
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)

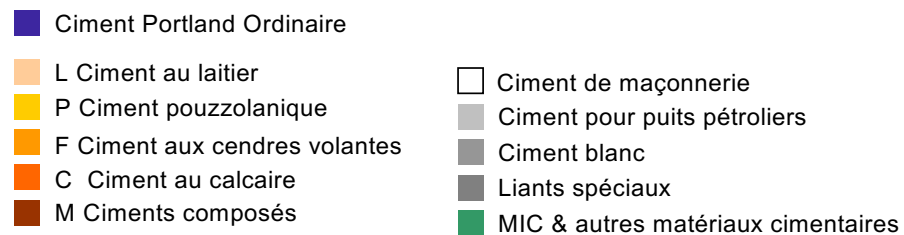
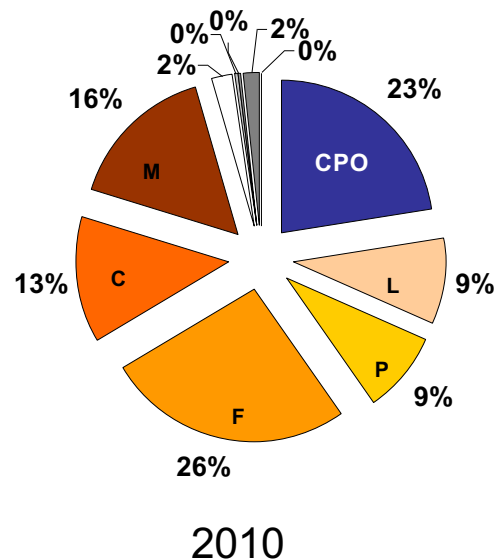
N for normal early strength

R for rapid early strength

Example:

1. Pourquoi substituer le Ciment Portland?

Types de ciments produits par Holcim



Source, Holcim

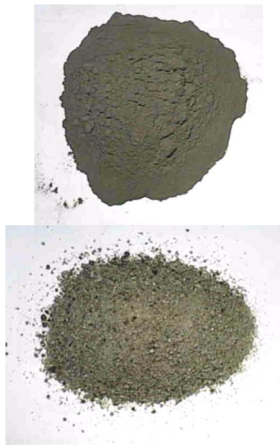
En suisse

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



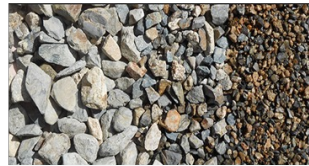
+

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

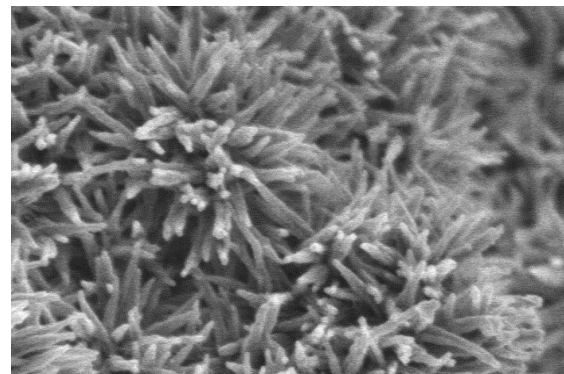
ou

Hydraulique

Réagissent et forment du

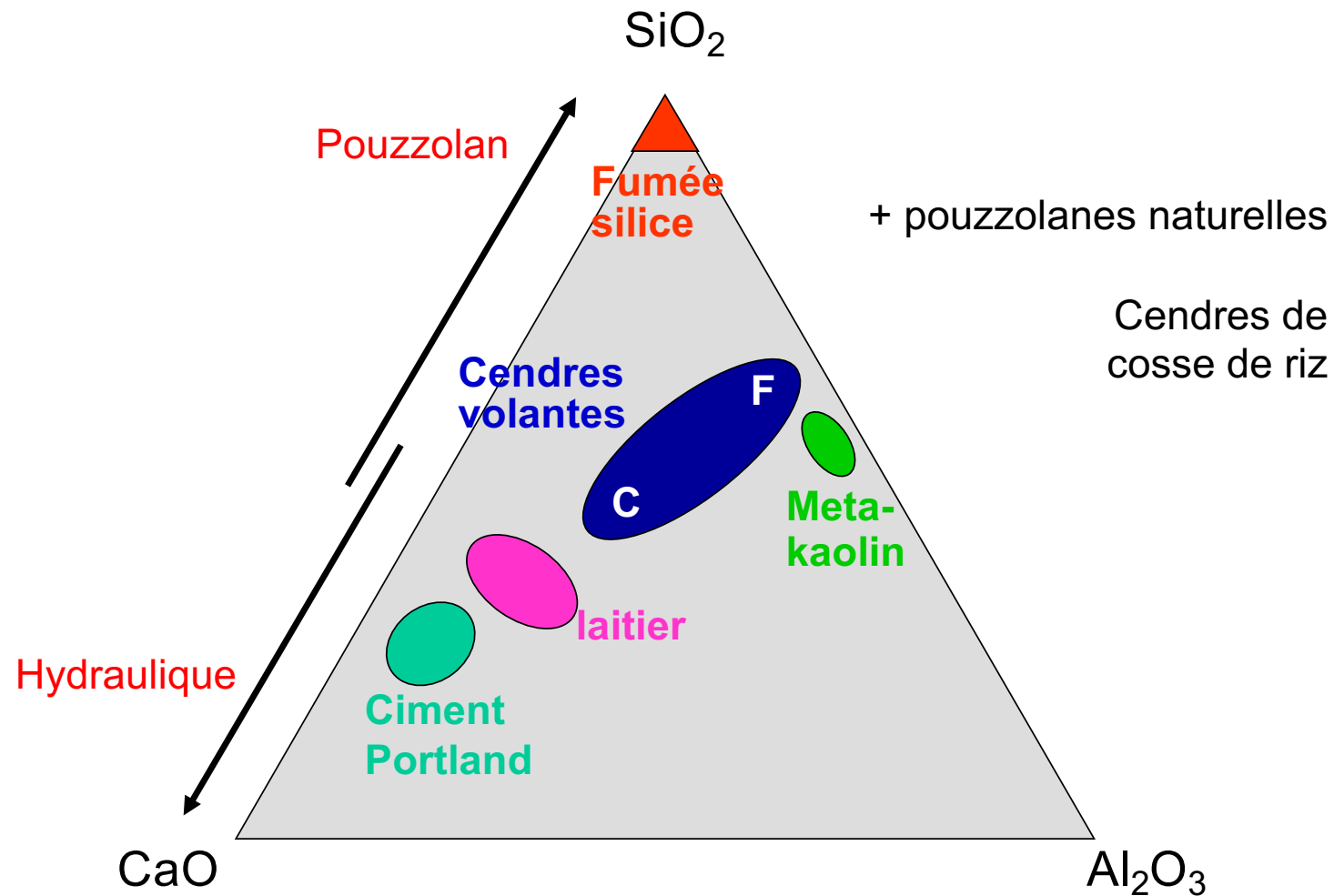
C-S-H

= comme le ciment Portland
mais plus lentement

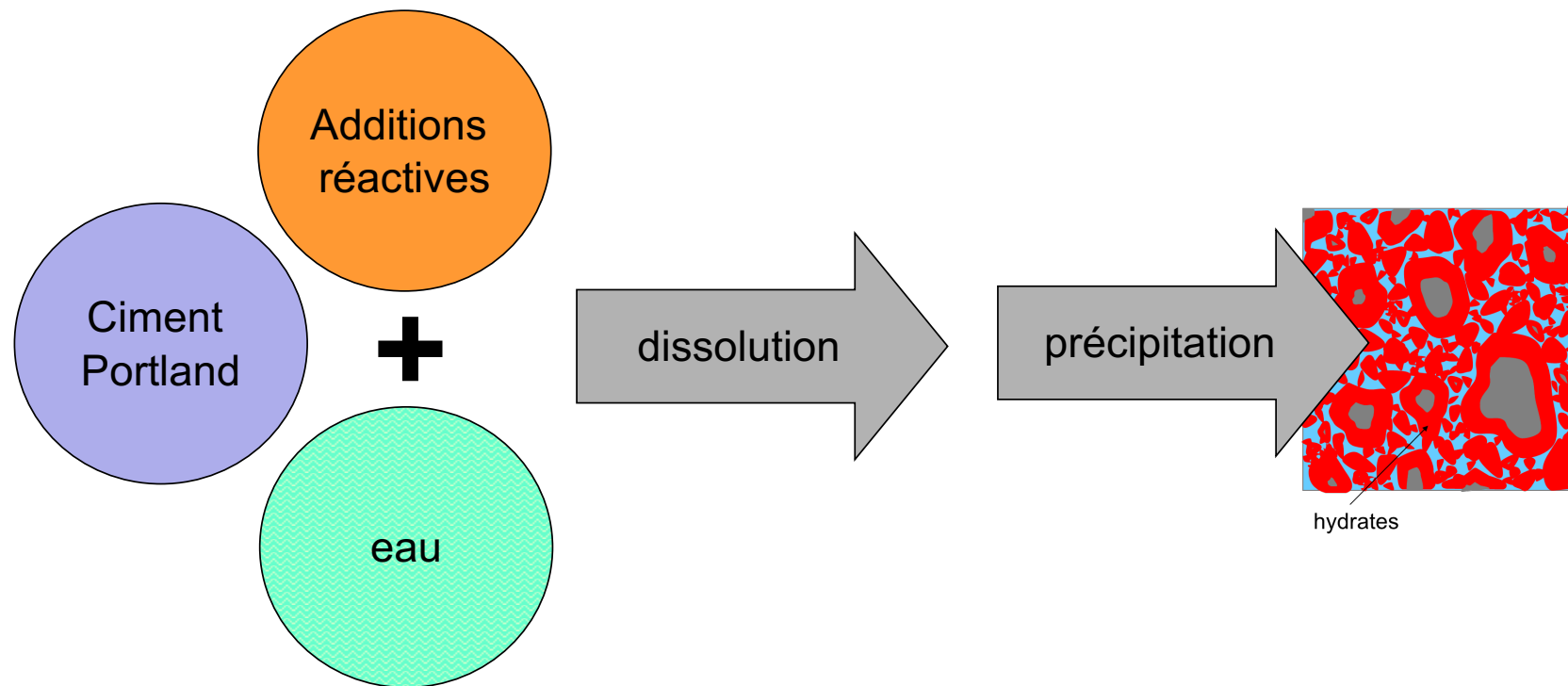


