

---

# 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: (mécanique) **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  
Fumée de silice  
Pouzzolane (non calcinée)  
Pouzzolane calcinée  
cendres volantes (silice élevée)  
Cendres volantes (chaux élevée)  
Calcaire  
Schistes calcinées

Indicates the main type of cement:

CEM I = Portland cement  
CEM II = Portland-composite cement  
CEM III = blast furnace cement  
CEM IV = pozzolanic cement  
CEM V = composite cement

Indicates the level of constituents:

A = low / B = medium / C = high

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/L = limestone  
- T = burnt shale  
- M = more than one constituent

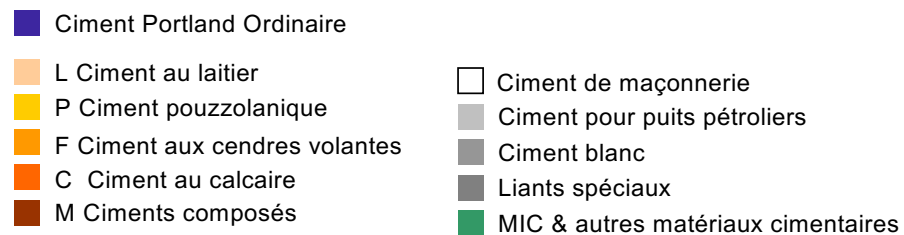
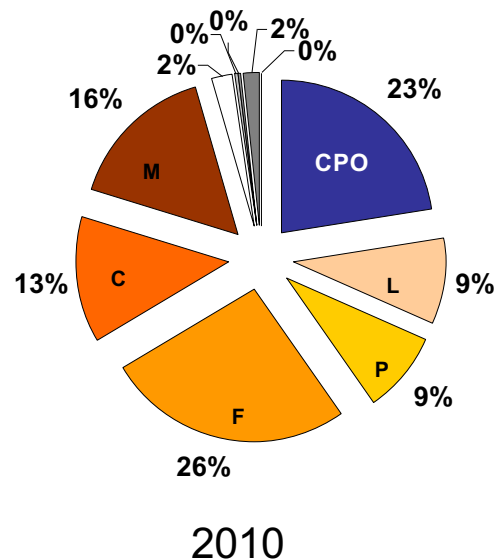
Indicates strength class (32.5 / 42.5 / 52.5)

N for normal early strength  
R for rapid early strength

**Example:**

# 1. Pourquoi substituer le Ciment Portland?

Types de ciments produits par Holcim



Source, Holcim

En suisse

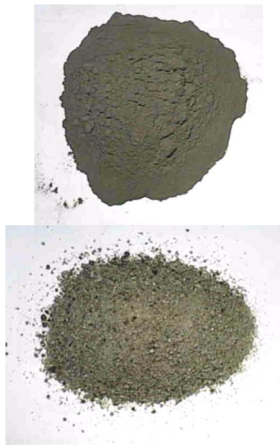
Type de ciment	Livraison 2018 (source: cemsuisse)
CEM II / A-LL 42.5N	32%
CEM II / B-M(T-LL) 42.5N (Optimo)	57.7%
CEM I 42.5 N (Normo 4)	7.6%
CEM I 52.5R (Normo 5)	

# 1. Pourquoi substituer le Ciment Portland?

---

Addition au béton lors du malaxage en centrale:

