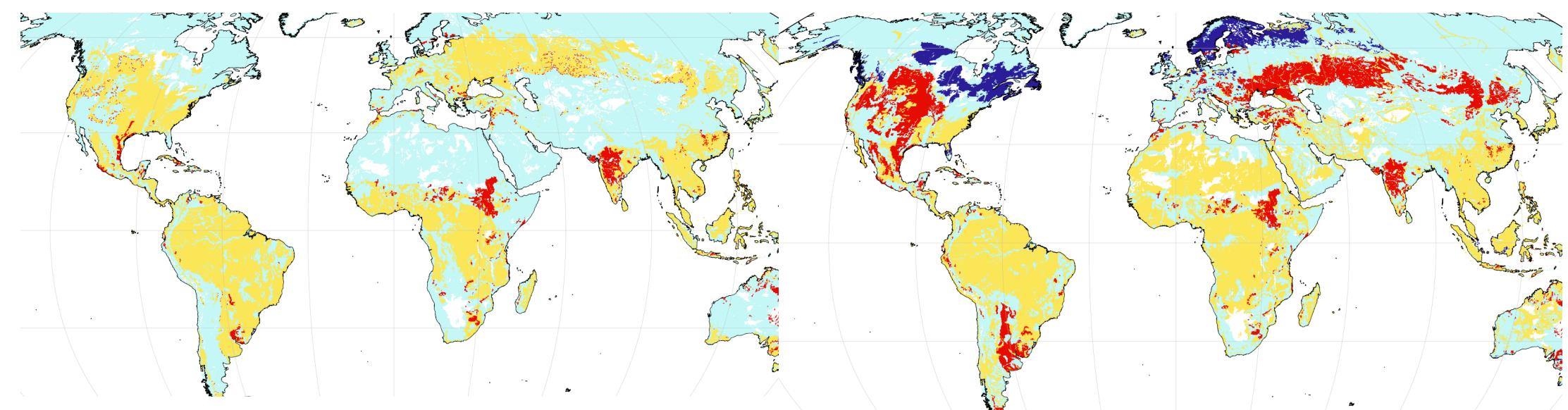
# Distribution of Kaolinitic clays

data 2017

Ito and Wagai, Scientific

0-5m

>5m



Illite/mica

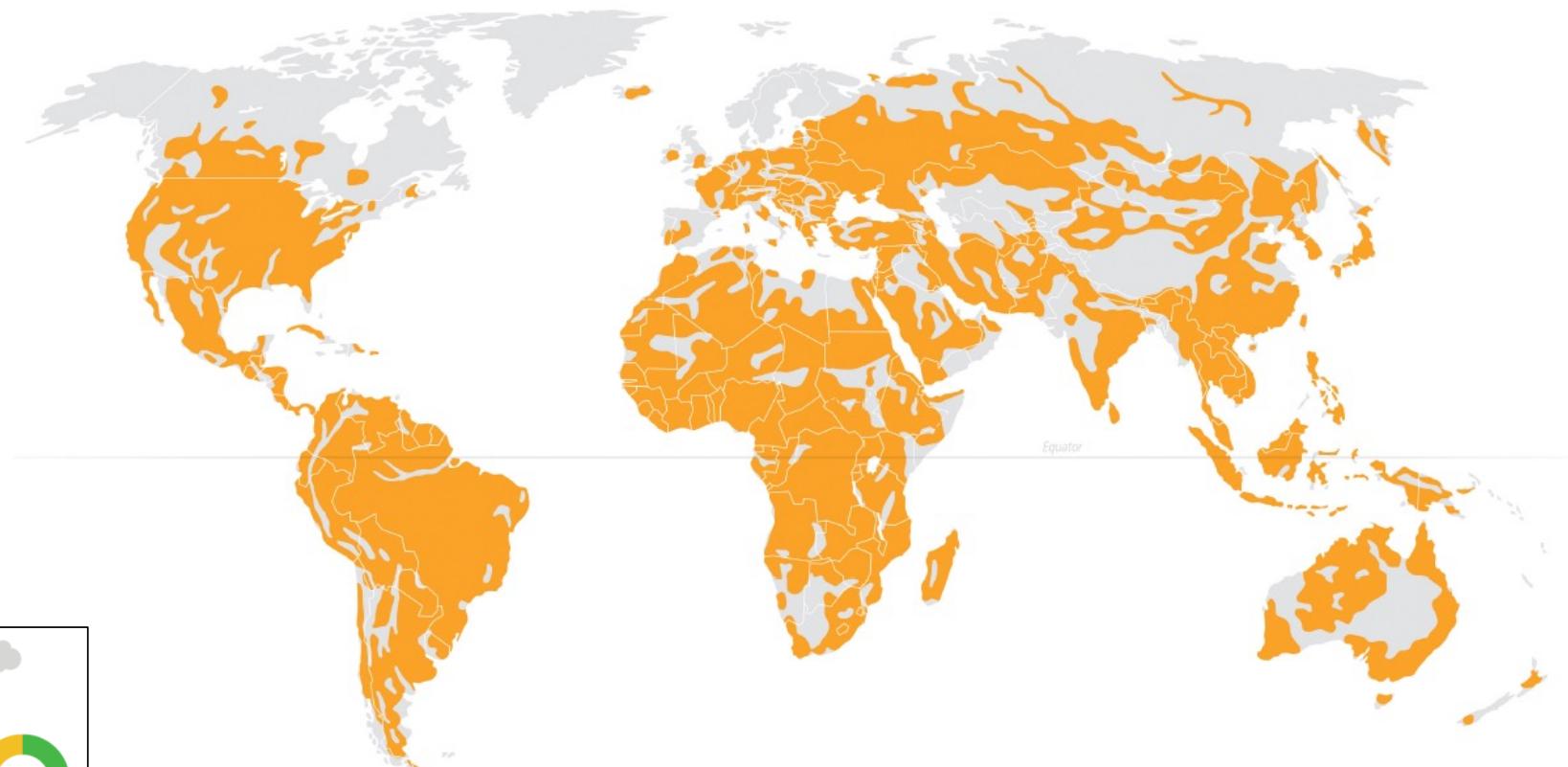
Kaolinite

Smectite

Vermiculite

# World distribution of kaolinitic clays

---



Source: Ito and Wagai, Scientific data 2017



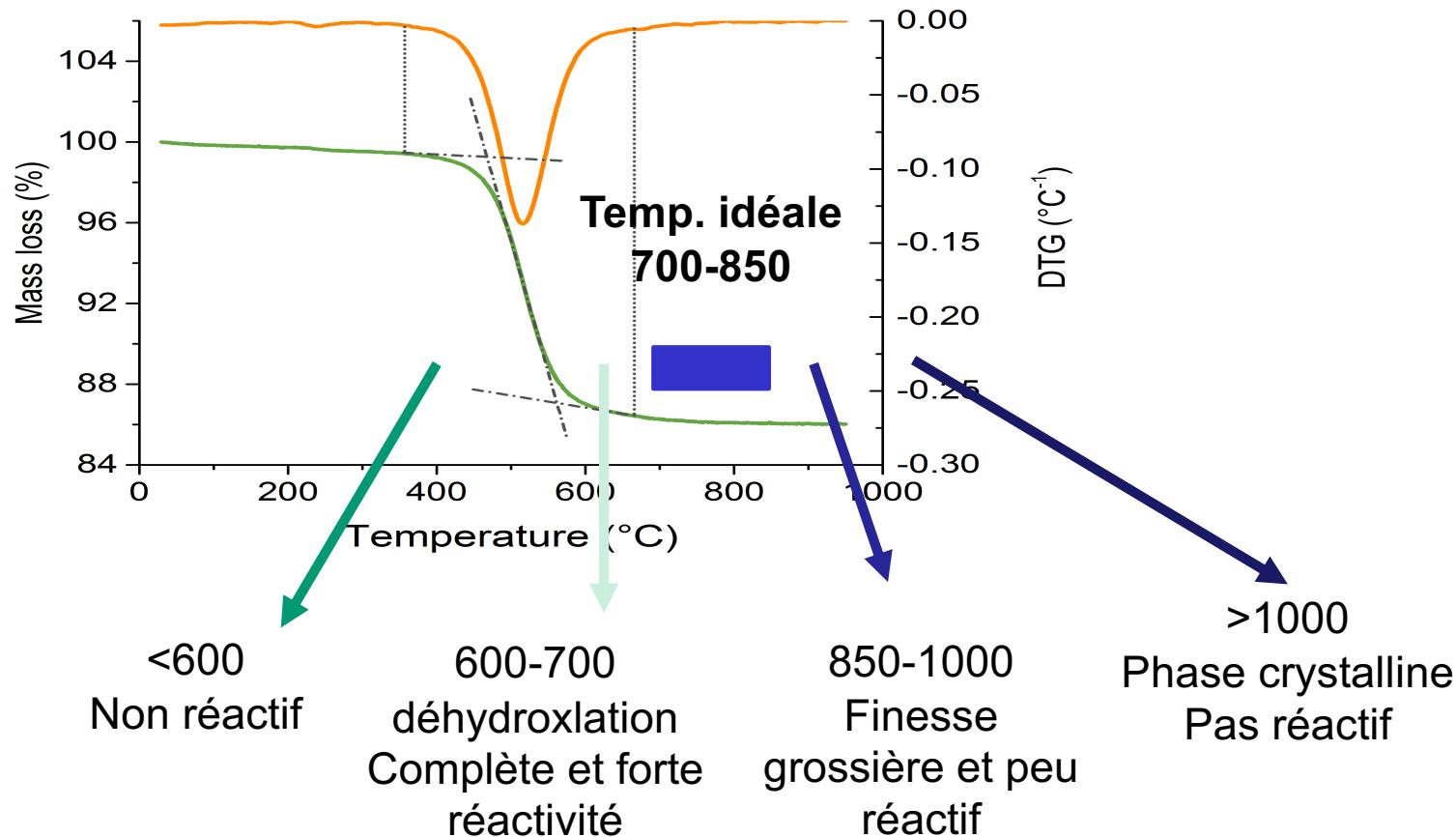
## 4.4. Argile calcinée

---

Rebus d'industrie de céramique



## 4.4. Argile calcinée



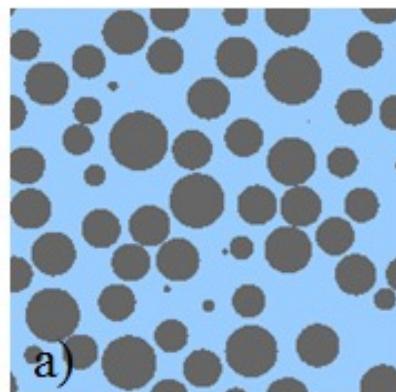
## 5. Les « fillers »

---

Par leur effet de **remplissage**, les fillers réduisent la porosité du béton. Ils sont **inertes** ou **peu reactifs**.

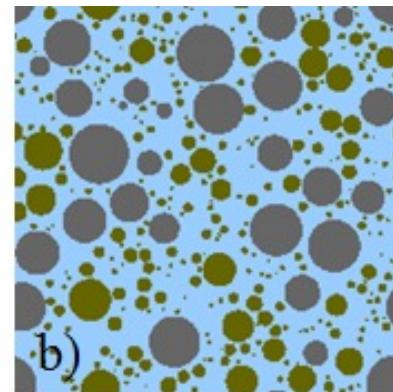
SN EN 206-1 type II

Le **calcaire** est le filler le plus fréquemment utilisé en Suisse; il sert aussi bien d'ajout du béton que de constituant du CEM II/A-L (ciment Portland au calcaire)



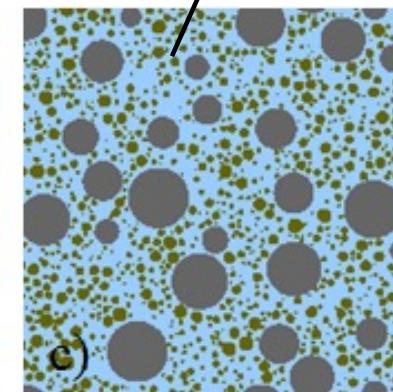
a)

Ciment Portland



b)

40% Filler



c)

40% filler fin

## 5. Les « fillers »

---

Définition selon la norme SIA 215.002 (correspond à ENV 197-1)

«Les **fillers** sont des **matières inorganiques minérales**, naturelles ou artificielles spécialement sélectionnées, qui après une préparation appropriée, en fonction de leur granulométrie, **améliorent les propriétés physiques** des ciments (telles que l'ouvrabilité ou le pouvoir de rétention d'eau).