Calcium **S**ilicate **H**ydrates

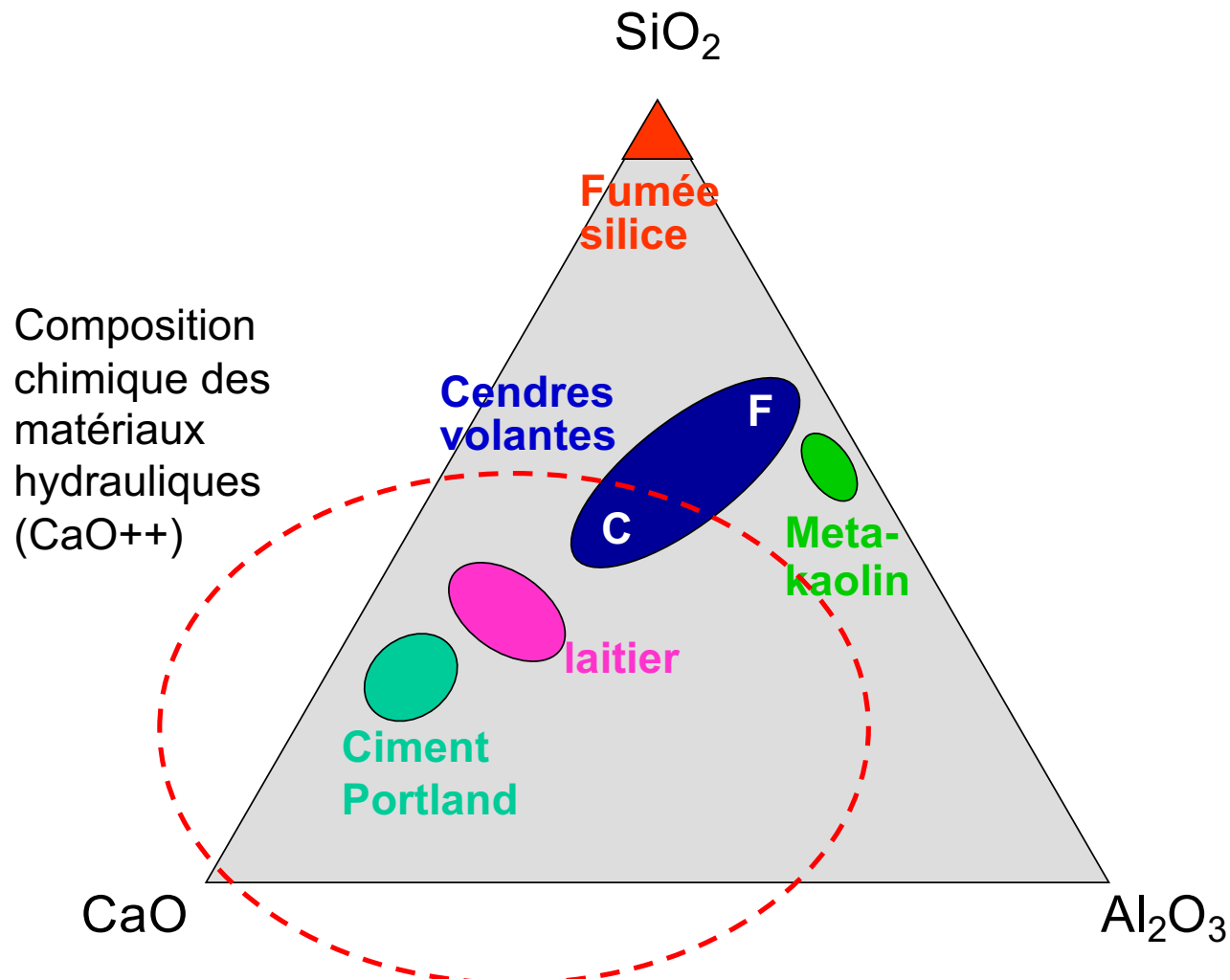
2. Les propriétés nécessaires



2. Les propriétés nécessaires



3. Les matériaux hydrauliques

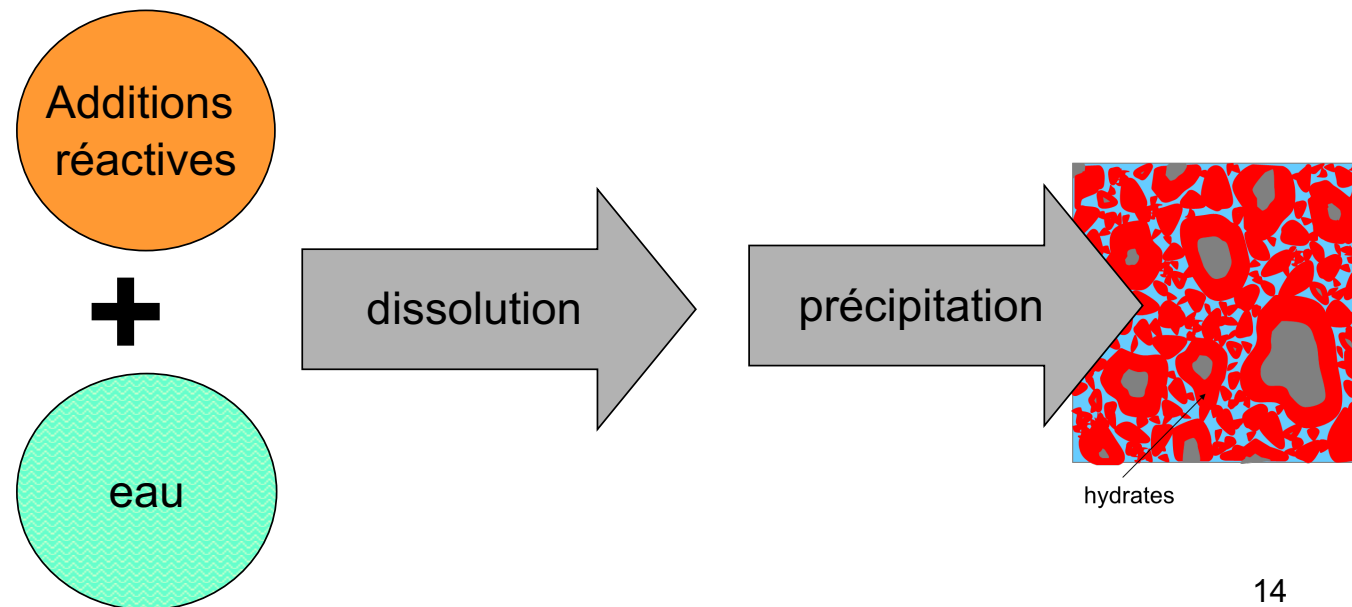


3. Les matériaux hydrauliques

Réaction **hydraulique**:

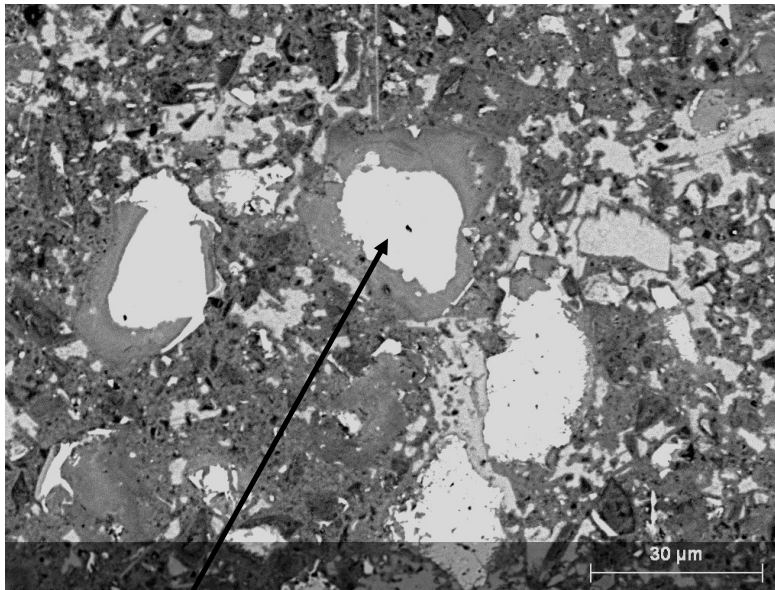
Addition réagit avec l'eau pour former des hydrates