Additions



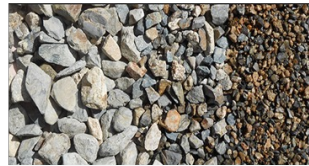
+

Ciment



+

Granulats



+

Eau



+

Adjuvants



## 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

pouzzolanique

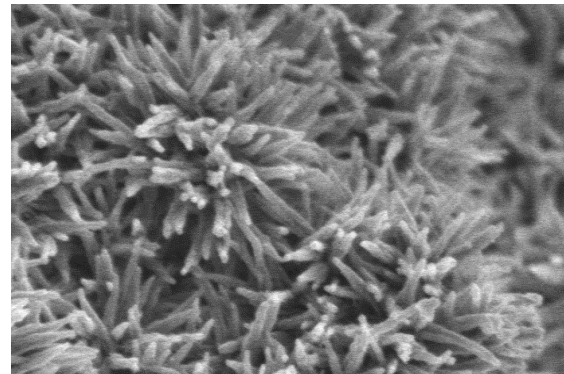
ou

Hydraulique

Réagissent et forment du

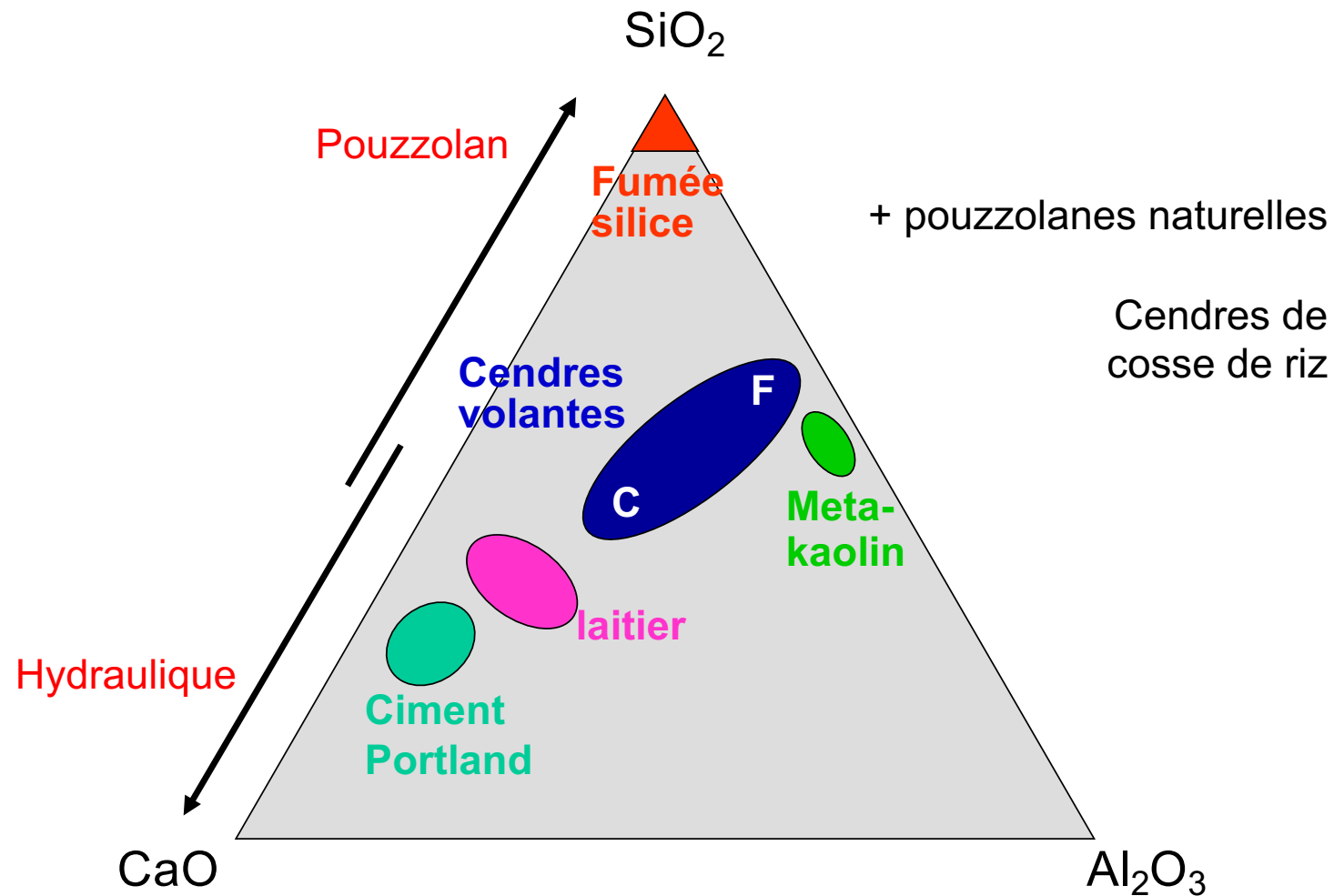
**C-S-H**

= comme le ciment Portland  
mais plus lentement



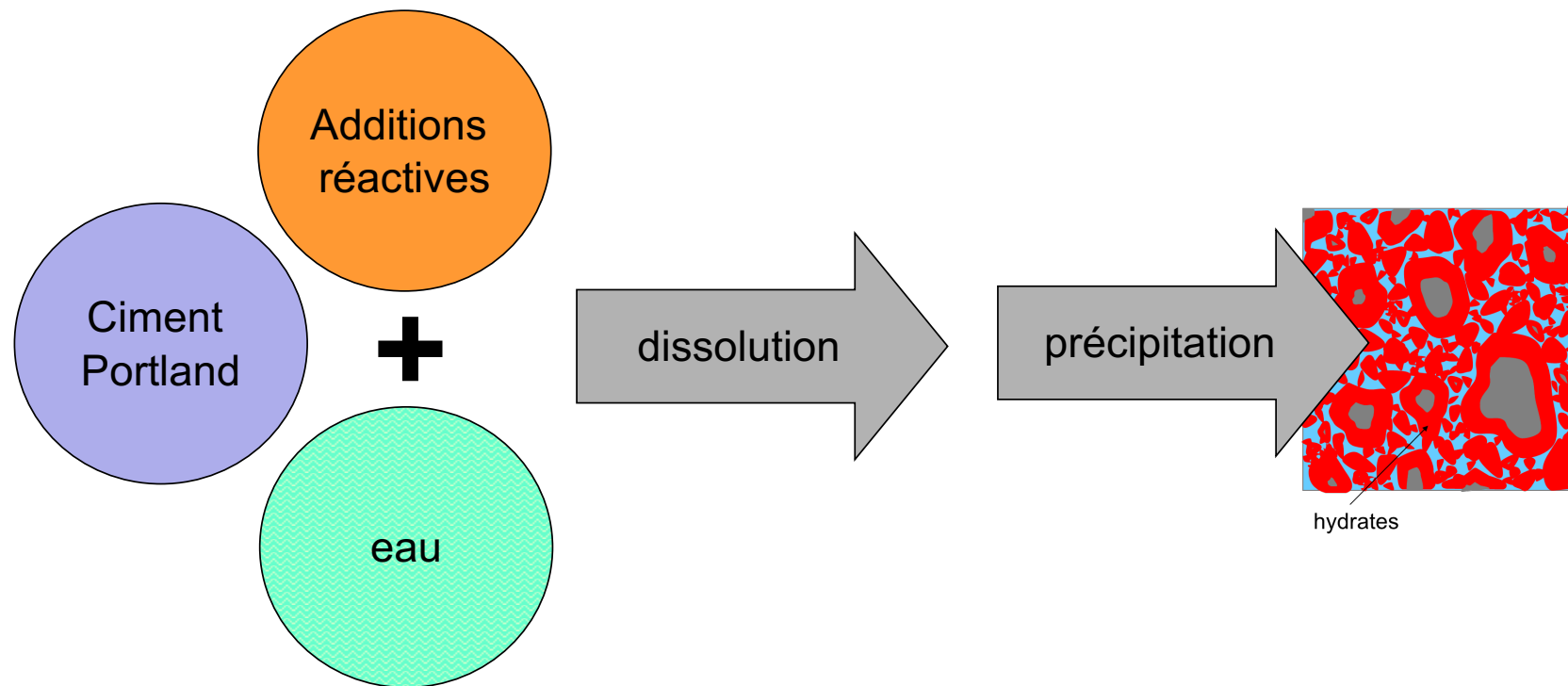
**C**alcium **S**ilicate **H**ydrates

## 2. Les propriétés nécessaires



## 2. Les propriétés nécessaires

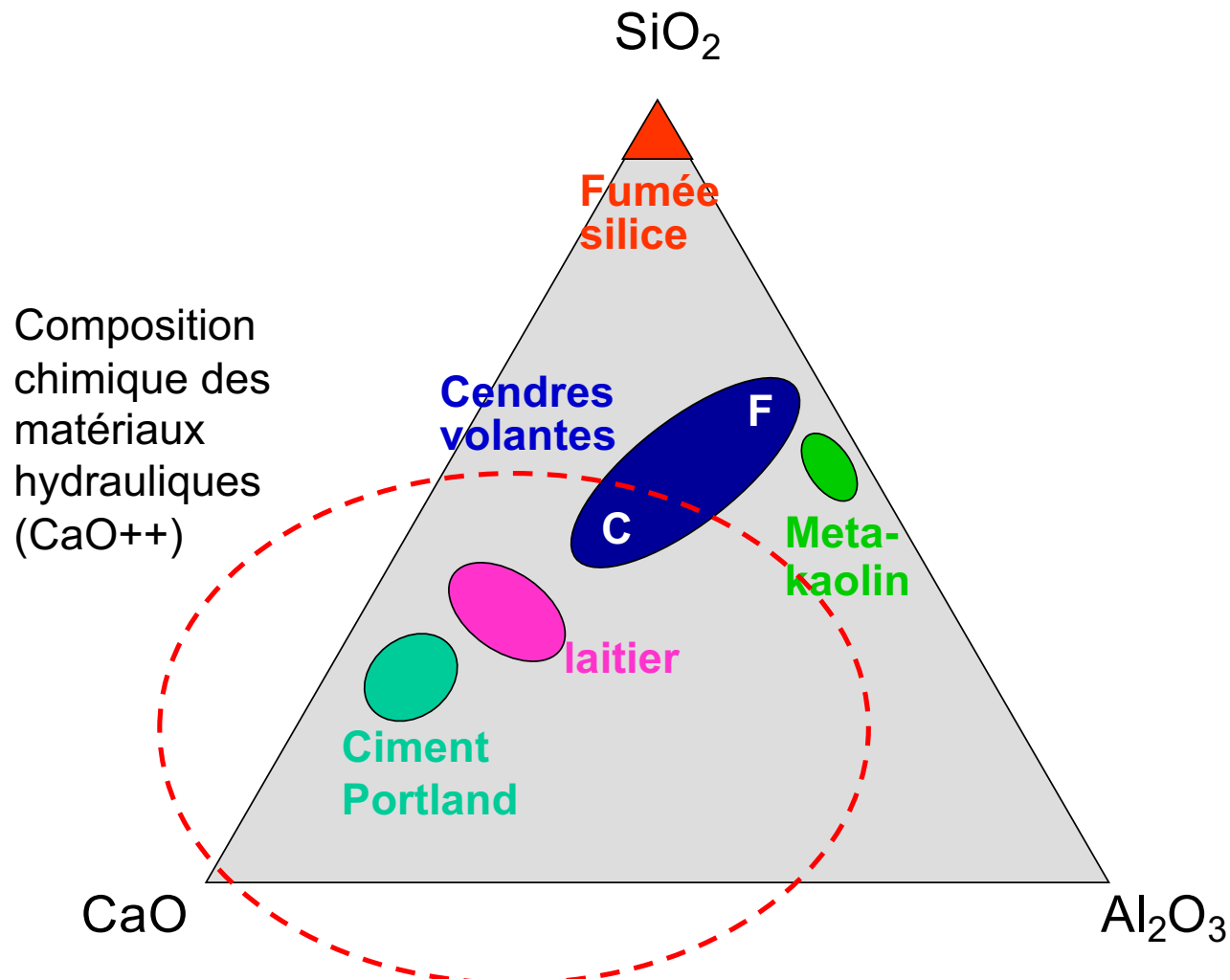
---





### 3. Les matériaux hydrauliques

---



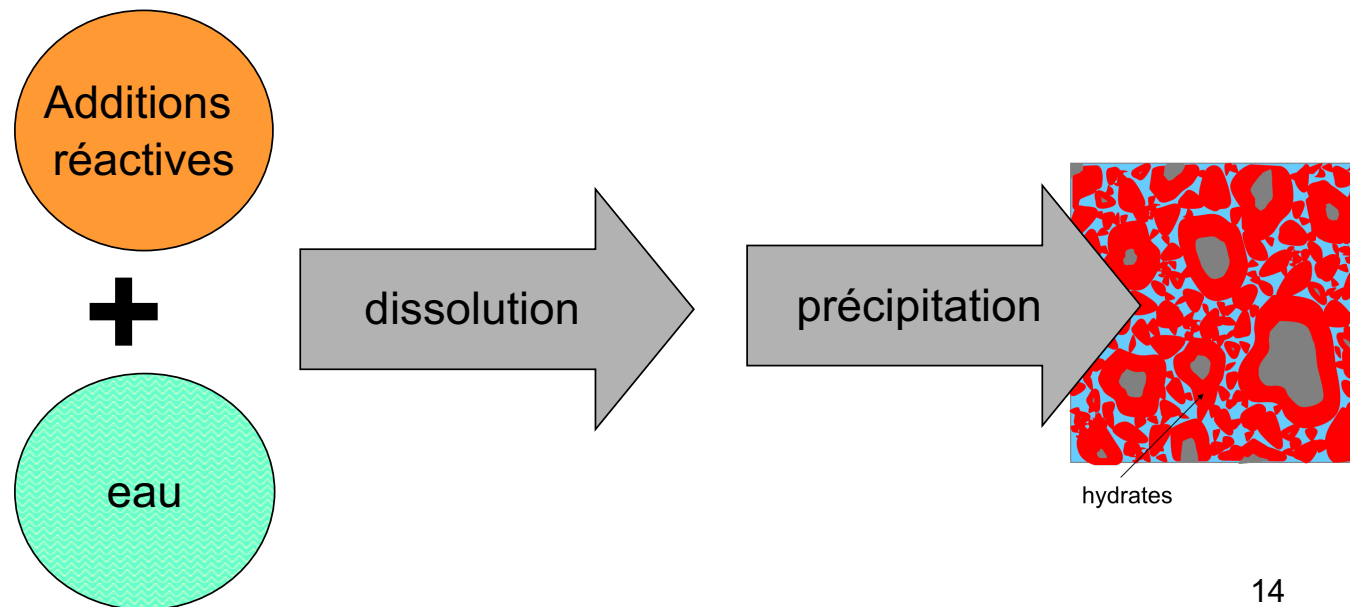
### 3. Les matériaux hydrauliques

---

Réaction **hydraulique**:

Addition réagit avec l'eau pour former des hydrates

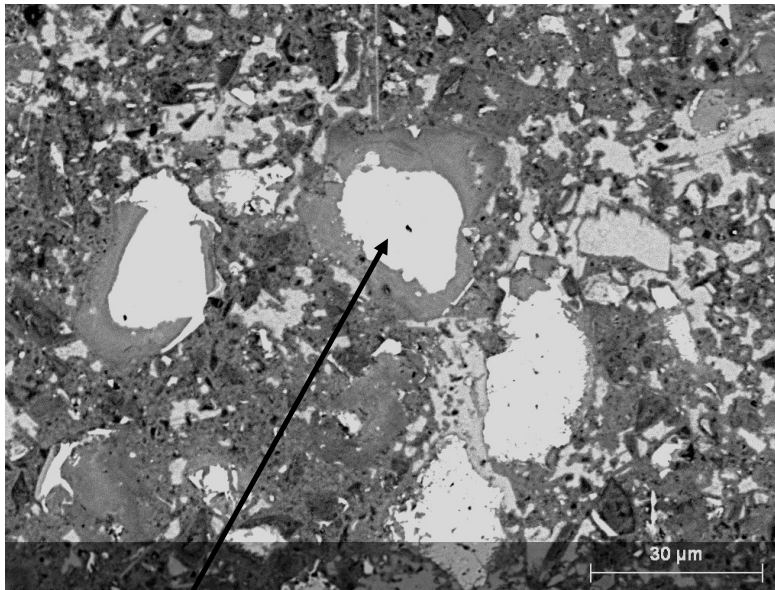
Le ciment est un matériau hydraulique



### 3. Les matériaux hydrauliques

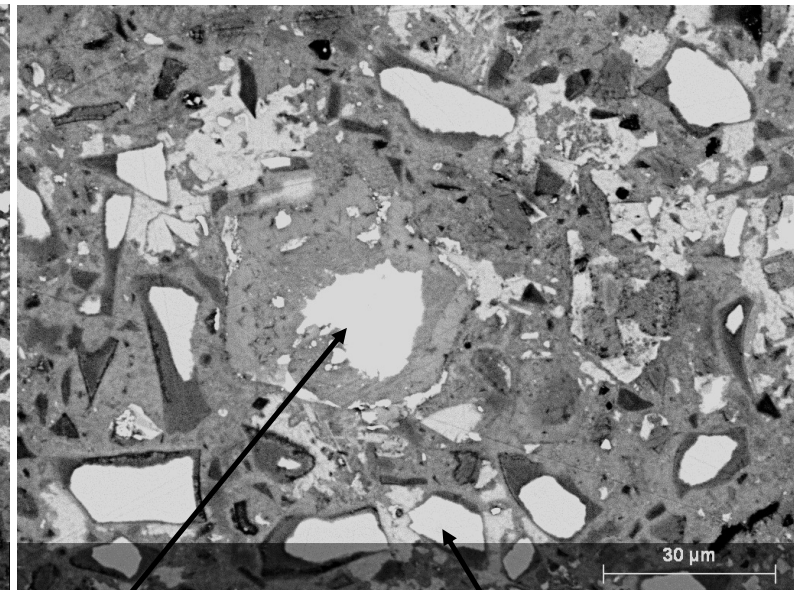
---

100% Ciment Portland  
hydraté



Grain de ciment  
hydraté

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



Grain de ciment  
hydraté

Additions  
hydrauliques

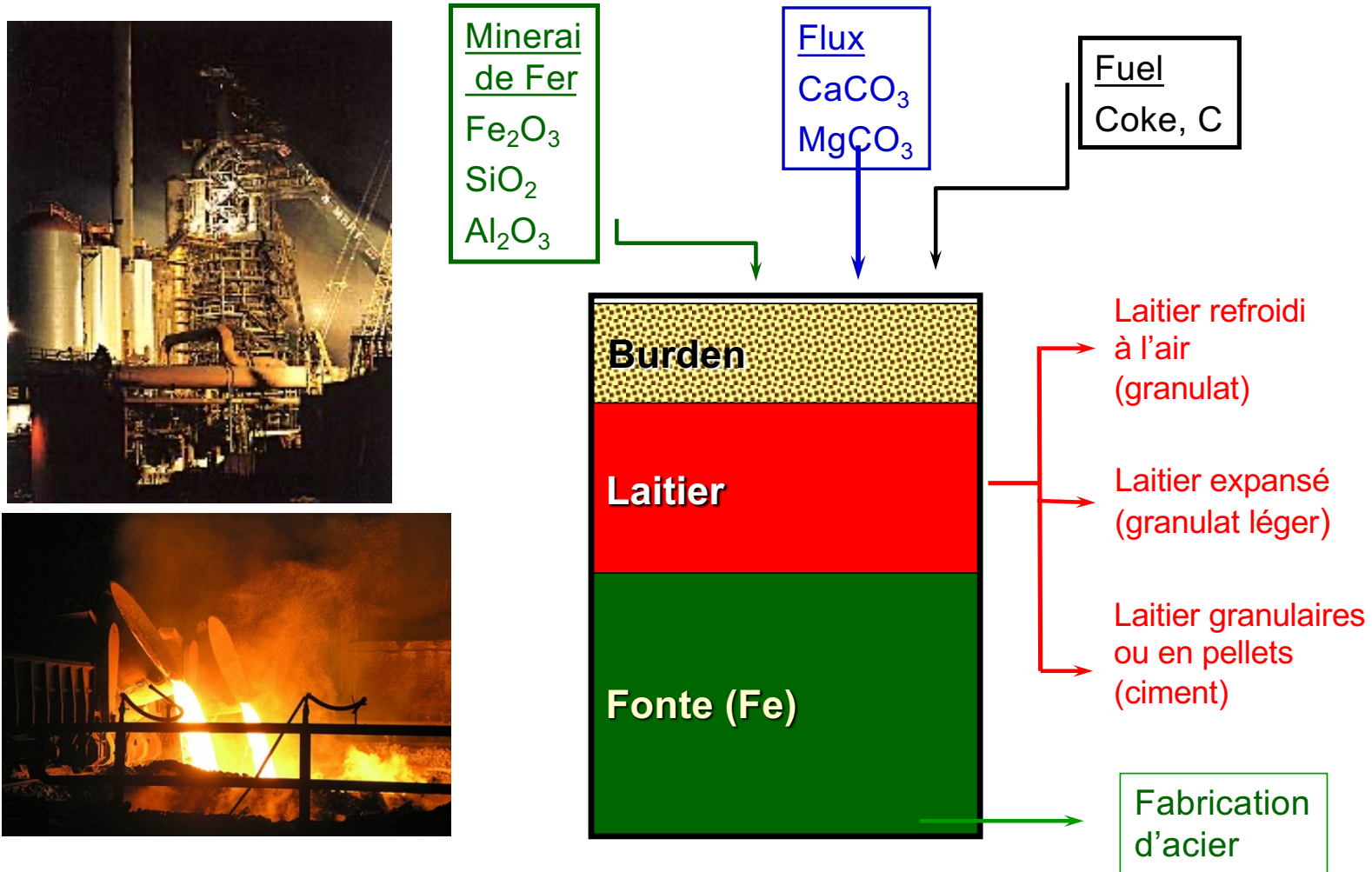
### 3. Les matériaux hydrauliques

---

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

Le Laitier de haut fourneau

## 3.1. Laitier de haut fourneau

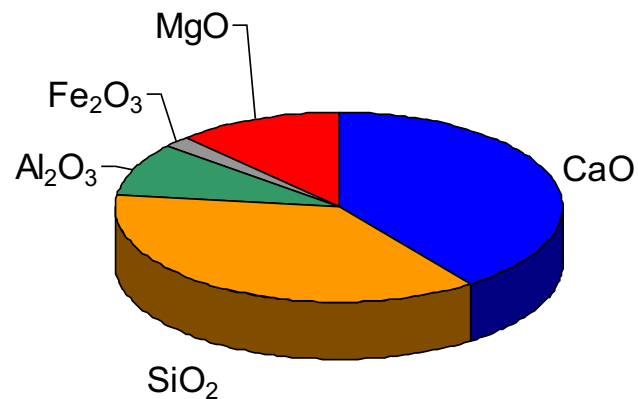


## 3.1. Laitier de haut fourneau

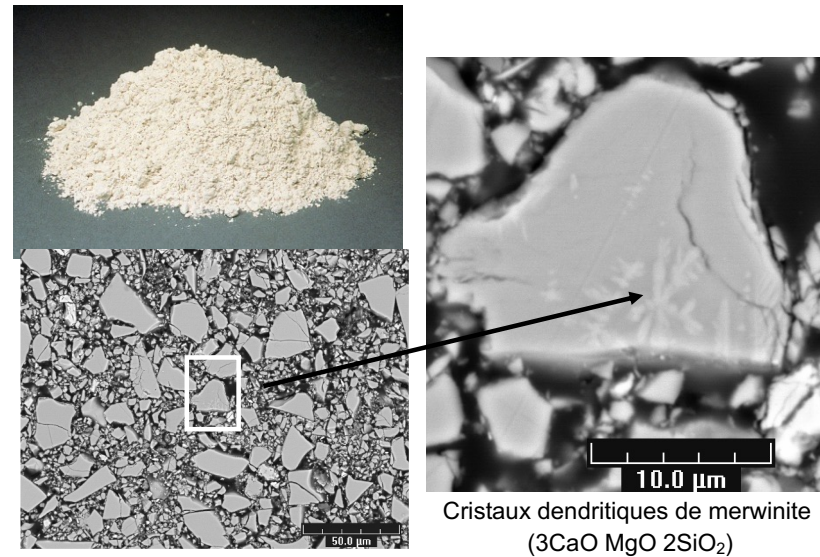
Le laitier de haut fourneau granulé moulu (Ground Granulated Blast-Furnace Slag ou GGBS) est un matériau vitreux, sous-produit formé par les scories fondues produites dans les hauts fourneaux pour la production de fer utilisé servant à la fabrication de l'acier.

Le laitier rapidement refroidi a typiquement des propriétés hydrauliques latentes

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



Composition chimique typique



## 3.1. Laitier de haut fourneau

---

Dû à sa forte teneur en  $\text{CaO}$  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	
<b>I</b>	Portland	<b>I</b>	<b>95-100</b>	<b>0</b>	<b>0-5</b>
<b>II</b>	Portland au laitier	<b>II / A-S</b> <b>II / B-S</b>	<b>80-94</b> <b>65-79</b>	6-20 21-35	0-5 0-5
	Portland à la F.S.	<b>II / A-D</b>	<b>90-94</b>	6-10	0-5
	Portland au calcaire	<b>II / A-L</b> <b>II / B-L</b>	<b>80-94</b> <b>65-79</b>	6-20 21-35	0-5 0-5
	... etc				
<b>III</b>	Ciment de haut fourneau	<b>III / A</b>	<b>35-64</b>	36-65	0-5
		<b>III / B</b>	<b>20-34</b>	66-80	0-5
		<b>III / C</b>	<b>5-19</b>	81-95	0-5
<b>IV</b>	Ciment pouzzolaniqu e	<b>IV / A</b>	<b>65-89</b>	11-35	0-5
		<b>IV / B</b>	<b>45-64</b>	36-55	0-5
<b>V</b>	Ciment composé (*)	<b>V / A</b> <b>V / B</b>	<b>40-64</b> <b>20-39</b>	36-60 61-80	0-5 0-5