Ils peuvent être inertes ou présenter des propriétés faiblement hydrauliques latentes ou pouzzolaniques; aucune exigence n'est toutefois requise à cet égard.

Ils ne doivent **pas accroître** sensiblement la **demande en eau du ciment** ni diminuer en aucune manière la résistance du béton ou du mortier à la détérioration, et la protection des armatures contre la corrosion.»

## 5. Les “fillers”

---

Cas particulier du **calcaire**

Souvent vu comme inerte, le calcaire broyé finement **peut réagir** avec les ions Al pour former de nouveaux hydrates en plus de ceux du ciment.

Cette réaction ouvre des portes pour des **ciments “ternaire”** qui se constituent de Ciment Portland + 2 autres additions  
(Mélange binaire : seulement une addition au Ciment Portland)

Exemples:

- Ciment Portland + Fly Ash + Calcaire
- Ciment Portland + Argile Calcinée + Calcaire

## 6. Les ciments ternaires

Exemple: Projet



Calcaire

Argile Calcinée

Ciment

Eau

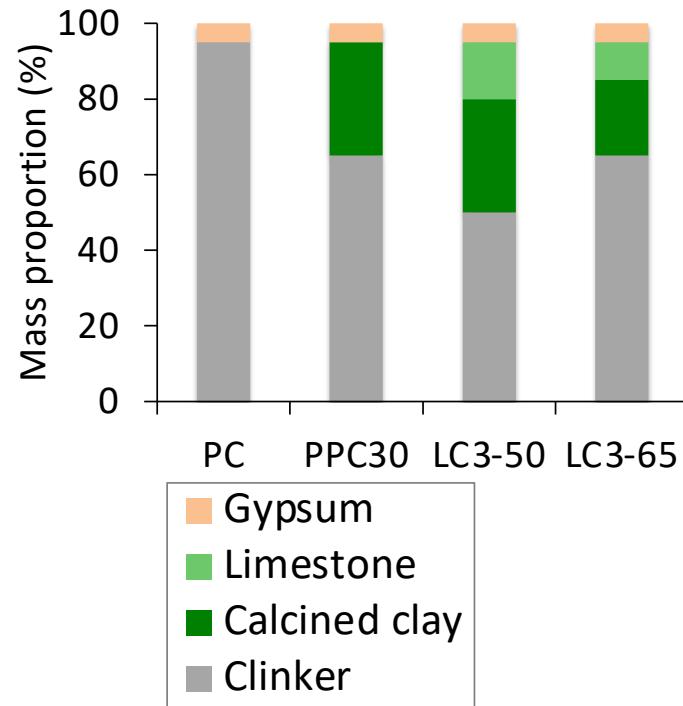
Réaction d'hydratation du ciment

Réaction pouzzolanique

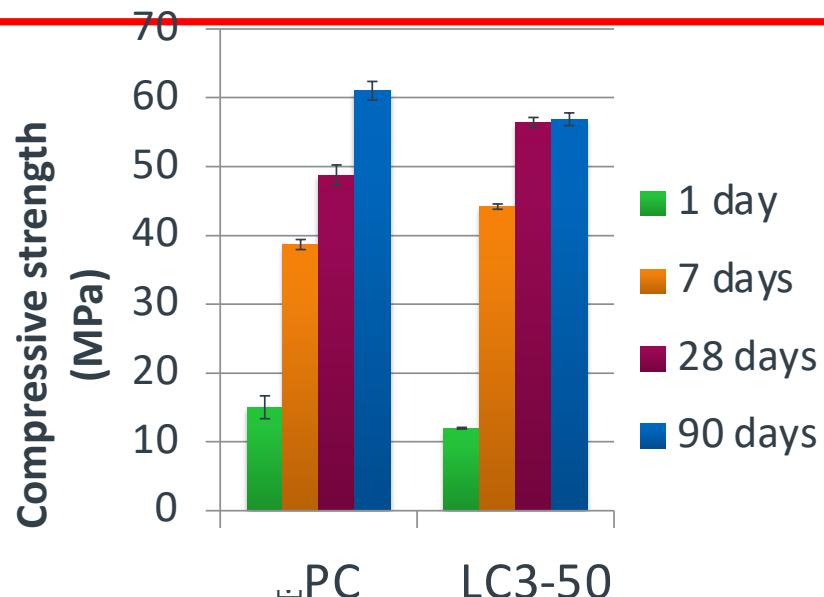
Réaction Al de l'argile +  
Calcaire

**SYNEGIE des REACTIONS!**

# LC<sup>3</sup>



LC<sup>3</sup> is a family of cements,  
the figure refers to  
the **clinker** content