Le ciment est un matériau hydraulique



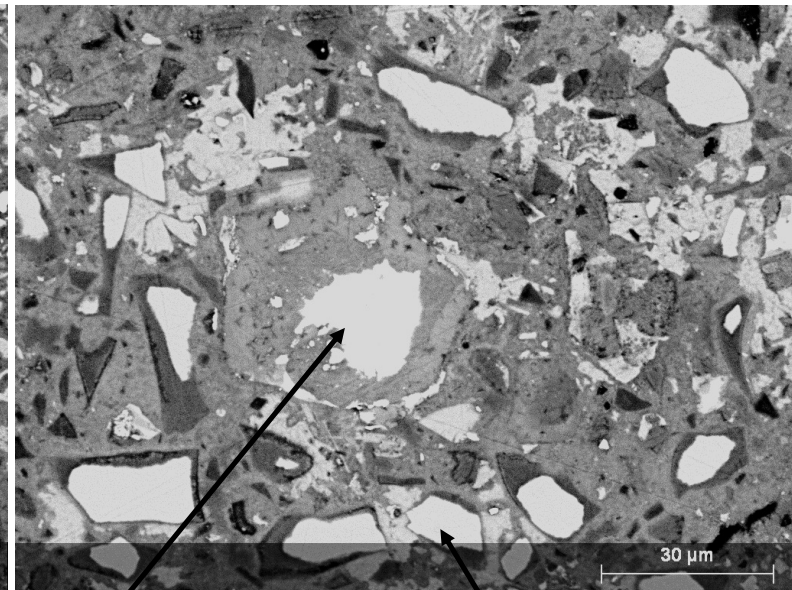
3. Les matériaux hydrauliques

100% Ciment Portland
hydraté



Grain de ciment
hydraté

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



Grain de ciment
hydraté

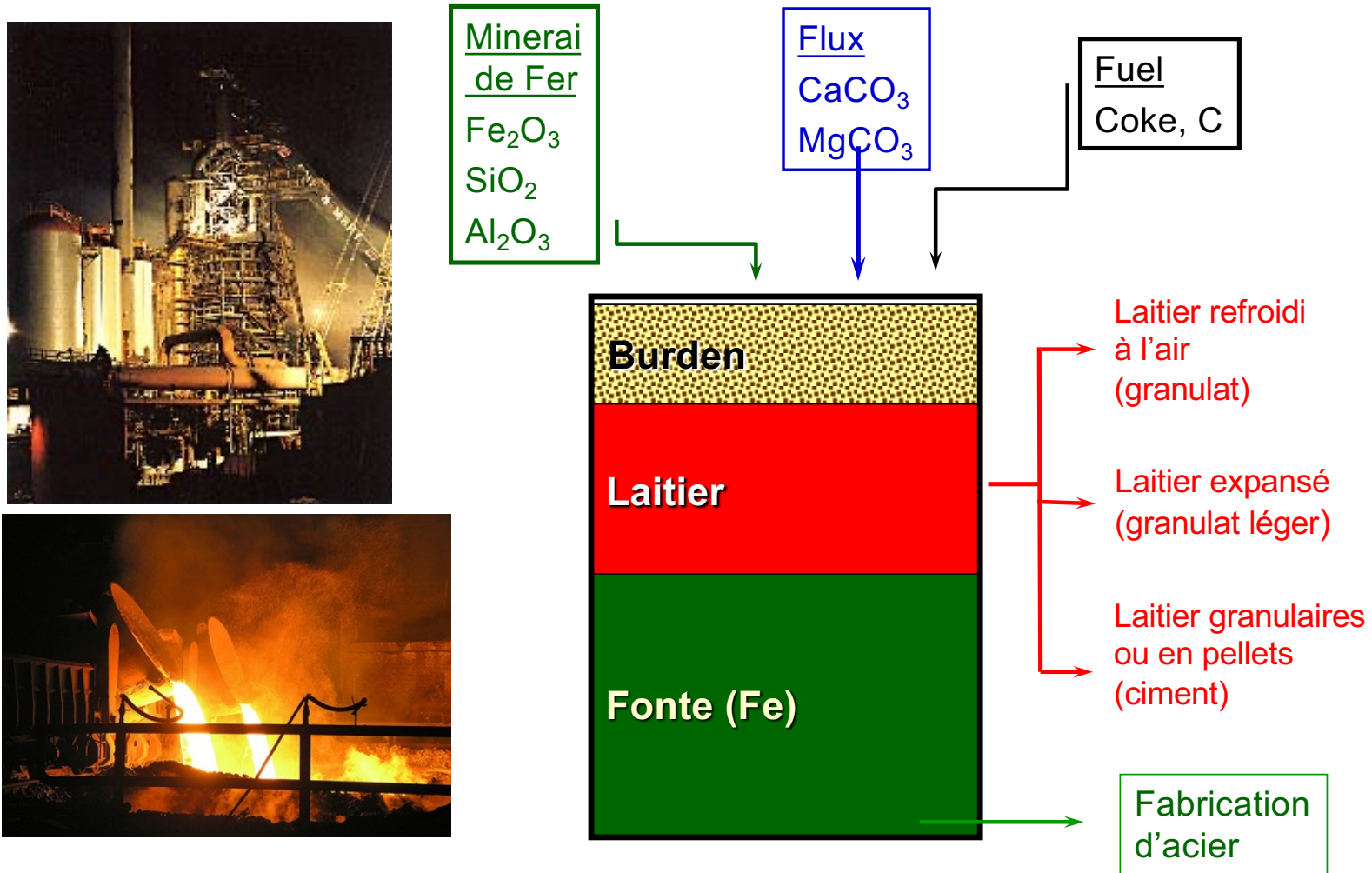
Additions
hydrauliques

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

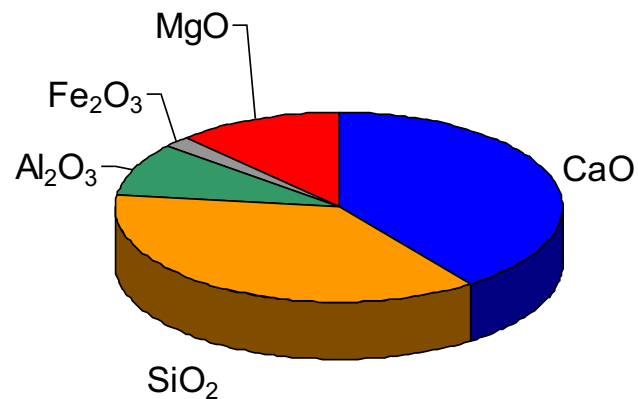


3.1. Laitier de haut fourneau

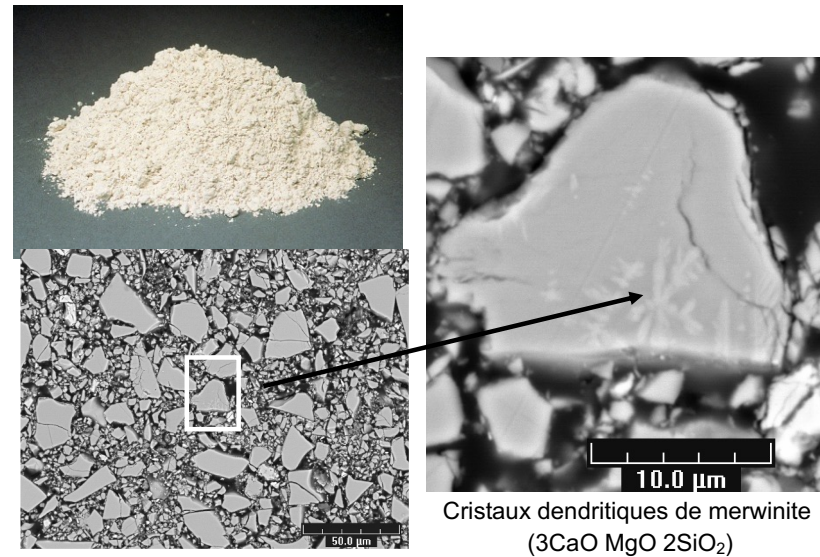
Le laitier de haut fourneau granulé moulu (Ground Granulated Blast-Furnace Slag ou GGBS) est un matériau vitreux, sous-produit formé par les scories fondues produites dans les hauts fourneaux pour la production de fer utilisé servant à la fabrication de l'acier.