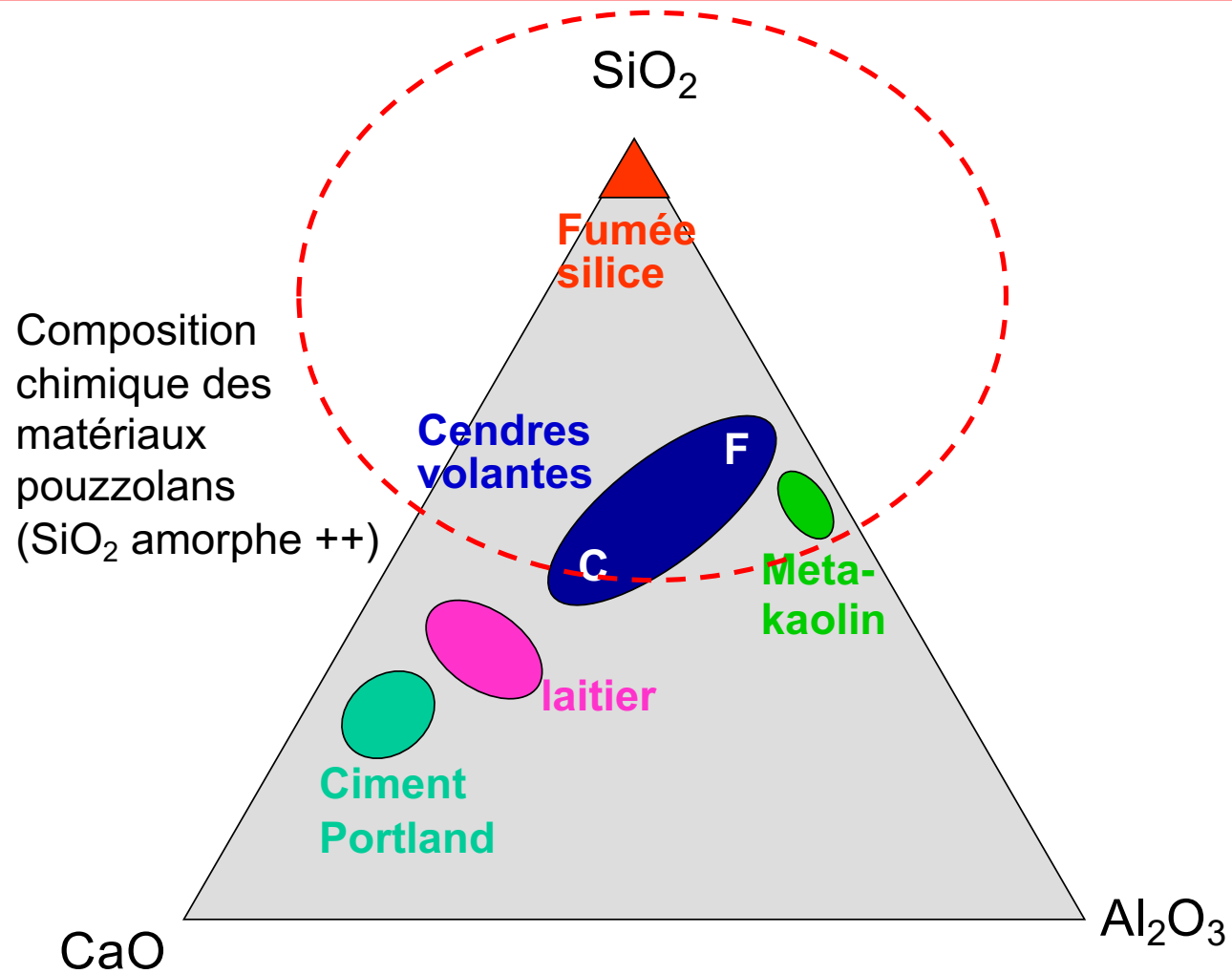
**III**

**30-95%**  
de  
substitution



### 3. Les pouzzolans

---



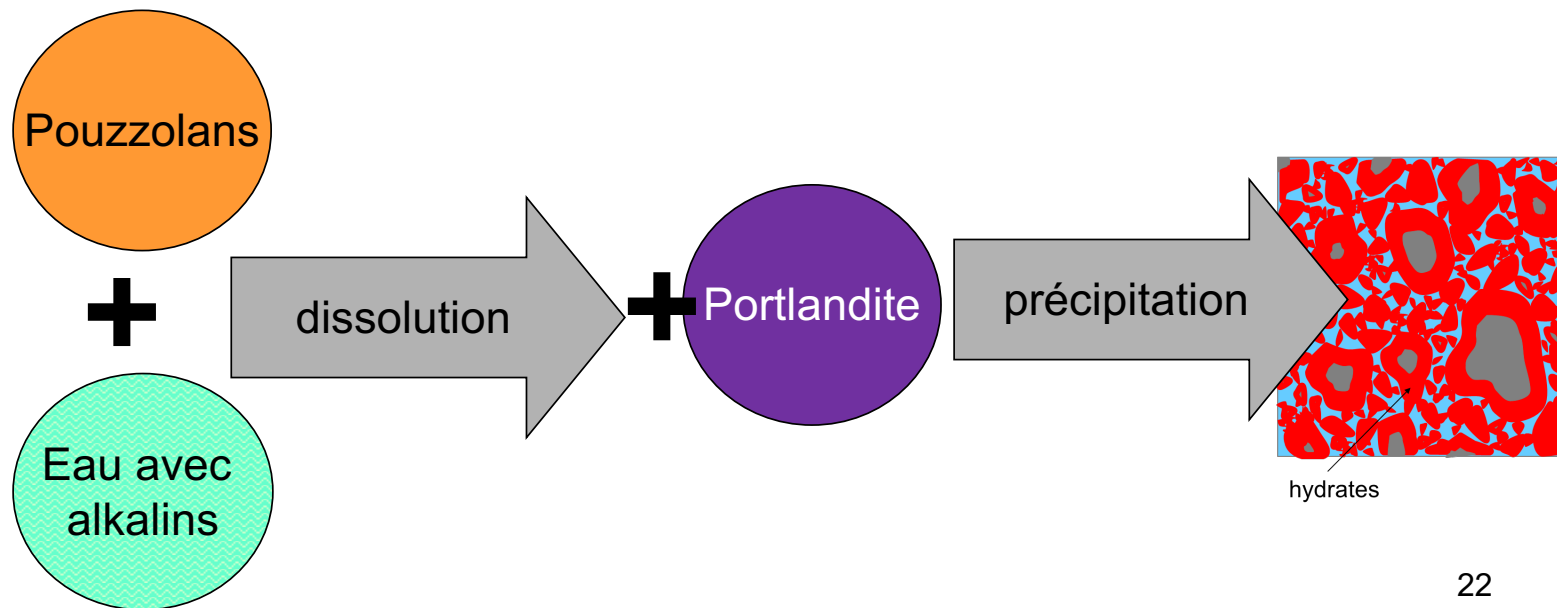
### 3. Les pouzzolans

---

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)**

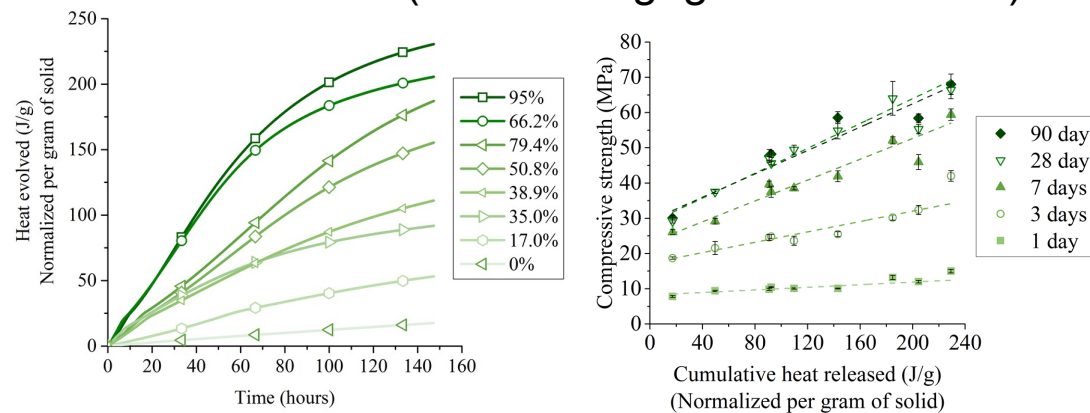
## 4. Les pouzzolans

Tous les pouzzolans n'ont pas la même réactivité

→ Dernier **test de réactivité chimique de pouzzolanité**  
**R3: ASTM C1897**

Mélange de  
Portlandite / Matériau Pouzzolan (+Calcaire)

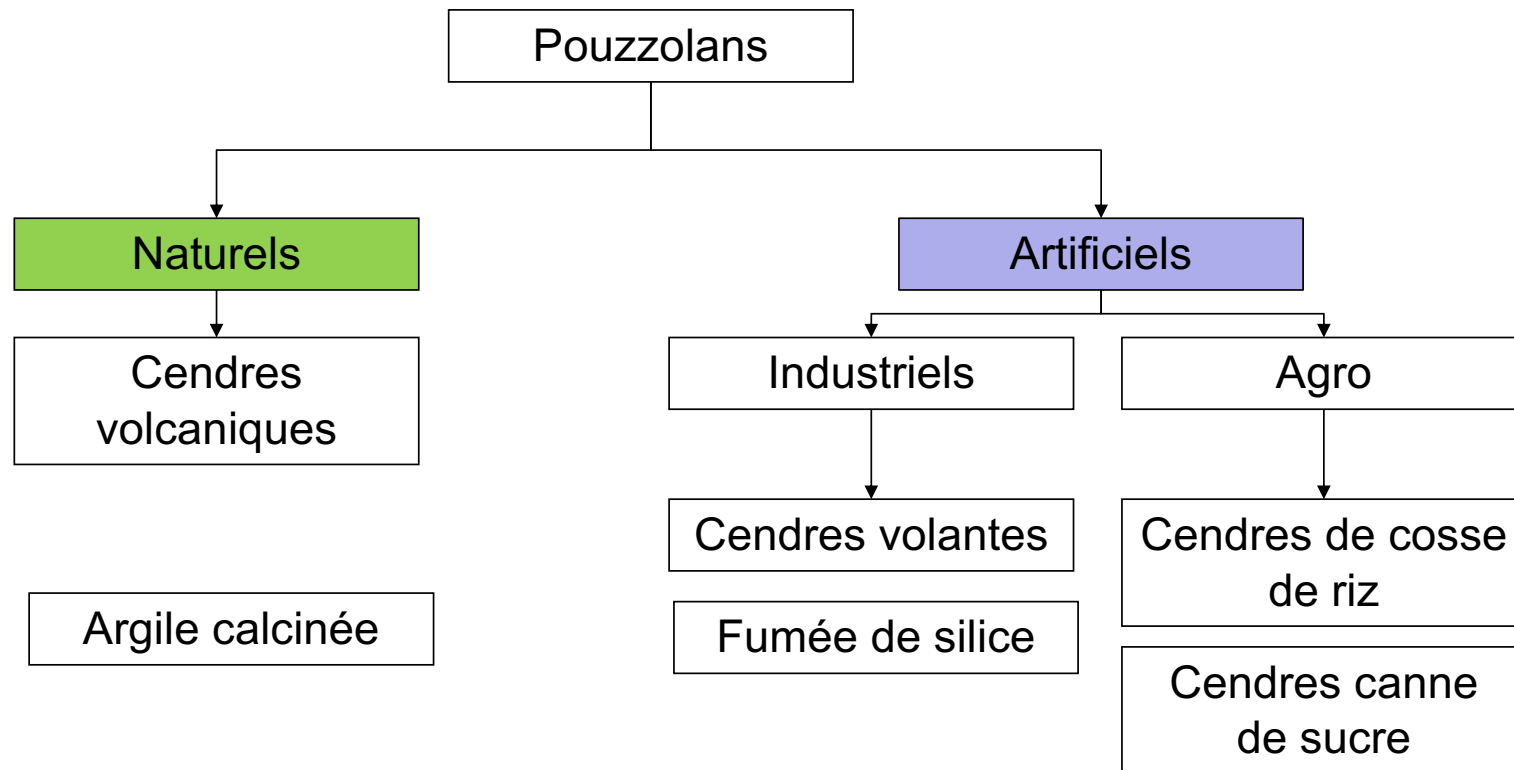
Méthode: Calorimétrie (chaleur dégagée en continue)



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

---



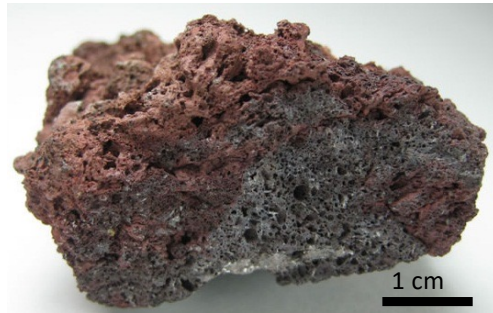
Les volcans produisent des cendres riches en verre de silice et alumine.

## 4.1. Les pouzzolans naturels

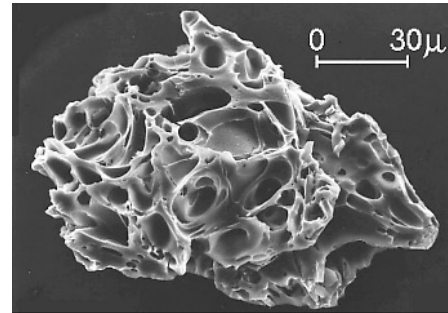
---

### 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



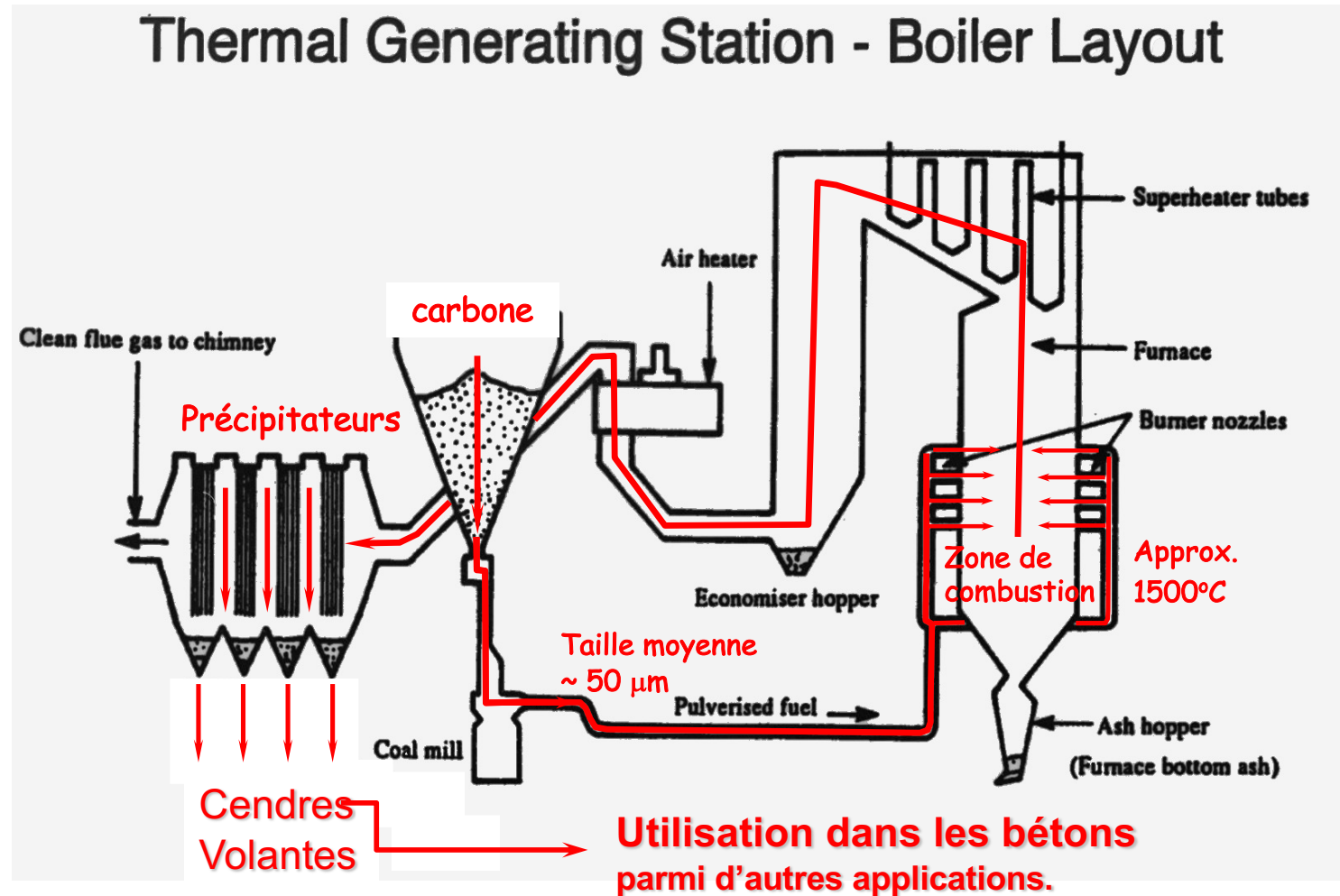
## 4.2. Cendres volantes « Fly ash »