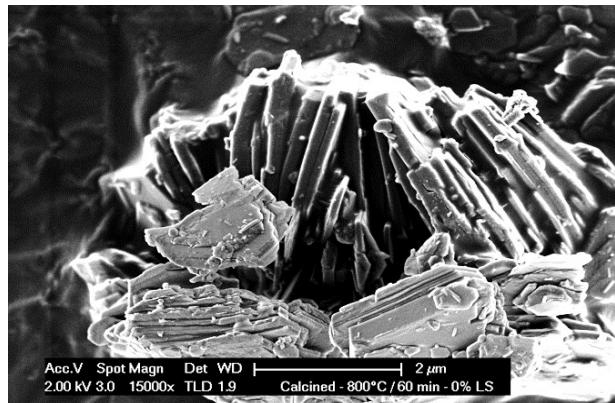
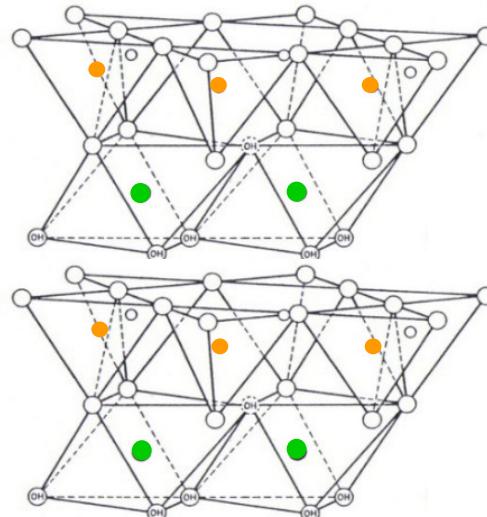


- PC
- LC3-50
  - 50% less clinker
  - 30% less CO<sub>2</sub>
  - Similar strength
  - Better chloride resistance
  - ASR resistant

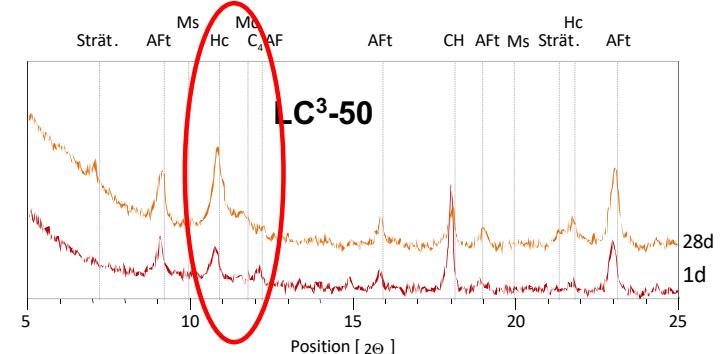
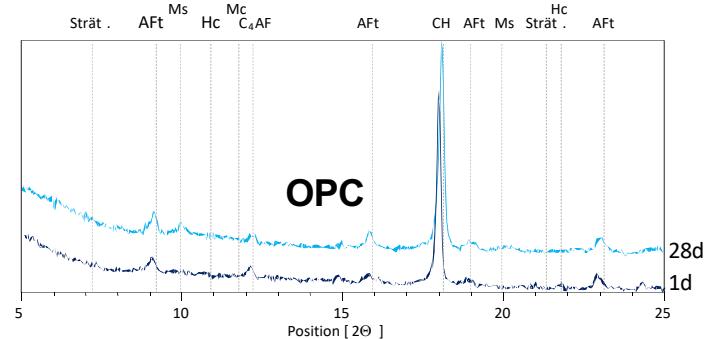
# Why can we get such high replacement levels?

- Calcination of kaolinite at 700-850°C gives metakaolin: much more reactive than glassy SCMs

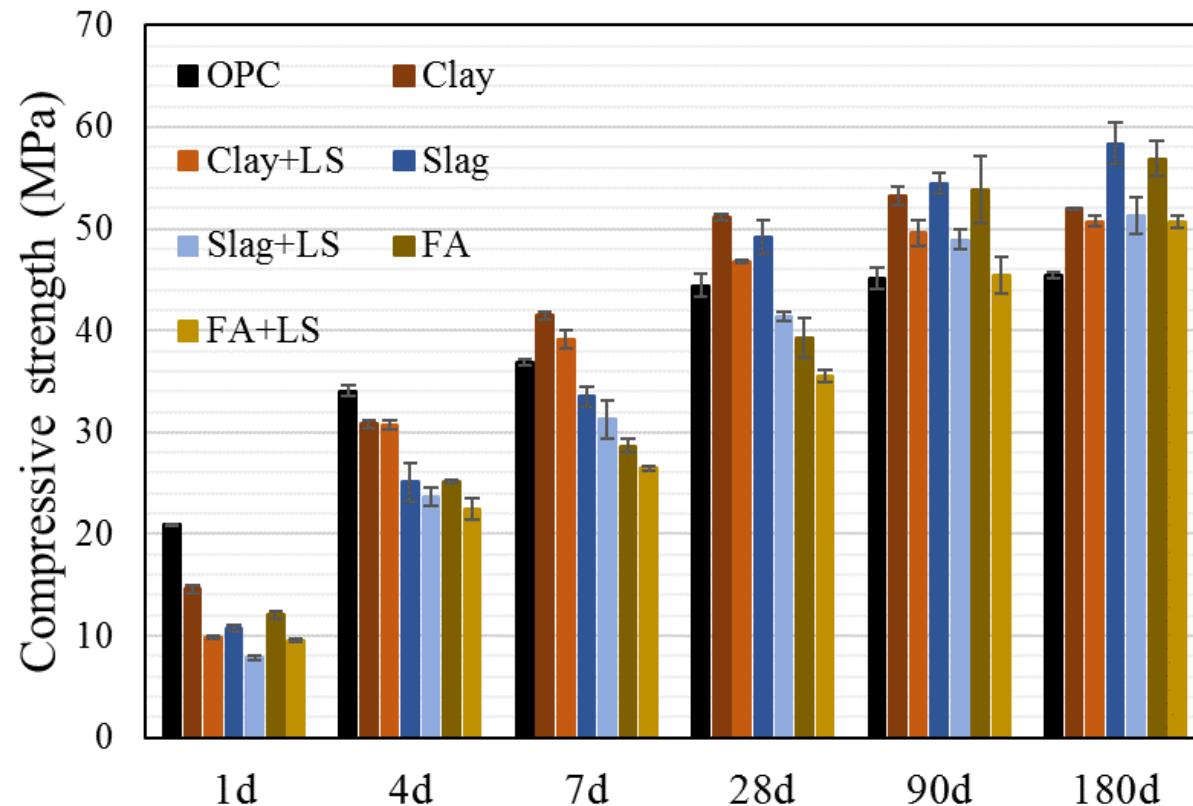
● aluminium  
● silicon



- » Synergetic reaction of Alumina in metakaolin with limestone to give space filling hydrates