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 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

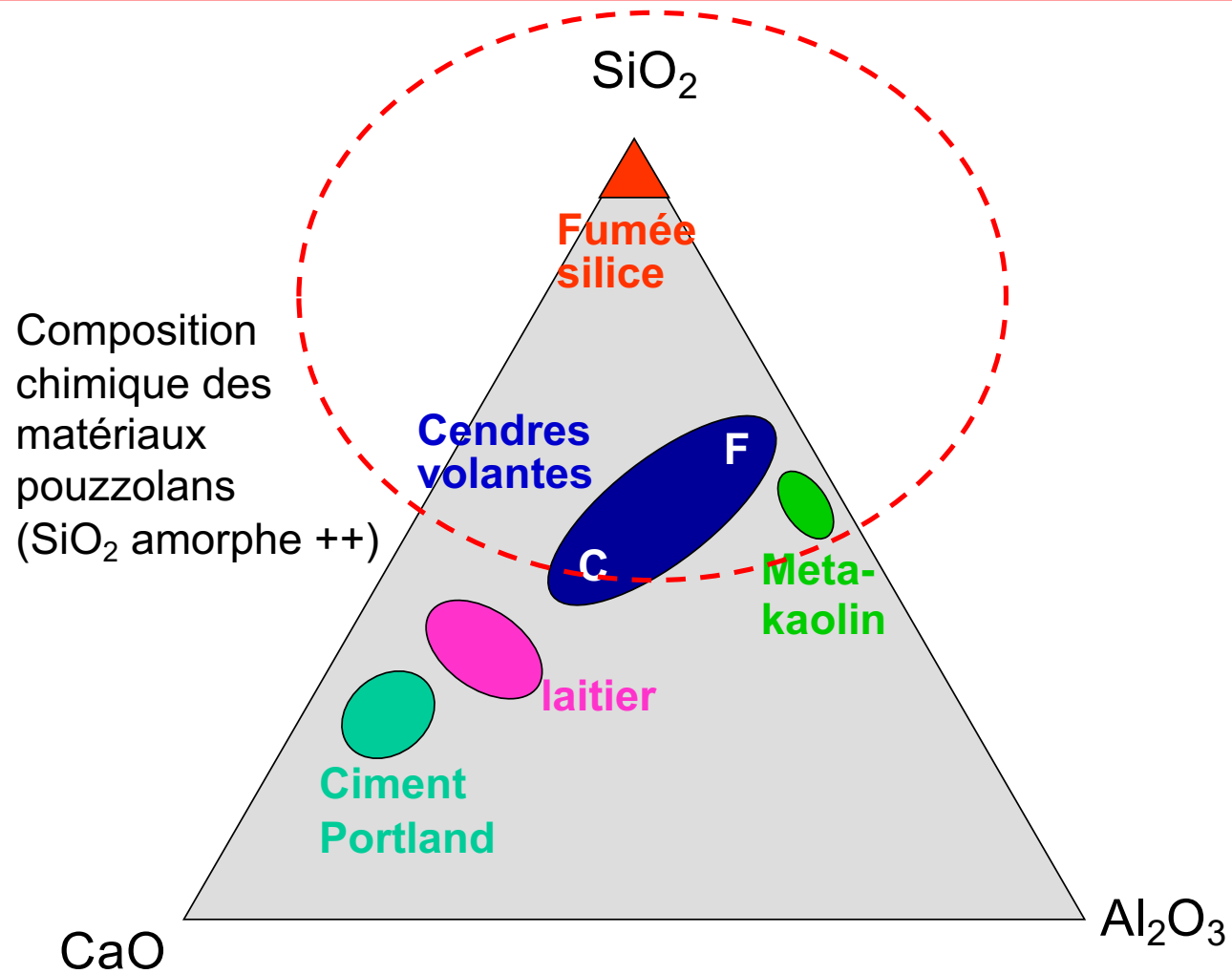
Type	Désignation Ciment	Notation	Composition en % massique		
			Principaux		Secondaire
			Clinker	Ajout	
I	Portland	I	95-100	0	0-5
II	Portland au laitier	II / A-S II / B-S	80-94 65-79	6-20 21-35	0-5 0-5
	Portland à la F.S.	II / A-D	90-94	6-10	0-5
	Portland au calcaire	II / A-L II / B-L	80-94 65-79	6-20 21-35	0-5 0-5
	... etc				
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 V / B	40-64 20-39	36-60 61-80	0-5 0-5