---

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



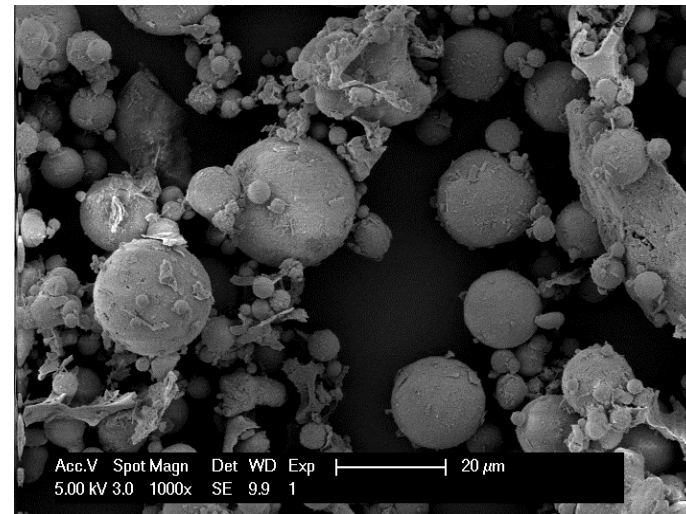
## 4.2. Cendres volantes « Fly ash »



## 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  $\mu\text{m}$ ), 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 »

---

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

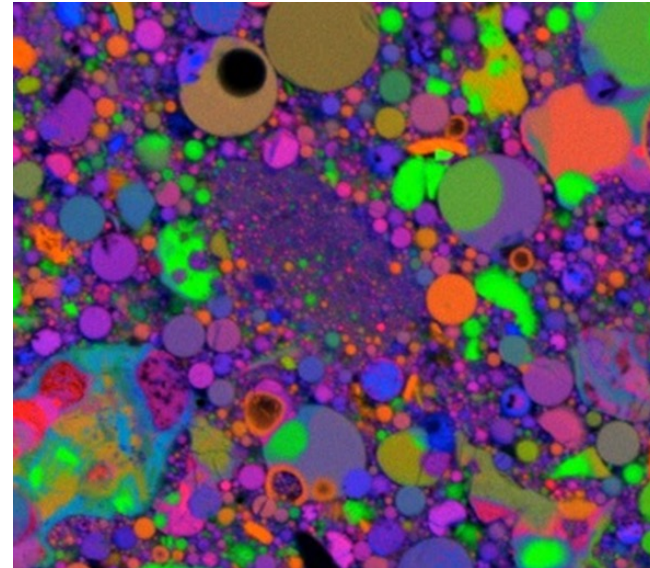
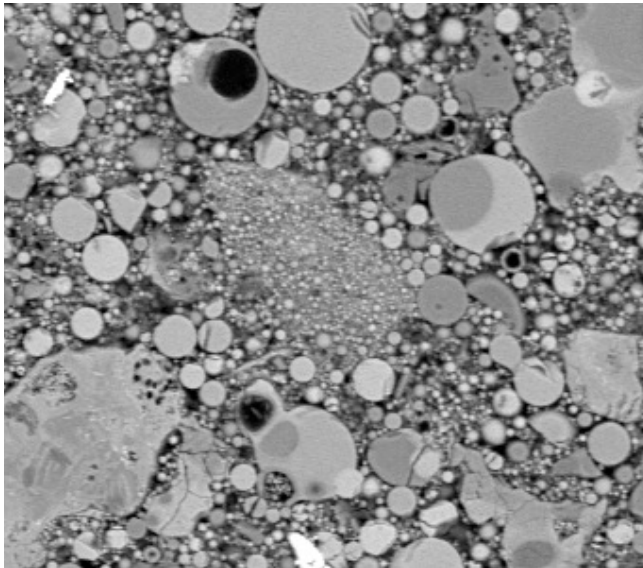
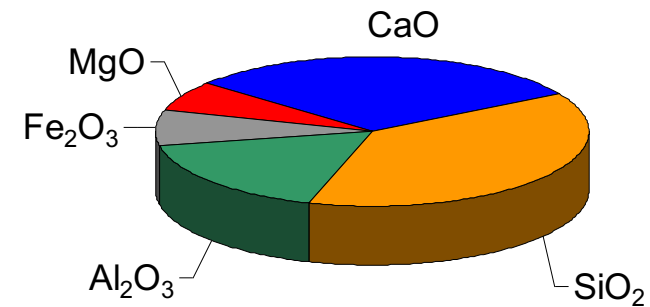
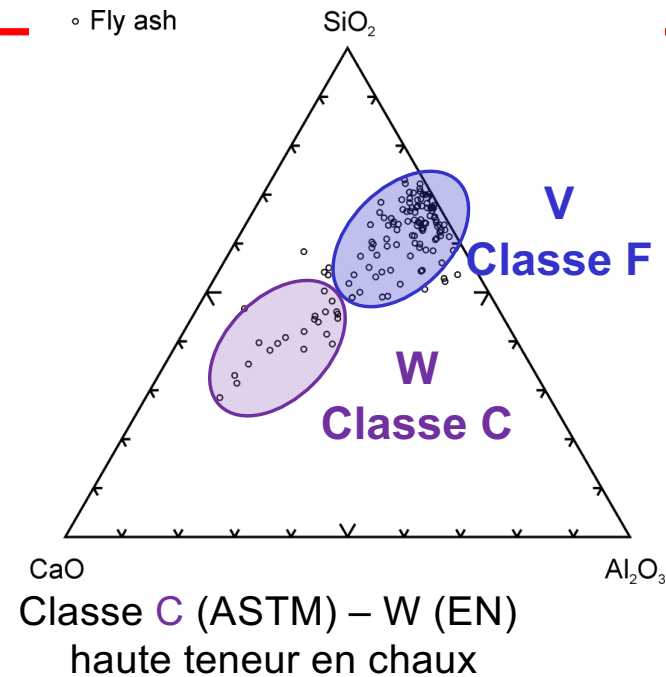
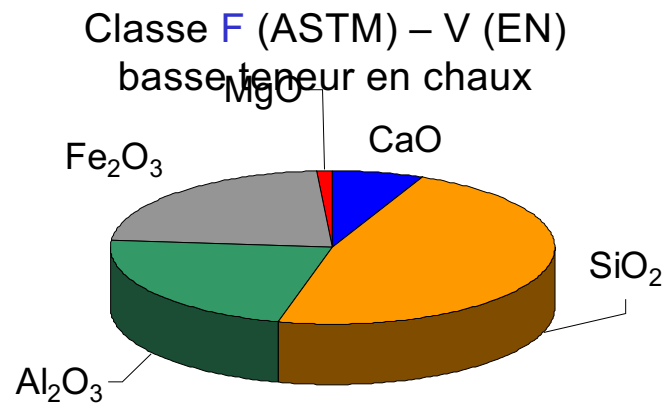


Image “chimique”

## 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 ( $e/l \downarrow$  pour même cône d'Abrams (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

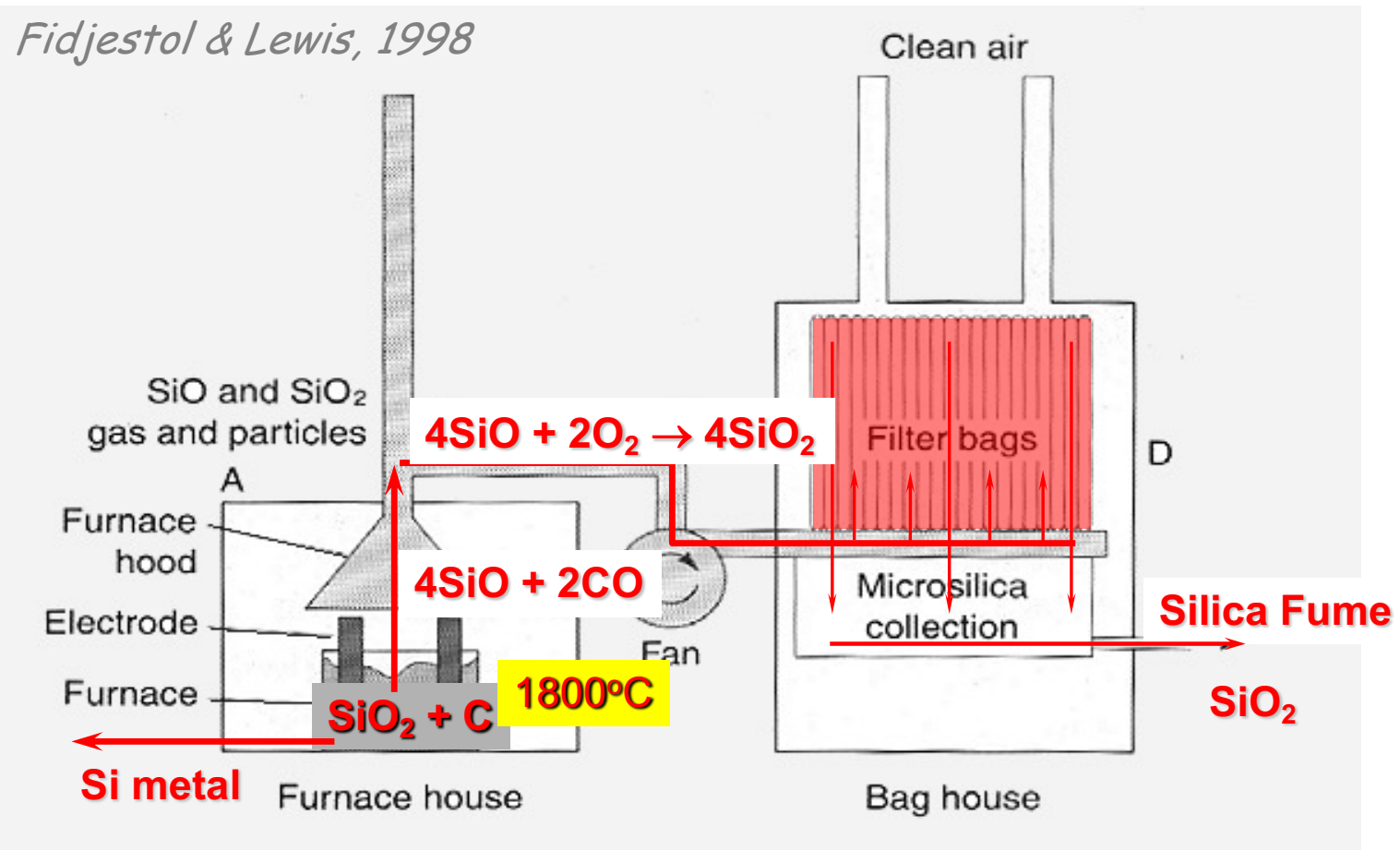
---

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





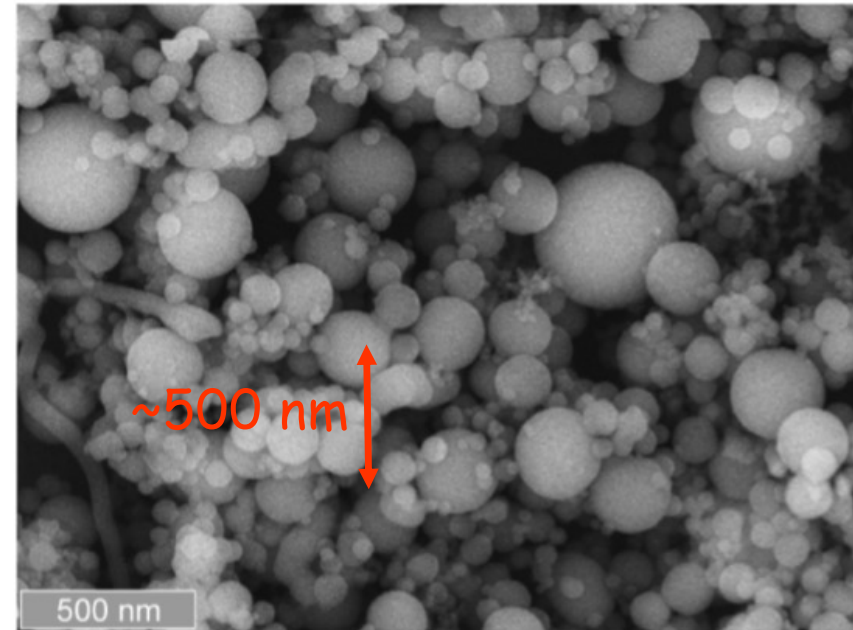
## 4.3. Fumée de silice



## 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**

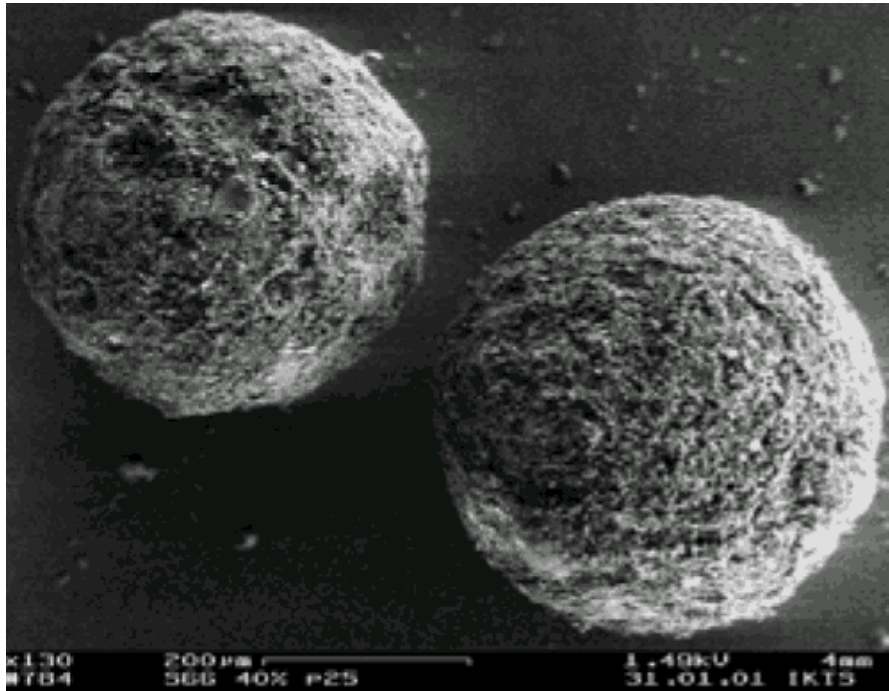
- Au moins 85%  $\text{SiO}_2$
- Basse teneur en carbone
- diamètre moyen des particules: 0.1  $\mu\text{m}$   
(1/100<sup>th</sup> de la taille moyenne d'un grain de ciment)
- Surface spécifique : 15 000  $\text{m}^2/\text{kg}$   
(contre 350  $\text{m}^2/\text{kg}$  pour CPO)