## Comparison of calcined kaolinitic clay, slag and fly ash

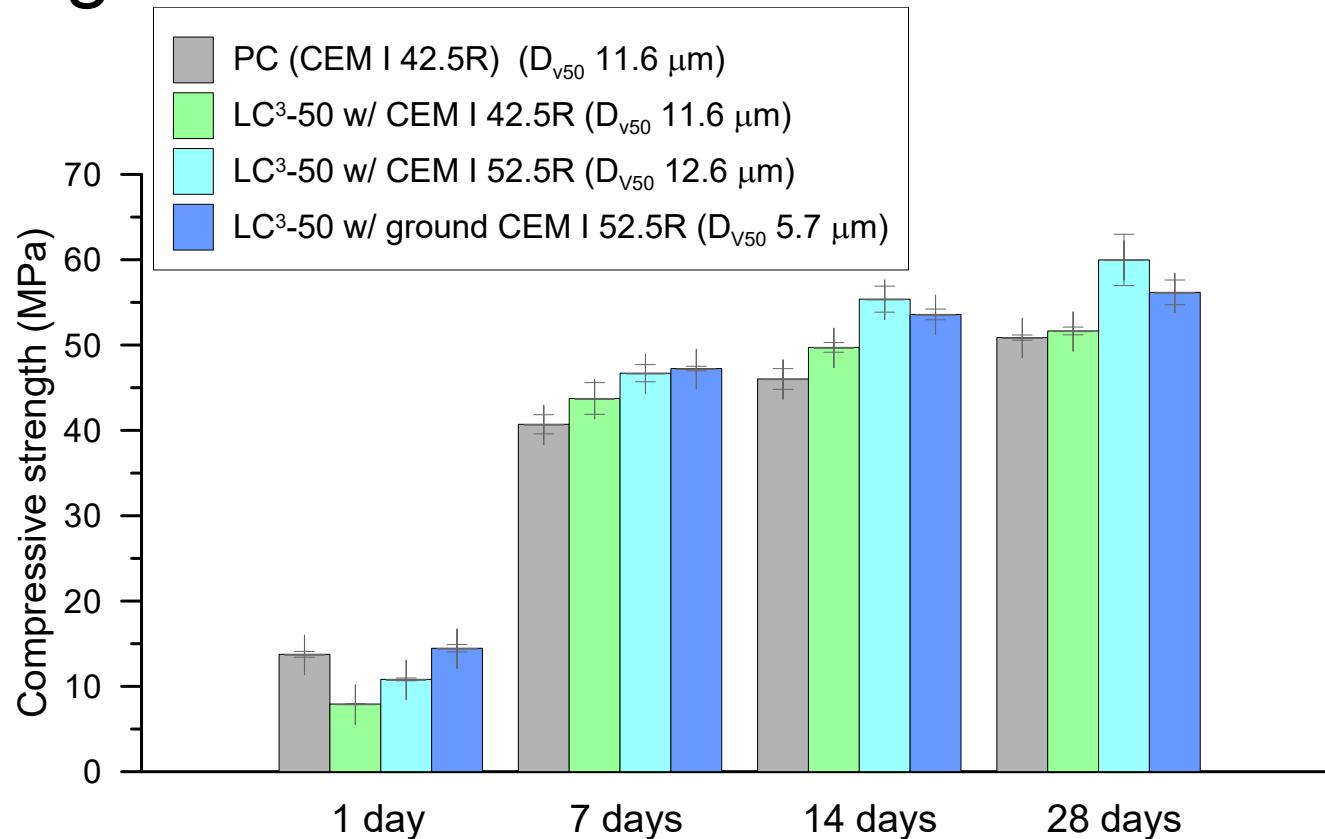


Binary systems 70% clinker, 30% SCM

Ternary systems, with limestone 50% clinker, 30% SCM, 15% limestone

# Possible to get early strength by grinding clinker finer

---



# Comparison with natural pozzolans, example Chile



- Pozzolanic cements have been in widespread use since the 1960s
- Standardization built around the cements available in the local market

High strength (80% CK)

General use (65% CK)

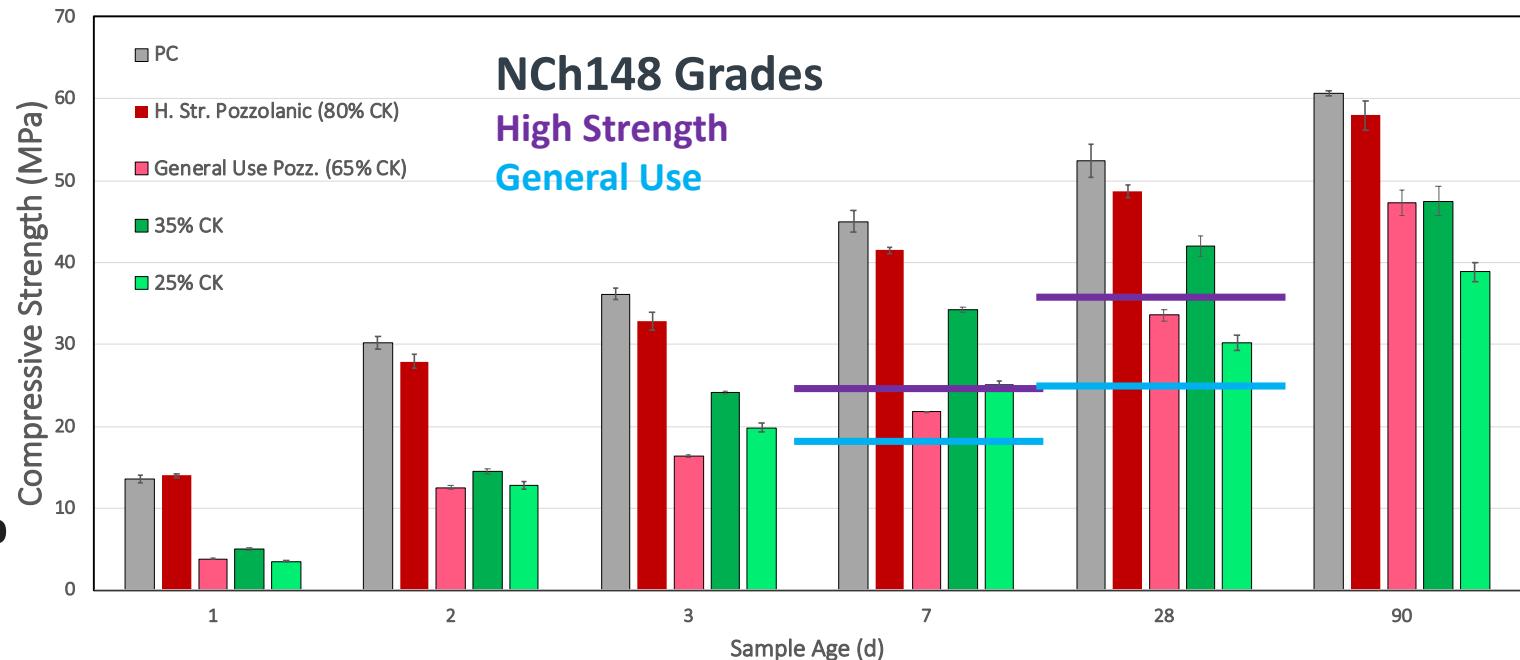


LC<sup>3</sup>-35 (35% CK)

LC<sup>3</sup>-25 (25% CK)

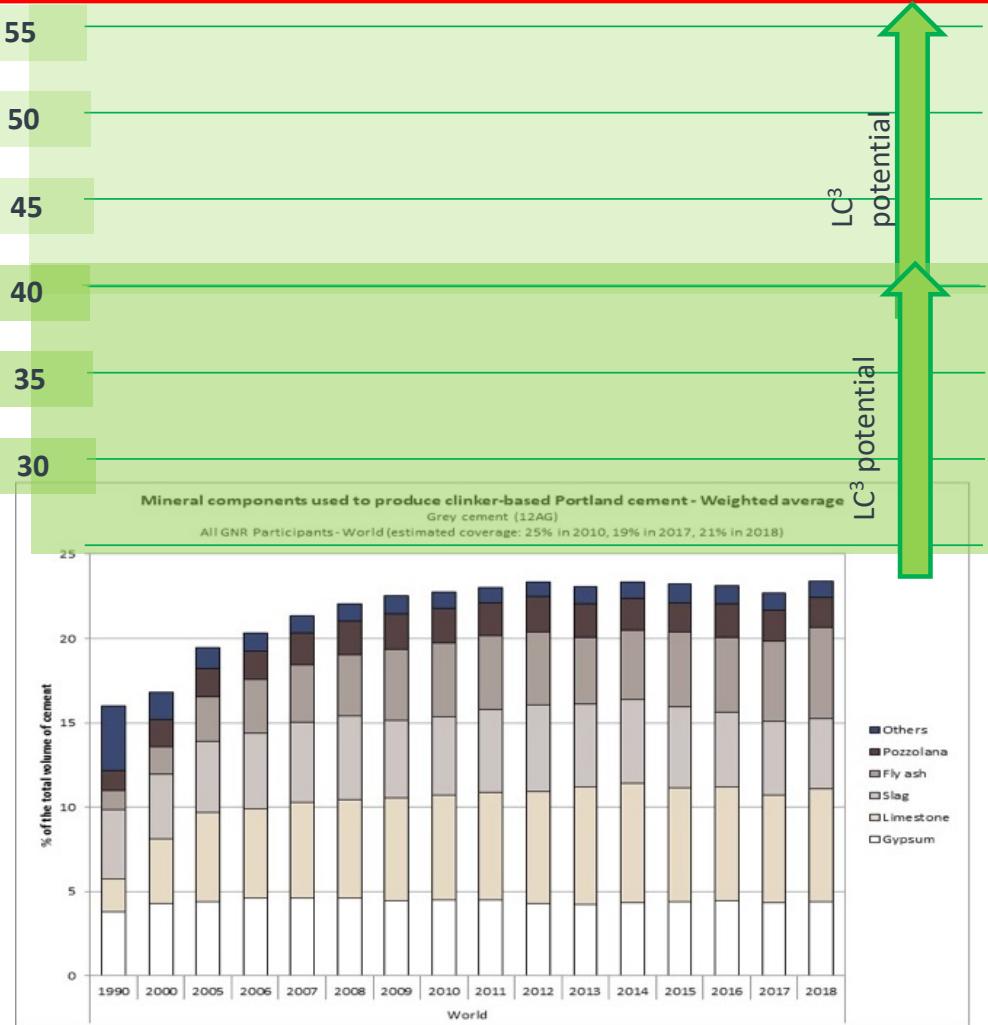
Clinker  
savings

**40-45%**



**The reactivity of SCMs matters!**

## Calcined Clay only SCM which can expand substitution



> 800 million  
Tonnes CO<sub>2</sub>/yr

> 400 million  
Tonnes CO<sub>2</sub>/yr

# Effet sur les performances du béton

---

L'addition de matériaux remplaçant le ciment Portland permet d'avoir de **nouvelles propriétés** de béton.