**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

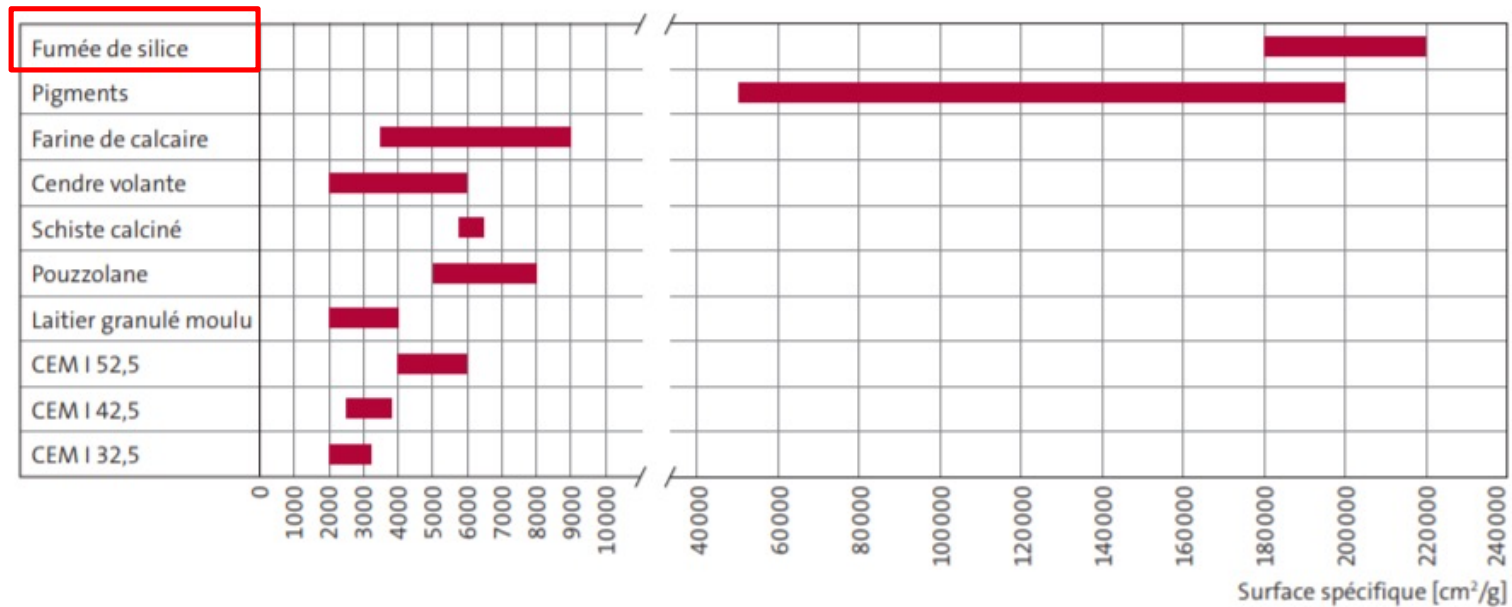
---



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

## 4.3. Fumée de silice

Extremement fines  
particules → impact sur la  
PSD du béton

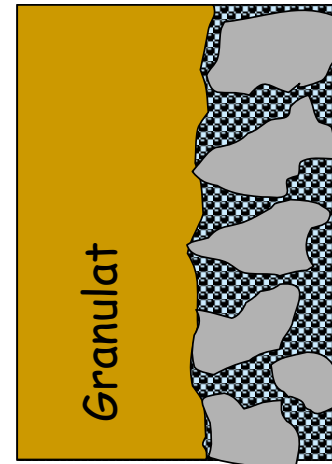
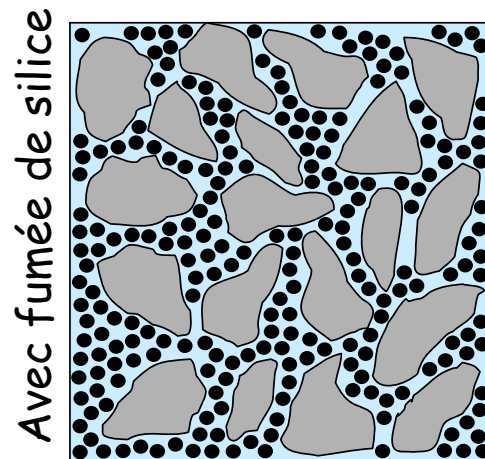
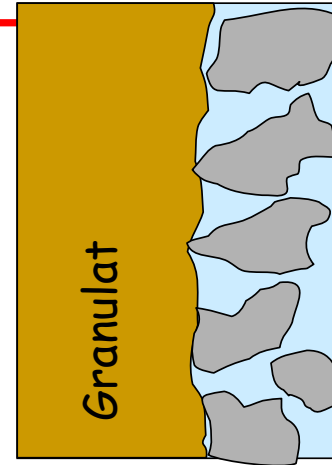
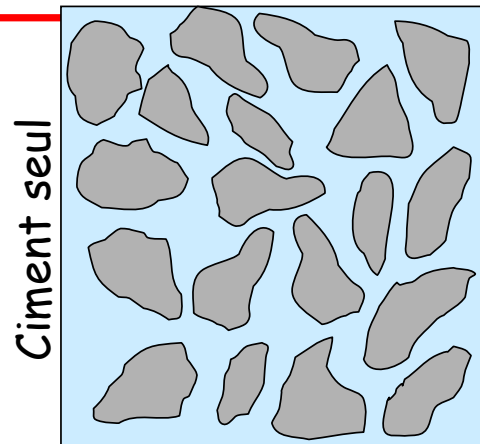


## 4.3. Fumée de silice

---

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

## 4.3. Fumée de silice: Microfillerisation



Amélioration  
de l'interface  
entre  
granulats  
et pâte  
de ciment

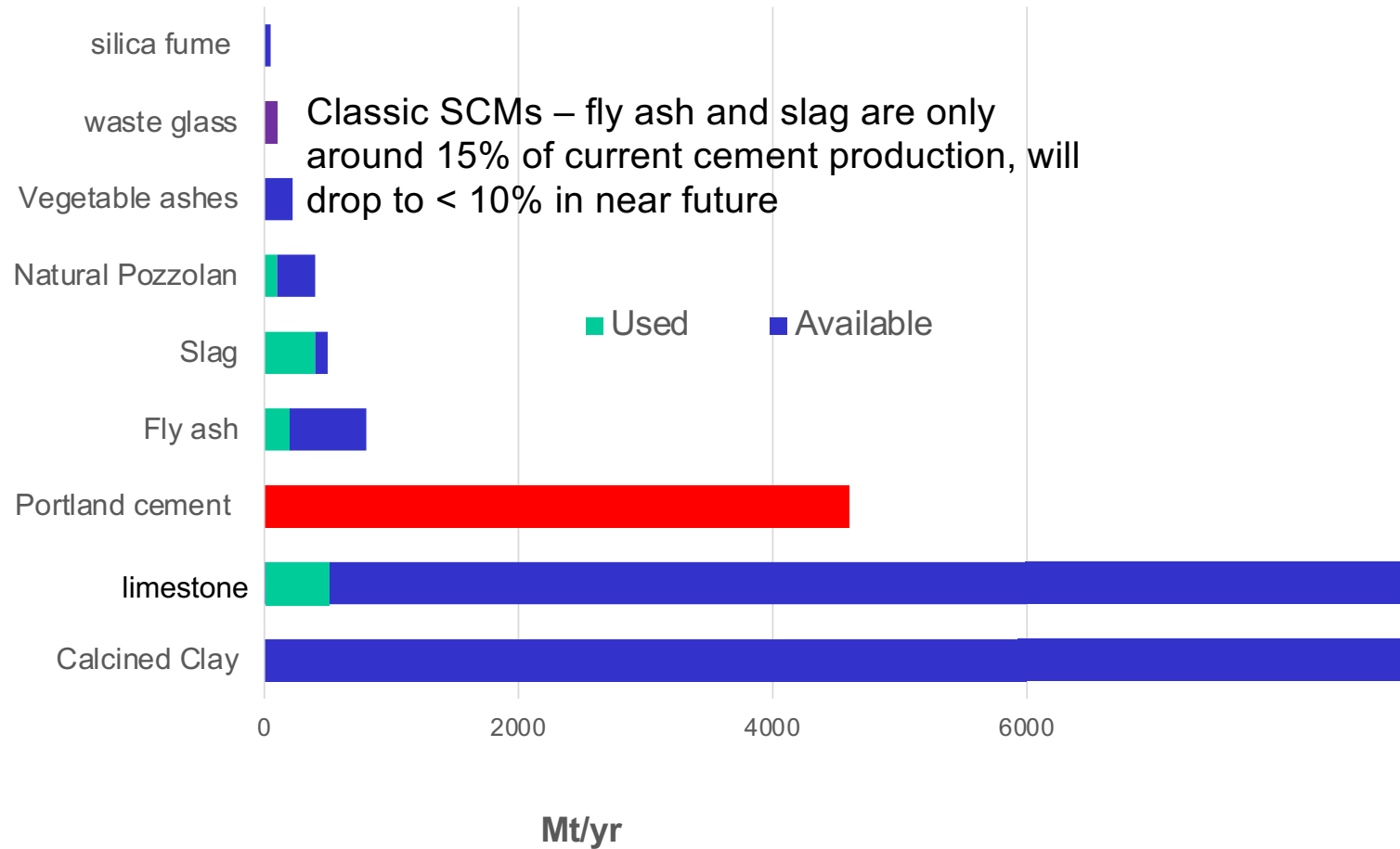
## 4.3. Fumée de silice: Avantages

---

- 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

---





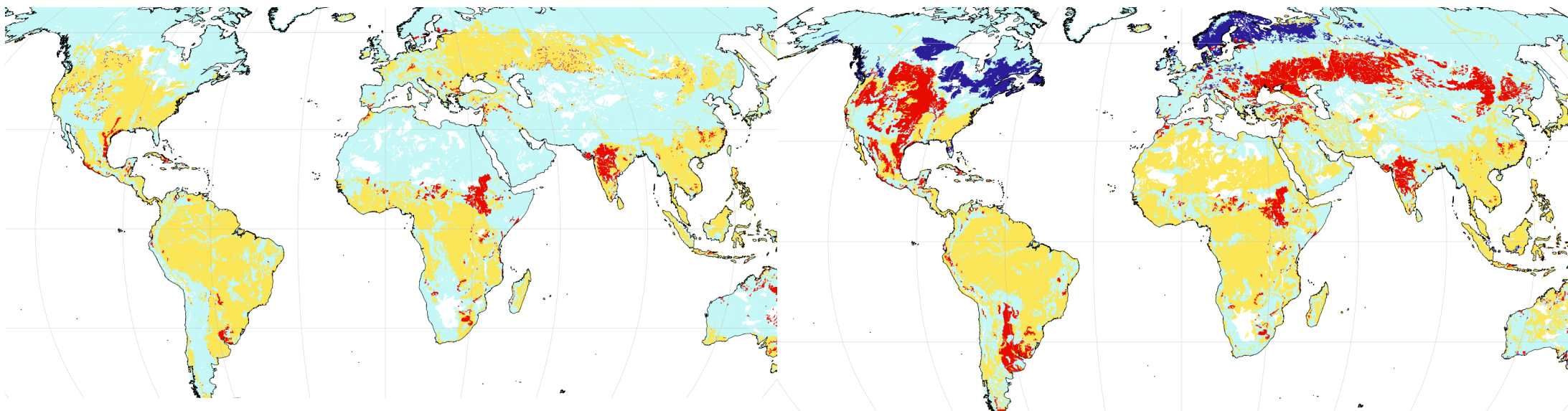
# Distribution of Kaolinitic clays

data 2017

Ito and Wagai, Scientific

0-5m

>5m



Illite/mica

Kaolinite

Smectite

Vermiculite

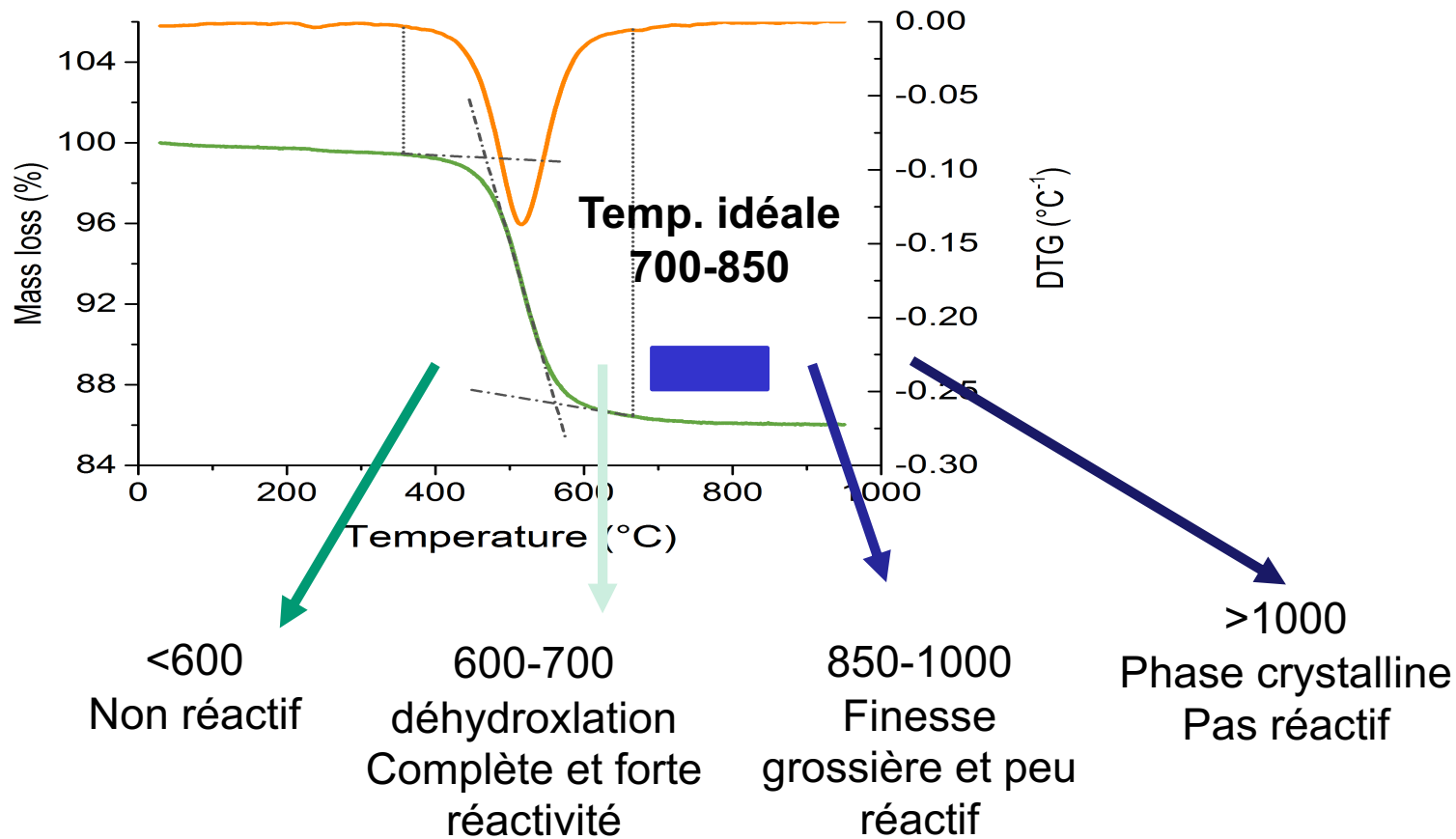
## 4.4. Argile calcinée

---

Rebus d'industrie de céramique



## 4.4. Argile calcinée

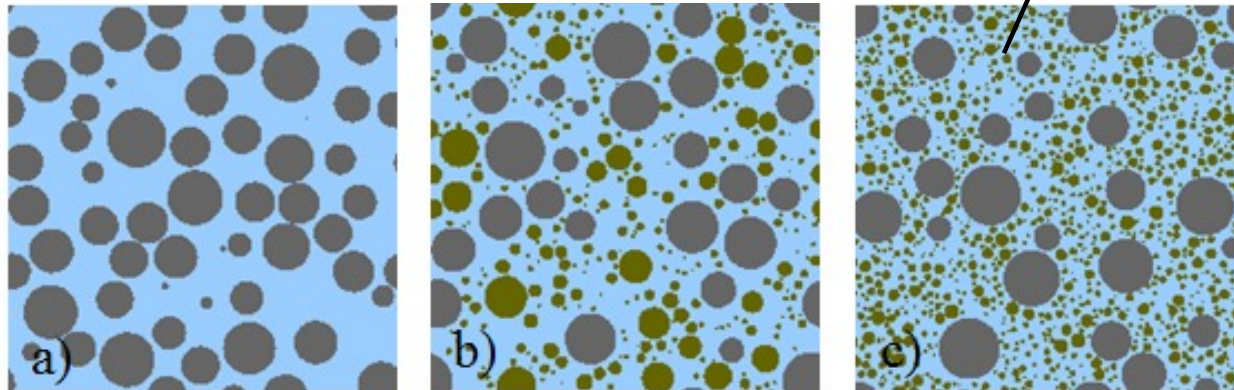


## 5. Les « fillers »

---

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)



Ciment Portland

40% Filler

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.

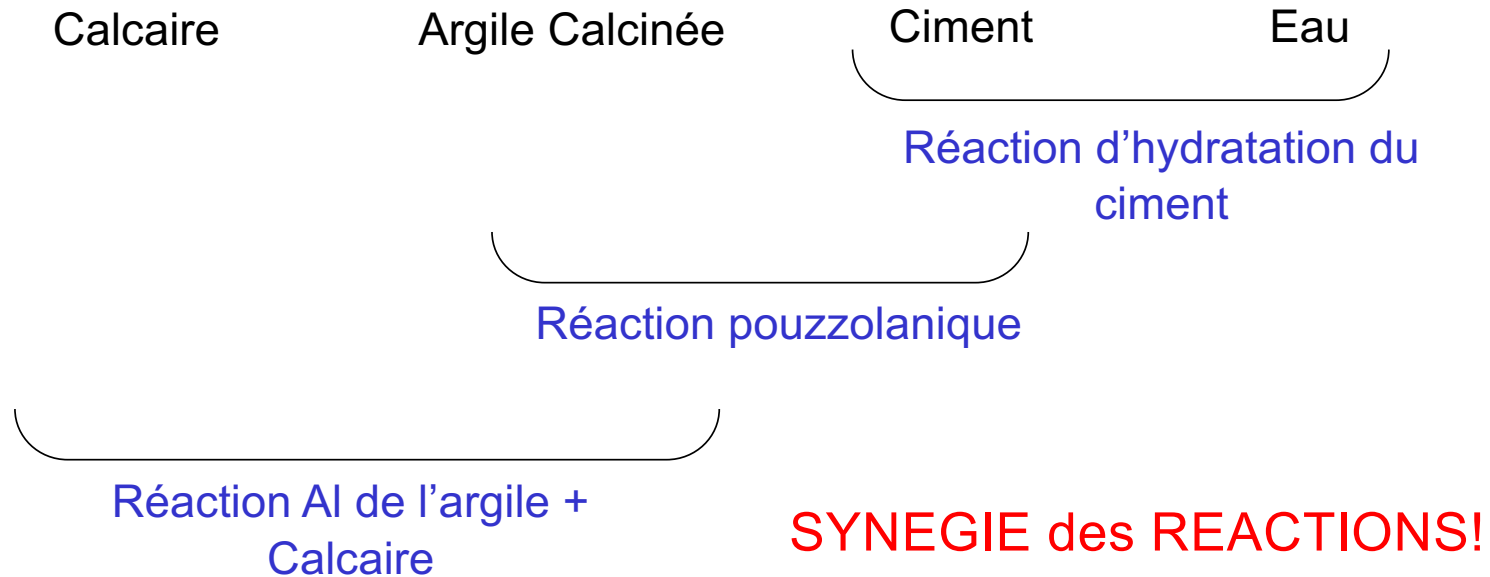
Cette réaction ouvre des portes pour des **ciments “ternaire”** qui se constituent de Ciment Portland + 2 autres additions  
(Mélange binaire : seulement une addition au Ciment Portland)

Exemples:      Ciment Portland + Fly Ash + Calcaire  
                    Ciment Portland + Argile Calcinée + Calcaire

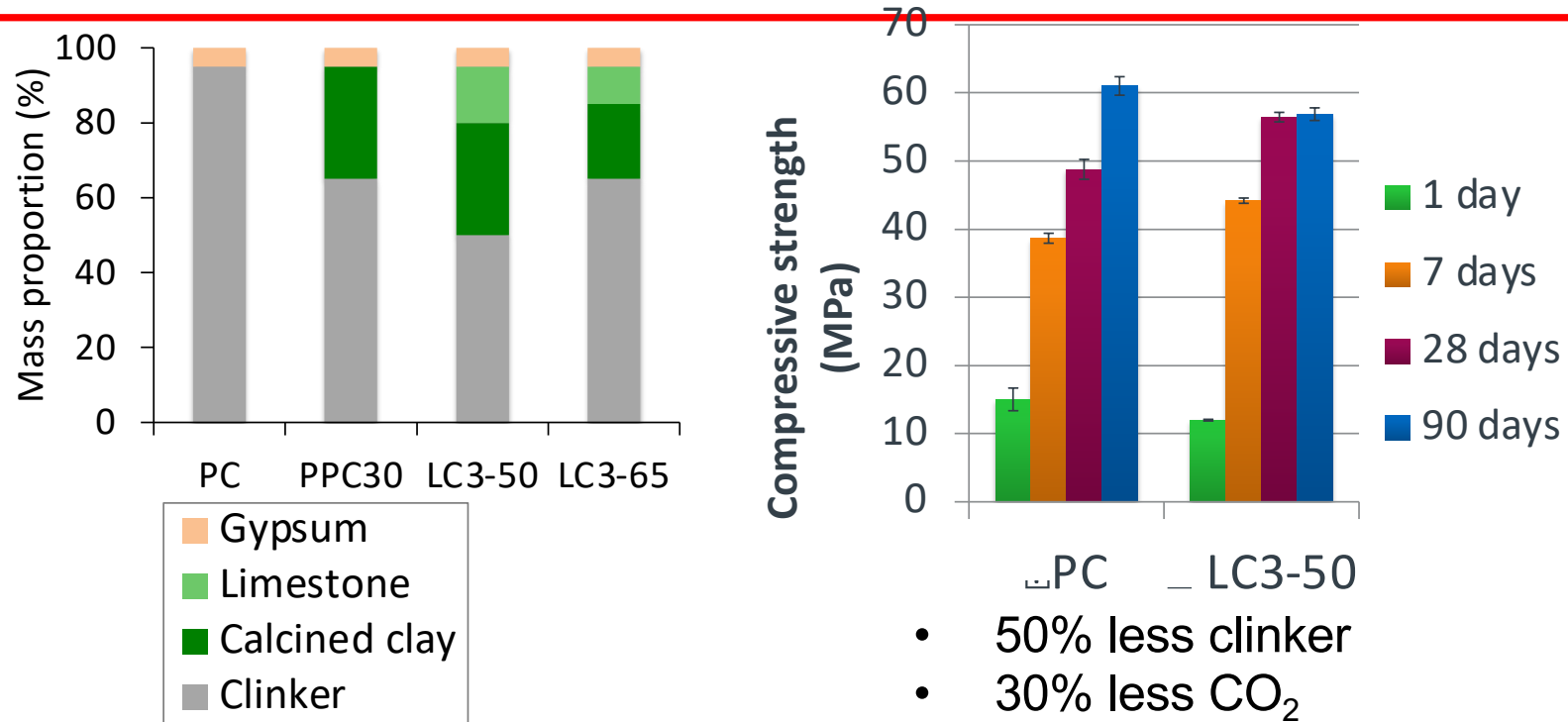
## 6. Les ciments ternaires

---

Exemple: Projet



# LC<sup>3</sup>



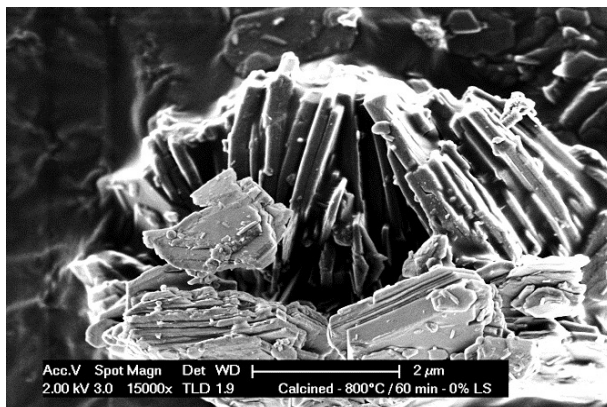
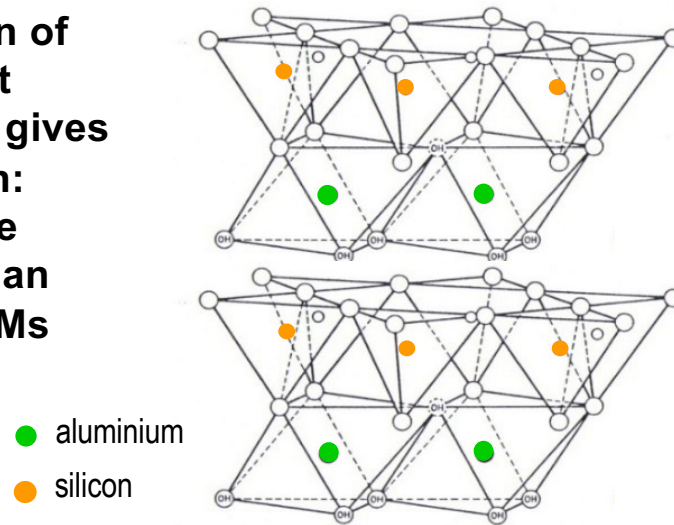
LC<sup>3</sup> is a family of cements, the figure refers to the **clinker** content

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

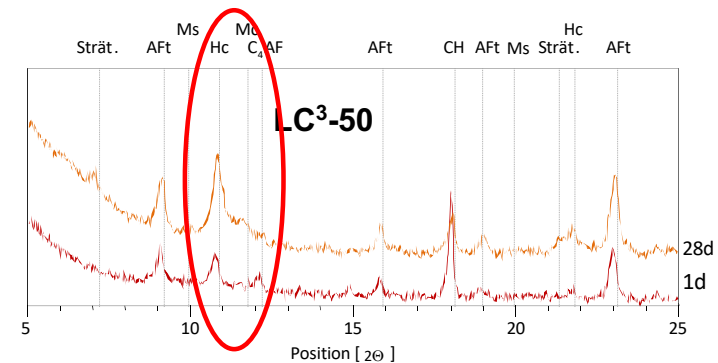
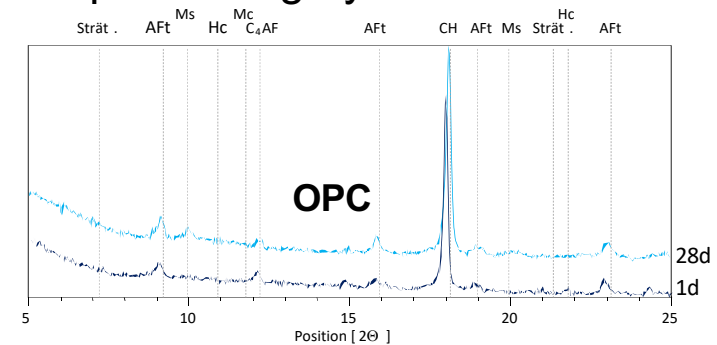


# Why can we get such high replacement levels?

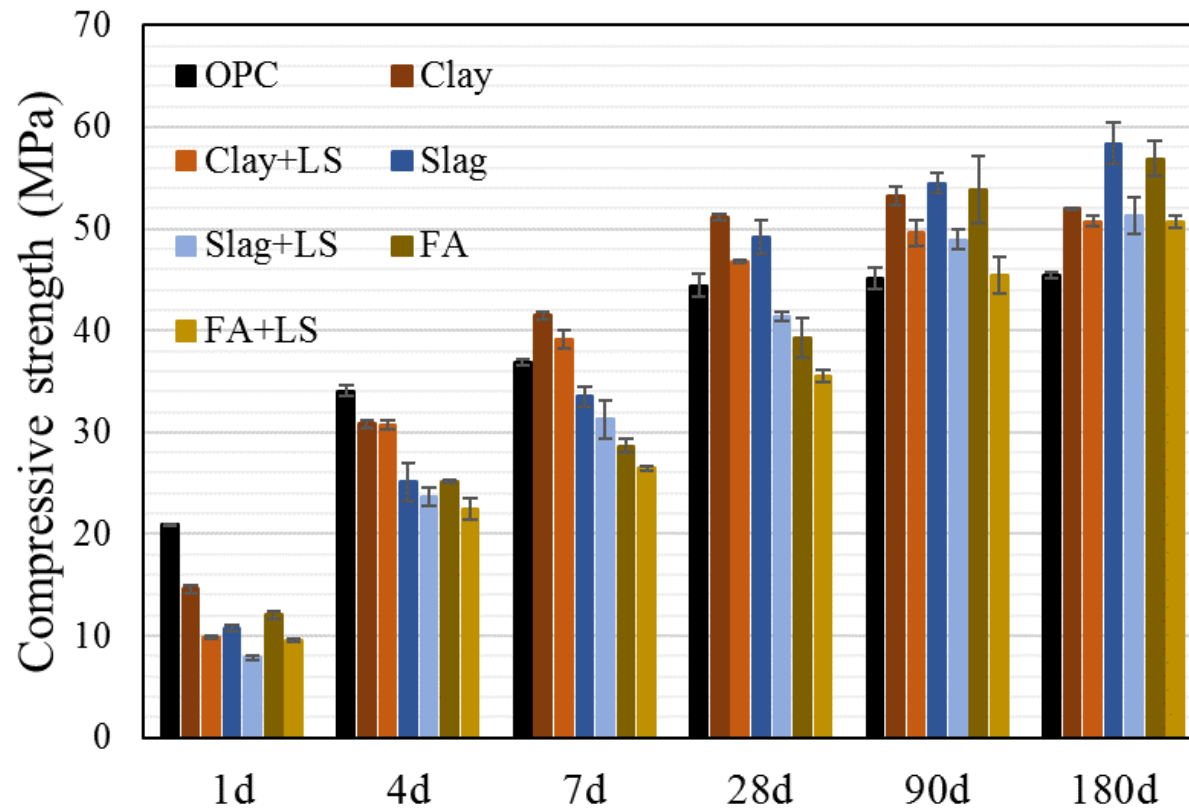
- Calcination of kaolinite at 700-850°C gives metakaolin: much more reactive than glassy SCMs