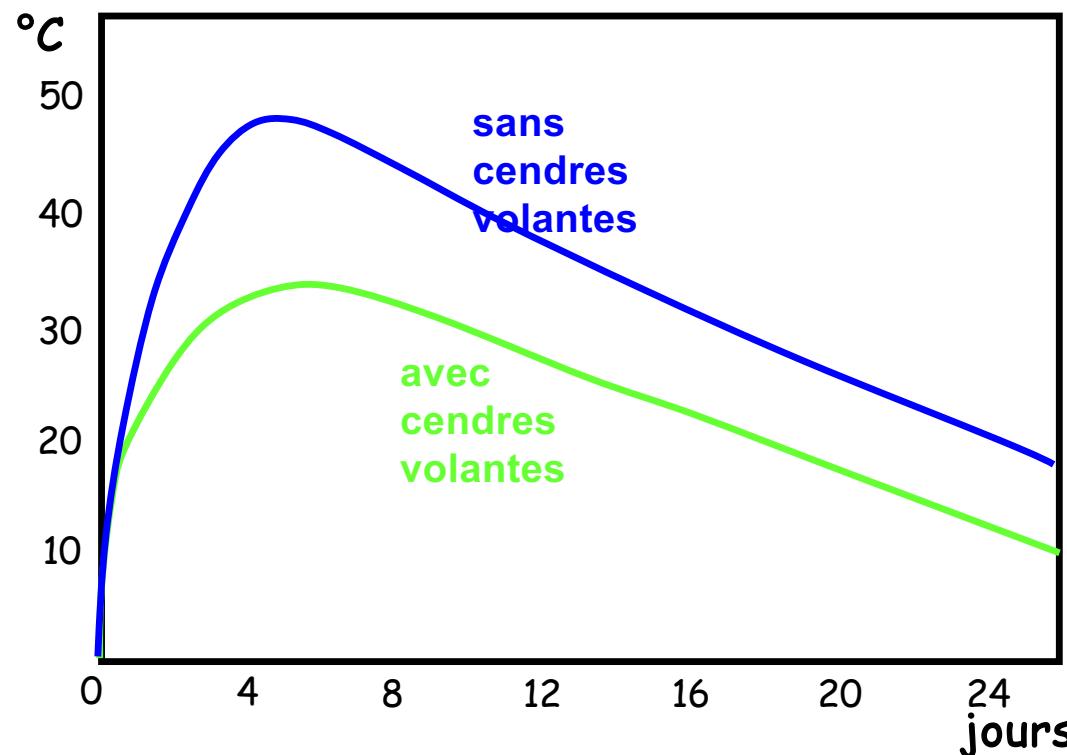
Parmi celles-ci:

- Masse volumique plus faible
- Chaleur dégagée plus faible
- Réaction plus lente, décoffrage plus tardif
- Porosité réduite
- Résistance mécanique plus élevée à long terme
- Meilleure durabilité

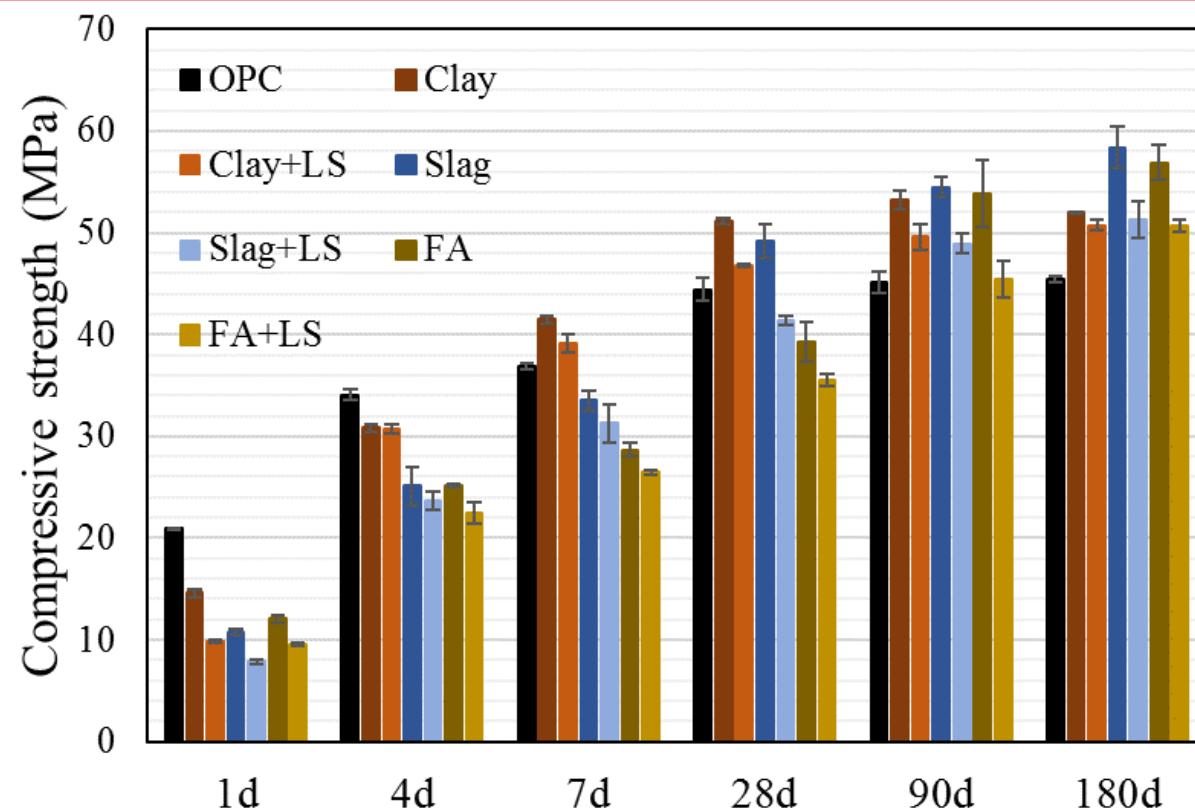
## 7. Effet sur les performances du béton