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



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

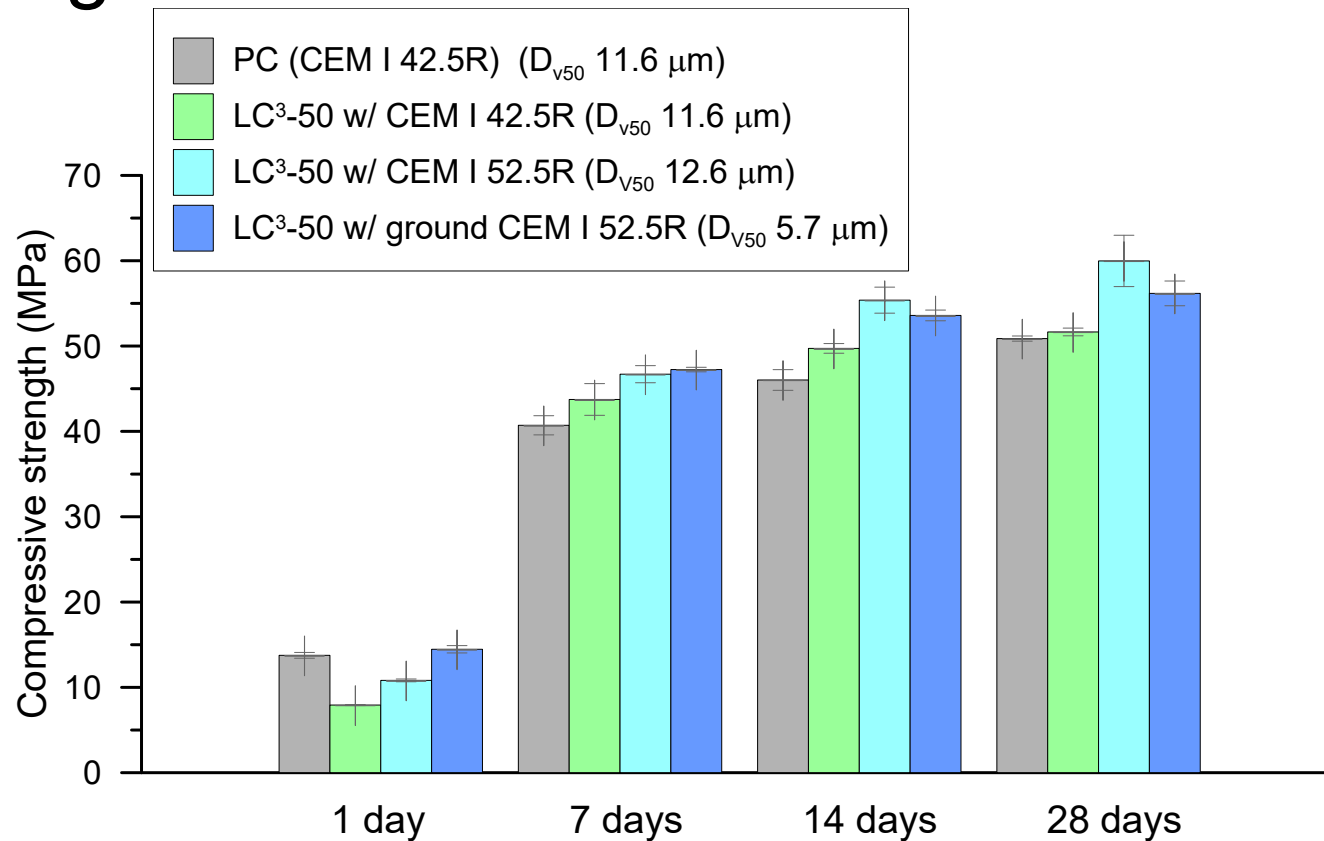


Binary systems 70% clinker, 30% SCM

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

Roadmap ICH/FICEM 20



- 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)

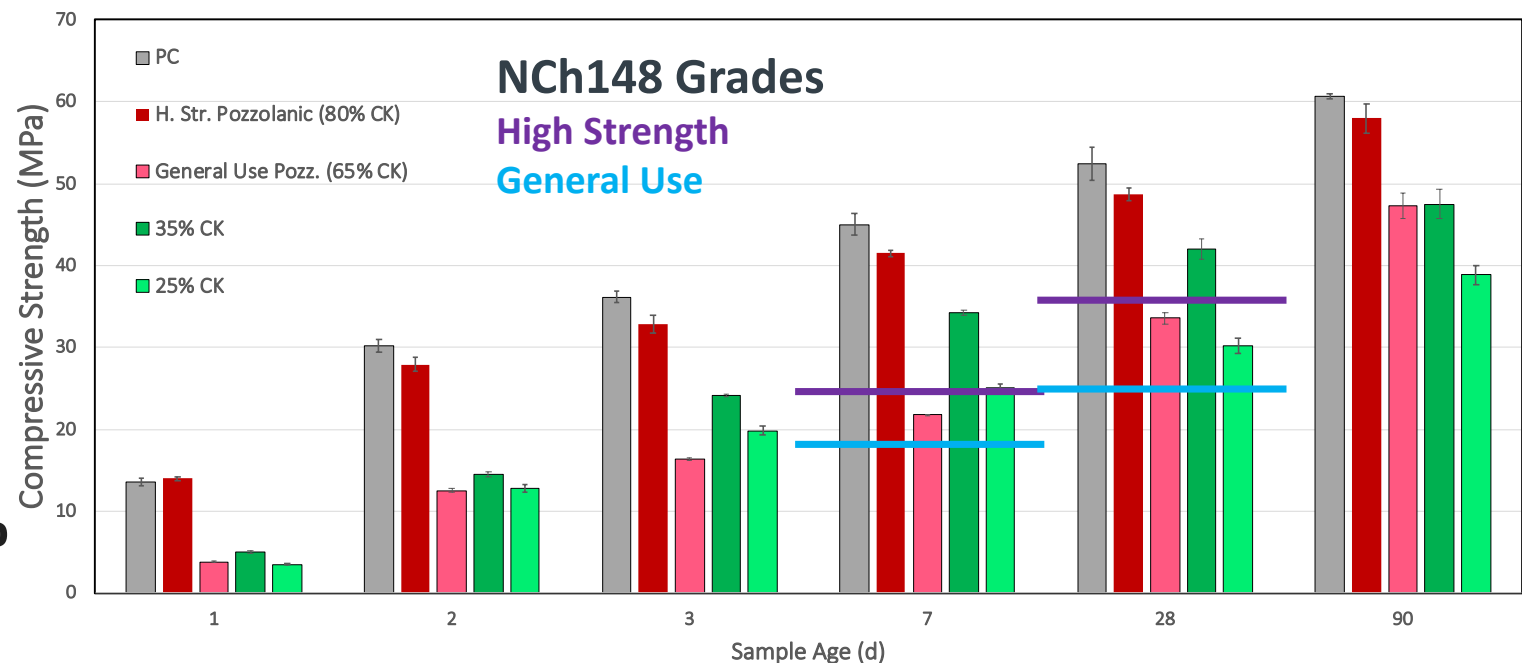


LC<sup>3</sup>-35 (35% CK)

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

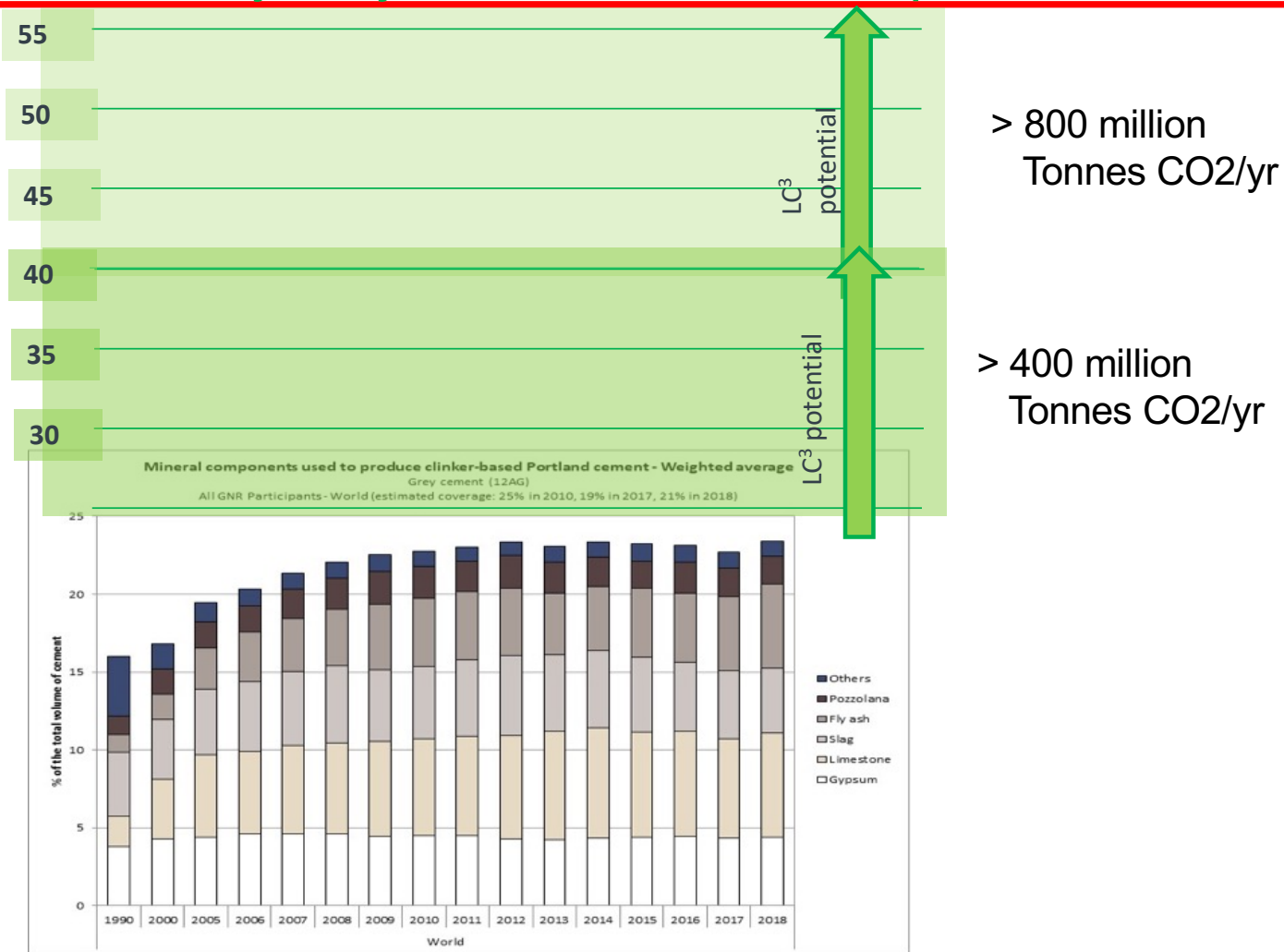
Clinker savings

40-45%



**The reactivity of SCMs matters!**

## Calcined Clay only SCM which can expand substitution



# Effet sur les performances du béton

---

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

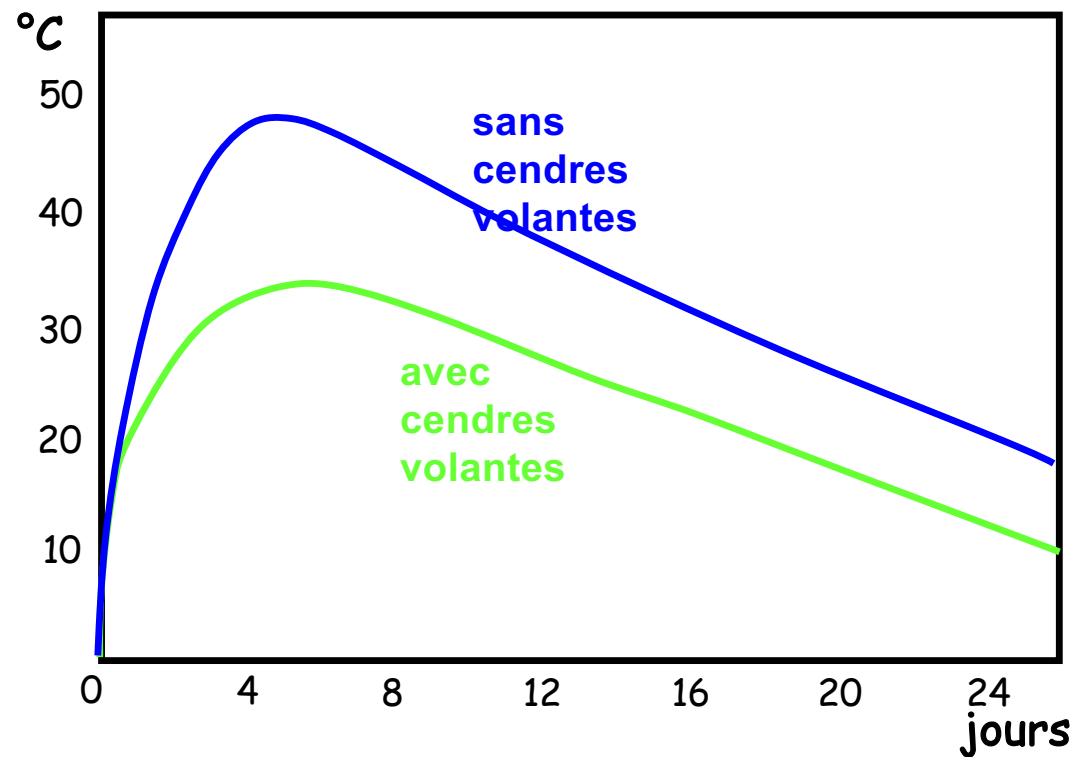
Parmi celles-ci:

- 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

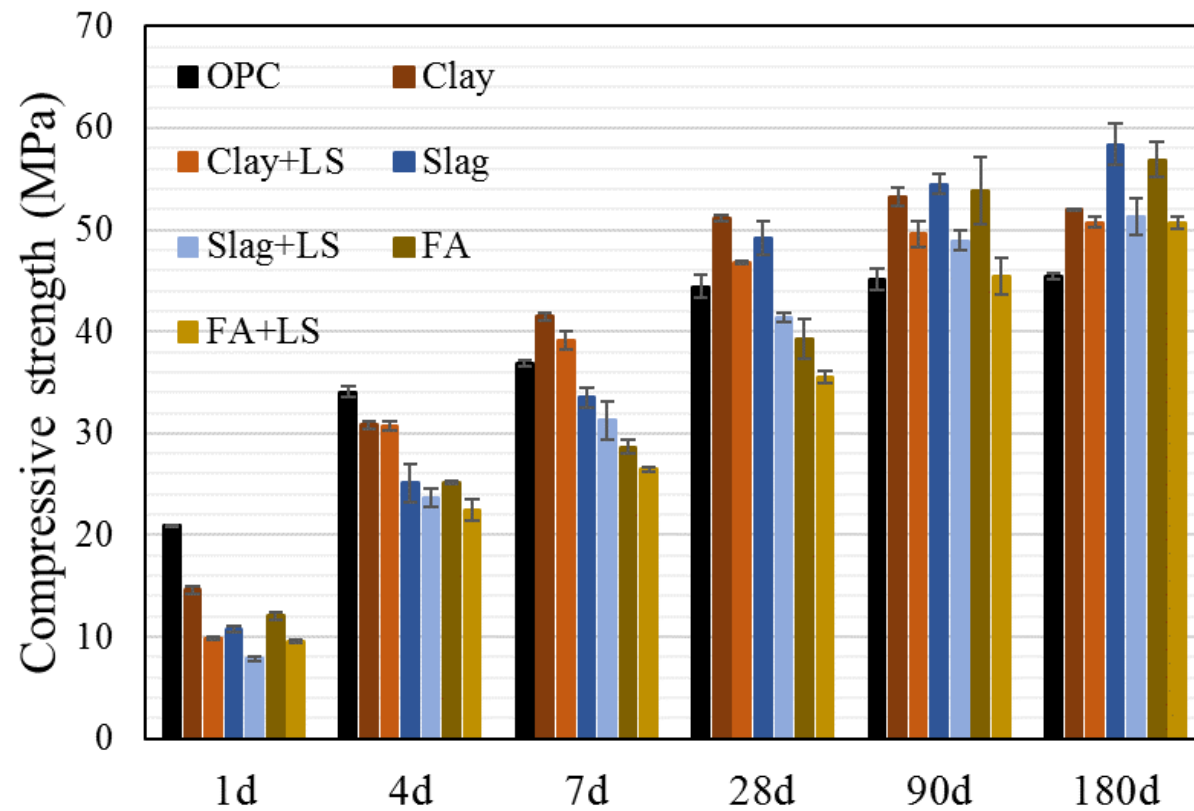
## 7. Effet sur les performances du béton

---

### 7.1. Réduction de la chaleur dégagée



# Augmentation des resistance long term

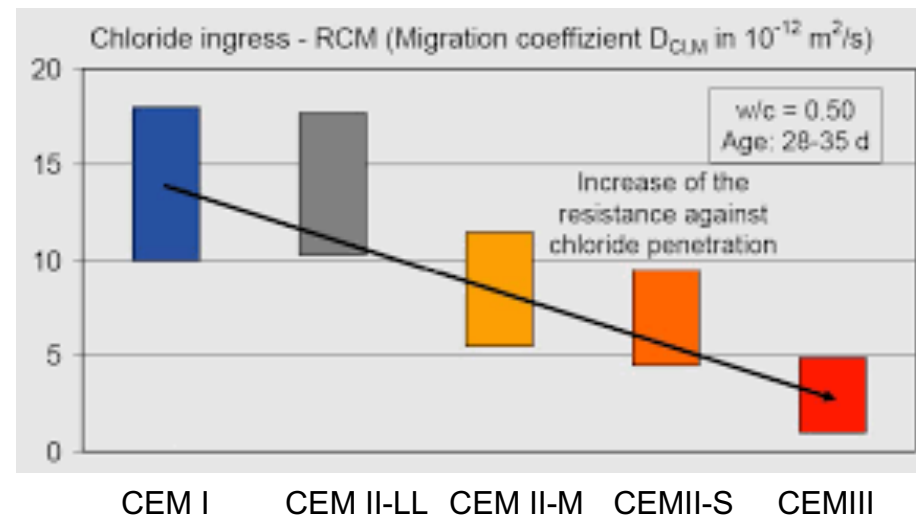




## 7. Effet sur les performances du béton

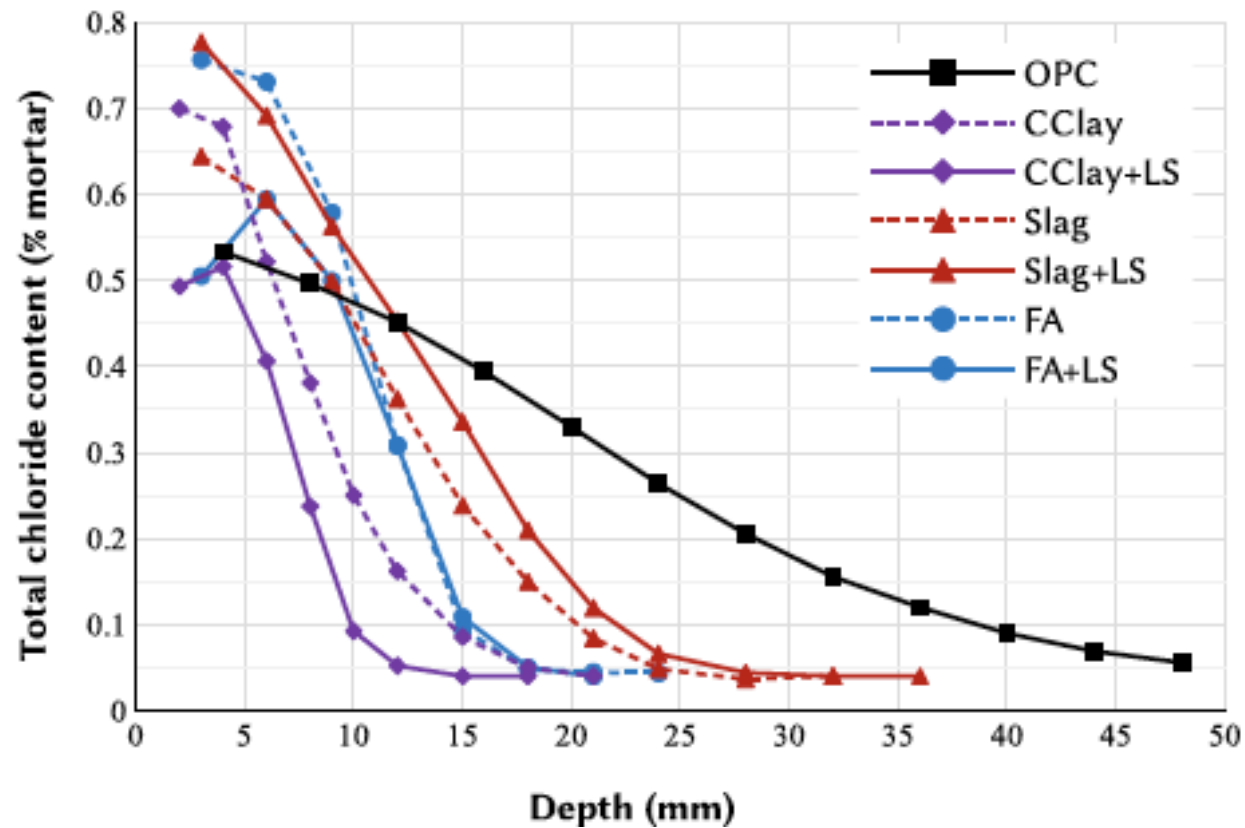
---

### 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

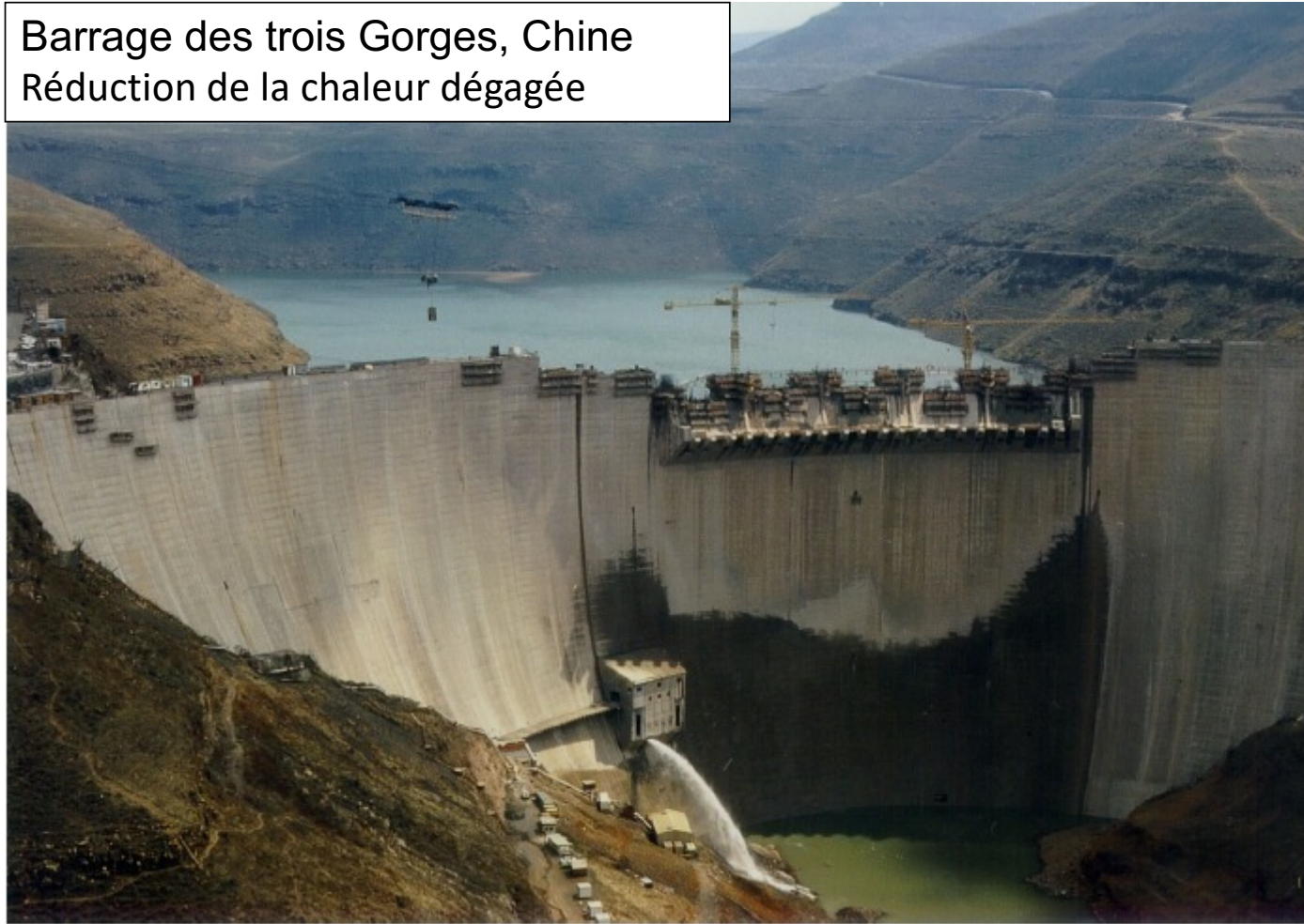




## 8. Exemples d'utilisation

---

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

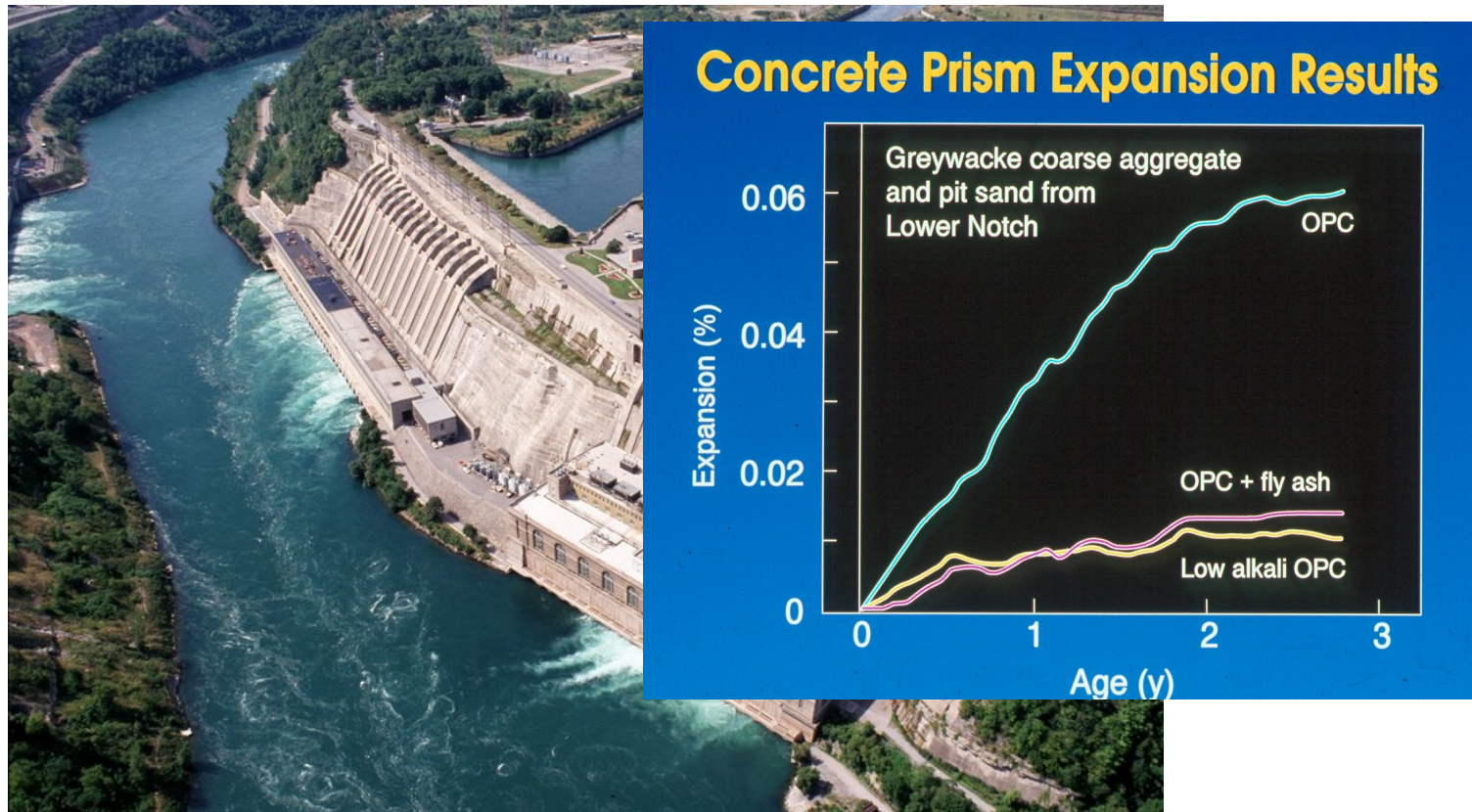
---



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



## 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 substitués 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 substitués ?**
- **Quelles sont les 3 grandes catégories de matériaux substitués ? 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