---

### 7.1. Réduction de la chaleur dégagée

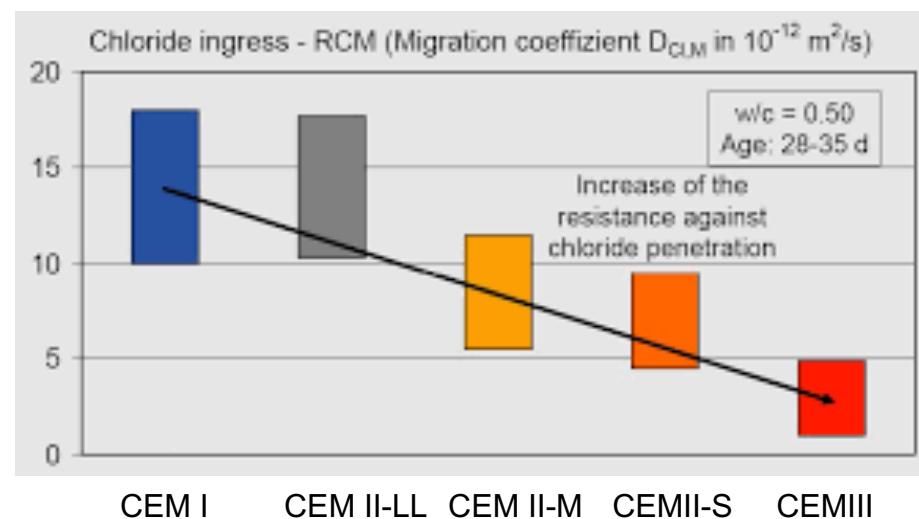


# Augmentation des resistance long term



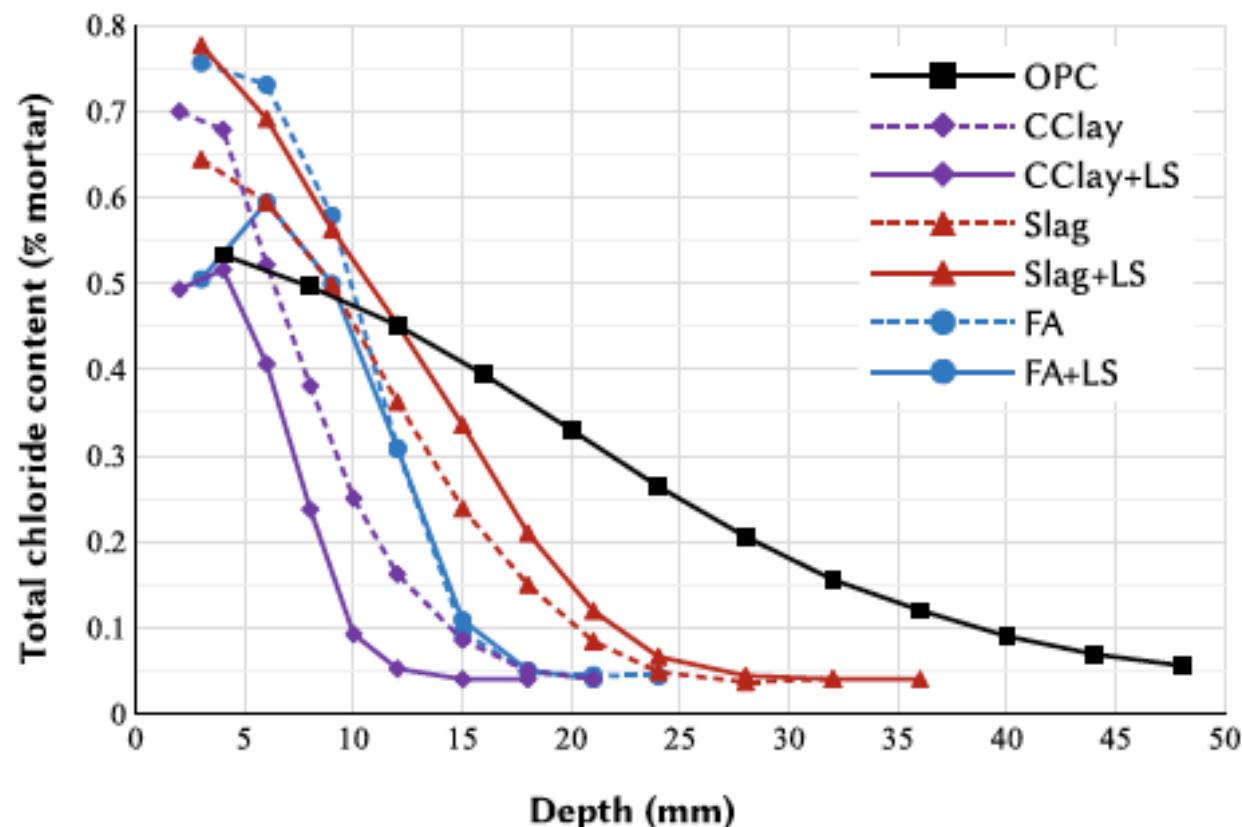
# 7. Effet sur les performances du béton

## 7.6. Réduction de la pénétration des ions chlores



## 7. Effet sur les performances du béton

### 7.6. Réduction de la pénétration des ions chlores



## 8. Exemples d'utilisation

---

Hadrien Pantheon, Rome



## 8. Exemples d'utilisation

---

Hadrien Pantheon,  
Rome

Les Romains utilisaient les cendres volcaniques, venant des environs de **Pozzoli, les pouzzolanes** mélangées avec de la chaux pour améliorer les résistance et alléger la structure du dôme



## 8. Exemples d'utilisation

---

Barrage des trois Gorges, Chine  
Réduction de la chaleur dégagée



## 8. Exemples d'utilisation

---



16 million de m<sup>3</sup> de béton dans la structure –  
Class I fly ash ciment

## 8. Exemples d'utilisation

---



Confédération bridge, Canada:  
ciment+FS pré-mélangé +cendres volantes ajoutées au stade de fabrication  
du béton – pour augmenter la durabilité, améliorer la pompabilité, réduire la  
chaleur, et obtenir une meilleure résistance. + Charges de glace

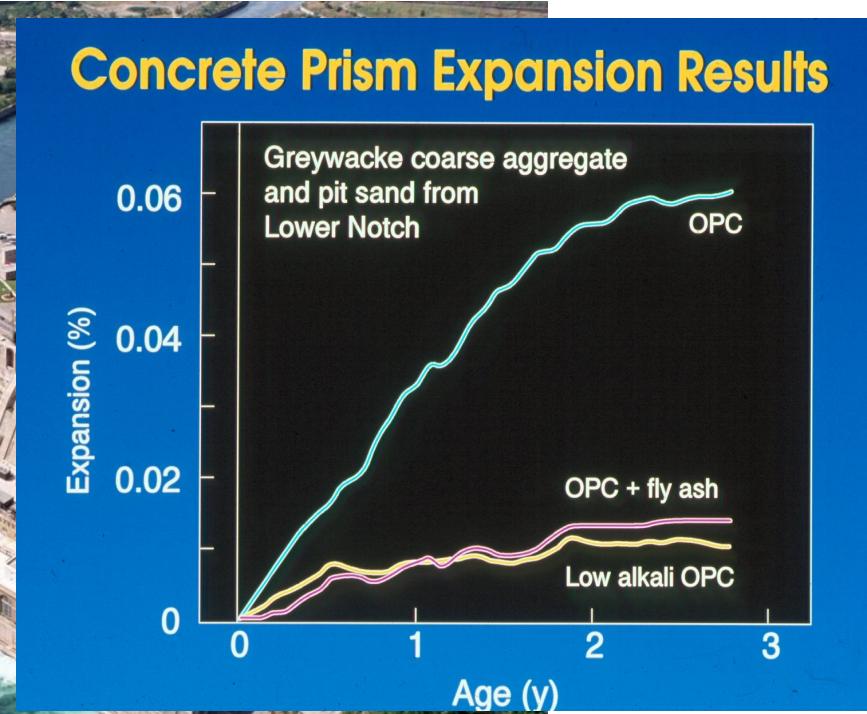
## 8. Exemples d'utilisation

---



Causeway en Floride – Cendres volantes utilisées pour augmenter la résistance à la pénétration des ions chlore.

## 8. Exemples d'utilisation



Barrage au Canada – Cendres Volantes (Type F) pour minimiser le risque d'expansion par réaction alkali-granulats (ASR)

## 8. Exemples d'utilisation

---

Santa Clara, Cuba - Ciment Argile Calcinée et Calcaire (LC3)  
Pour minimiser le coût économique et écologique



Limestone  
Calcined  
Clay  
Cement

**LC3**

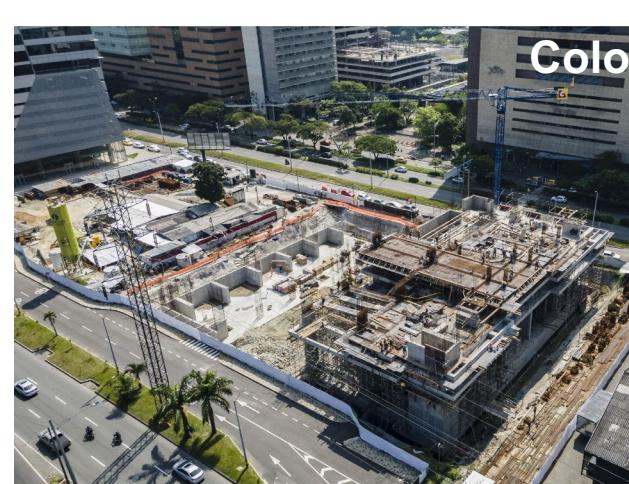
7 tonnes de CO<sub>2</sub>  
économisées

# Constructions with LC3 materials

2014



2024



Colombia



Switzerland



Rolex campus in planning

---

# **Some examples Of CO<sub>2</sub> saving in application**

---

---

# **Comparison of LC3 concrete with concretes prescribed in Dubai**

A report on the Dubai Building Code for sustainable concrete - 2021 edition

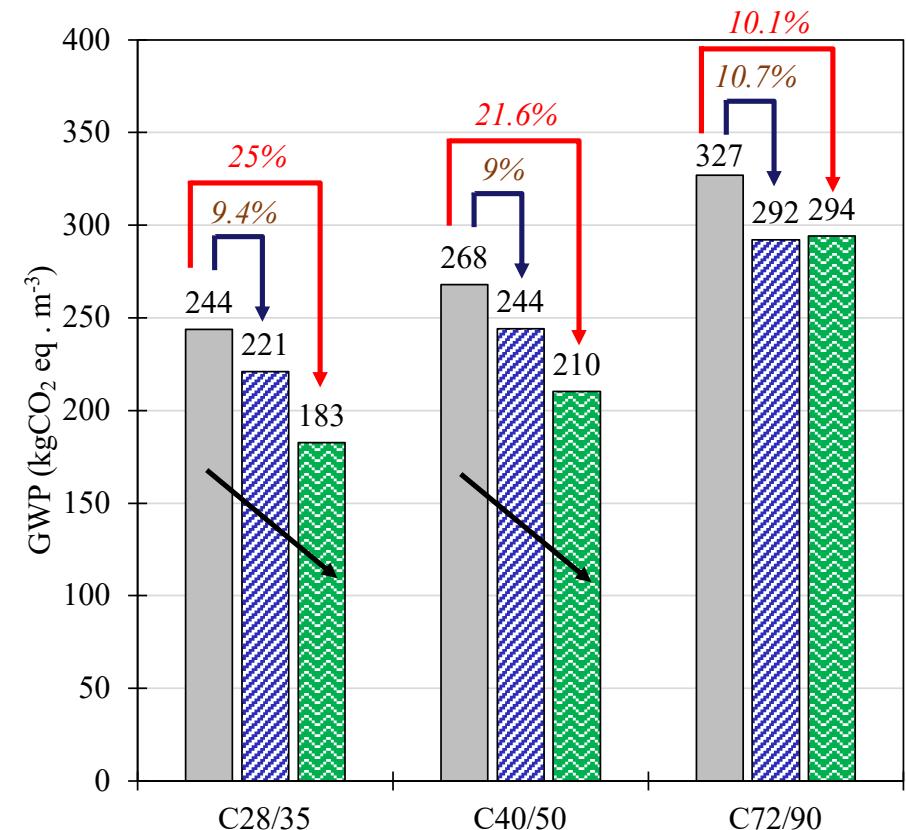
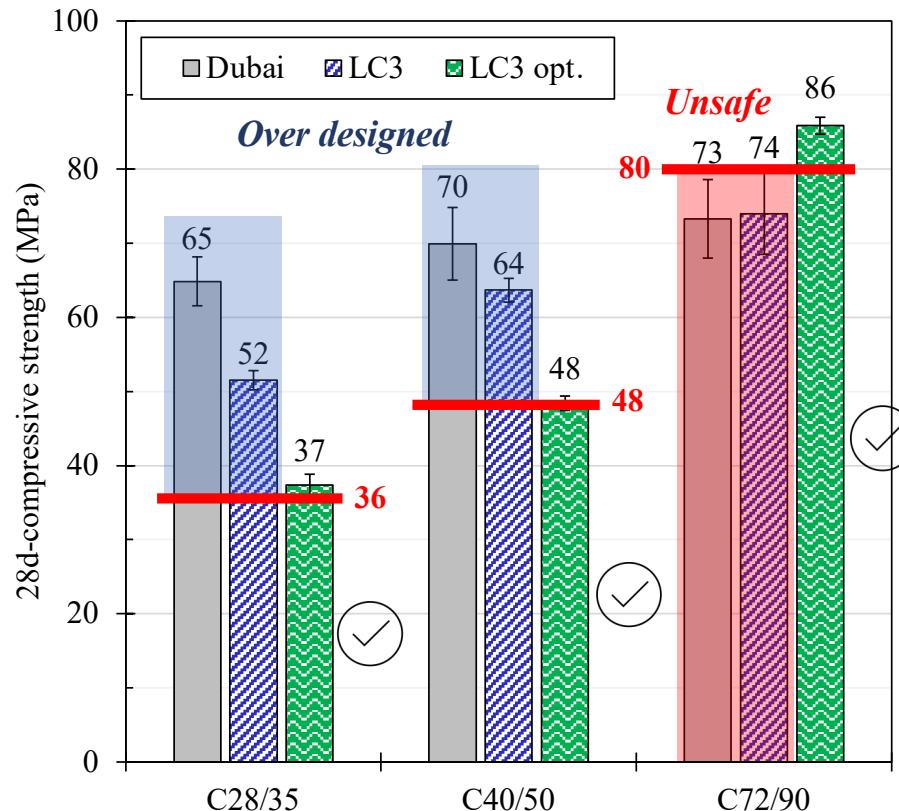


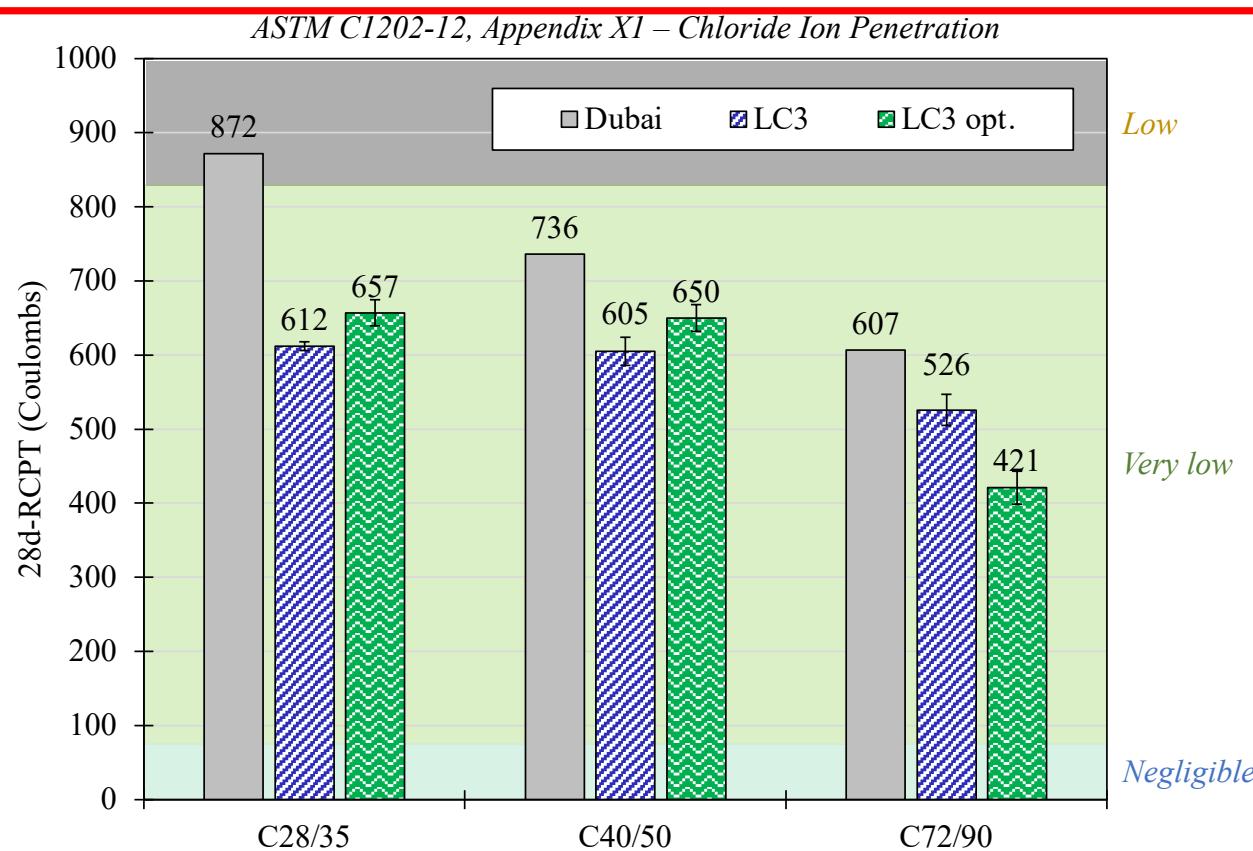
---

Strength class	C28/35	C40/50	C72/90
Materials (kg/m <sup>3</sup> )	Dubai	Dubai	Dubai
<b>Total binder</b>	<b>380</b>	<b>420</b>	<b>510</b>
GGBS ratio	36%	36%	26%
SF ratio			8%
<b>w/b ratio</b>	<b>0.42</b>	<b>0.36</b>	<b>0.29</b>
SP (%)	0.50	0.50	0.75
Slump test (mm)	10	10	10

Strength class	C28/35			C40/50			C72/90		
Materials (kg/m <sup>3</sup> )	Dubai	LC <sup>3</sup>	LC <sup>3</sup> opt.	Dubai	LC <sup>3</sup>	LC <sup>3</sup> opt.	Dubai	LC <sup>3</sup>	LC <sup>3</sup> opt.
<b>Total binder</b>	<b>380</b>	<b>380</b>	<b>325</b>	<b>420</b>	<b>420</b>	<b>375</b>	<b>510</b>	<b>510</b>	<b>510</b>
GGBS ratio	36%			36%			26%		
SF ratio			55kg (15%)			45kg (11%)			8%
<b>w/b ratio</b>	<b>0.42</b>	<b>0.42</b>	<b>0.61</b>	<b>0.36</b>	<b>0.36</b>	<b>0.48</b>	<b>0.29</b>	<b>0.29</b>	<b>0.26</b>
SP (%)	0.50	1.56	0.20	0.50	1.97	0.50	0.75	1.97	2.50
Slump test (mm)	10	-	<b>100</b>	10	-	<b>75</b>	10	-	<b>10</b>

### Compressive strength and GWP





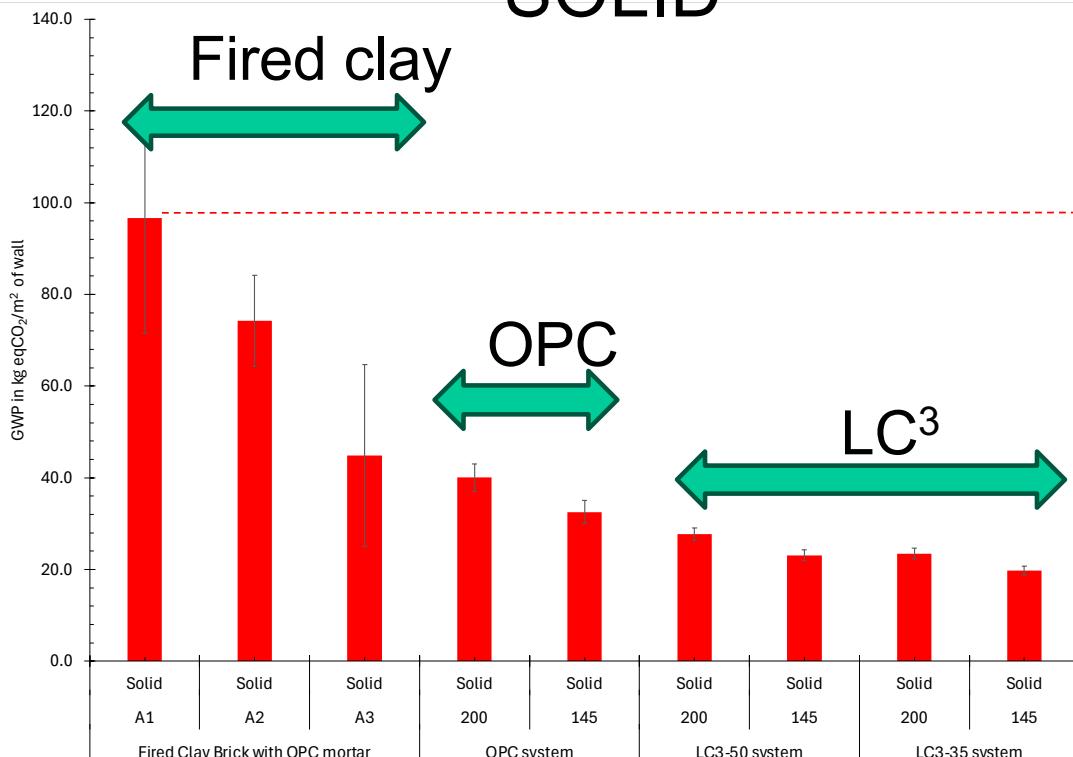
---

# Concrete blocks

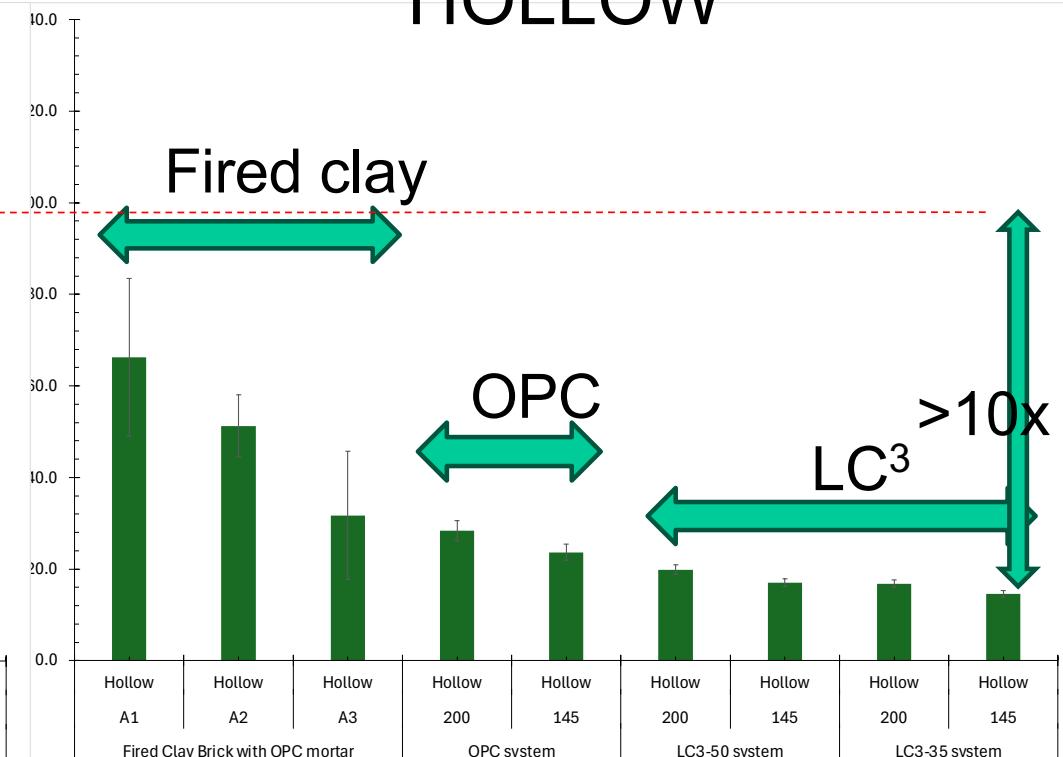




## SOLID



## HOLLOW



A1: Africa Traditional kiln & Down Draught kiln;  
A2: Fixed Chimney Bull's Trench kiln & Tunnel kiln;  
A3: Vertical Shaft kiln, Zig-zag kiln & Hybrid Hoffman kiln;

A2: Fixed Chimney Bull's Trench kiln & Tunnel kiln;  
200 & 145: Cement content in kg/m<sup>3</sup>

A1: Africa Traditional kiln & Down Draught kiln;  
A3: Vertical Shaft kiln, Zig-zag kiln & Hybrid Hoffman kiln;

A2: Fixed Chimney Bull's Trench kiln & Tunnel kiln;  
200 & 145: Cement content in kg/m<sup>3</sup>

## 9. L'essentiel

---

- **A quel moment peuvent être ajoutés ces matériaux cimentaires?**
- **Quels sont les matériaux principaux de substitutions?**
- **Quels sont les avantages d'utiliser des matériaux substituts au ciment Portland?**
- **Pourquoi utiliser des ciments ternaires?**
- **Jusqu'à quel pourcentage peut-on remplacer le ciment Portland? Pourquoi?**

## 9. L'essentiel

---

- **Quelles nouvelles propriétés le béton acquiert-il avec les matériaux substituts?**
- **Quelles sont les 3 grandes catégories de matériaux substituts? A quoi correspondent-elles?**

# Pour aller plus loin

---

## **Laitier de haut fourneau**

Entreprise Ecocem (France)

<http://www.ecocem.fr/produits/>

## **Argile calcinée et calcaire**

[www.lc3.ch](http://www.lc3.ch)

<https://actu.epfl.ch/news/un-nouveau-ciment-ecologique-pour-repondre-aux-bes/>

## **!Projet EPFL!**

[https://www.ted.com/talks/karen\\_scrivener\\_a\\_concrete\\_idea\\_to\\_reduce\\_carbon\\_emissions?language=fr](https://www.ted.com/talks/karen_scrivener_a_concrete_idea_to_reduce_carbon_emissions?language=fr)

## **Les fillers**

bci-001\_1995\_63\_\_142\_d.pdf

Guide pratique du béton - Holcim