III

30-95%
de
substitution

3. Les pouzzolans

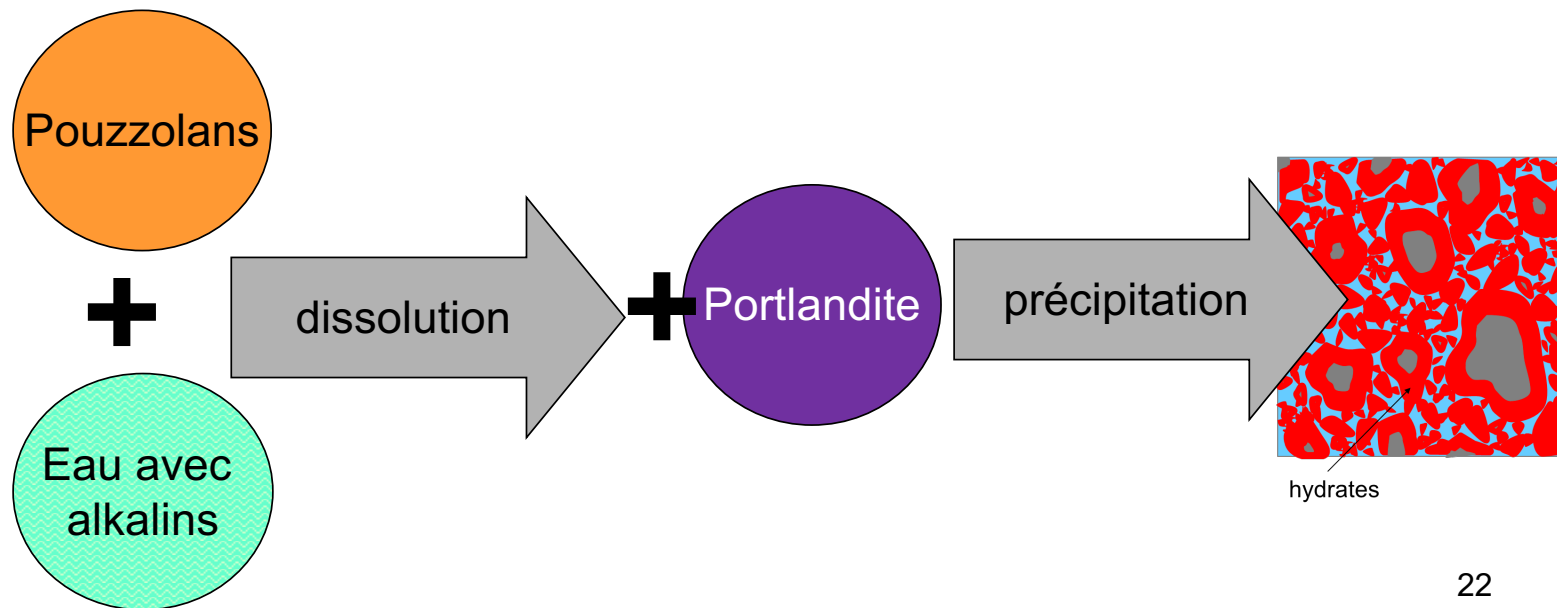


3. Les pouzzolans

Réaction **pouzzolanique**:



La réaction pouzzolanique consomme la Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 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)**

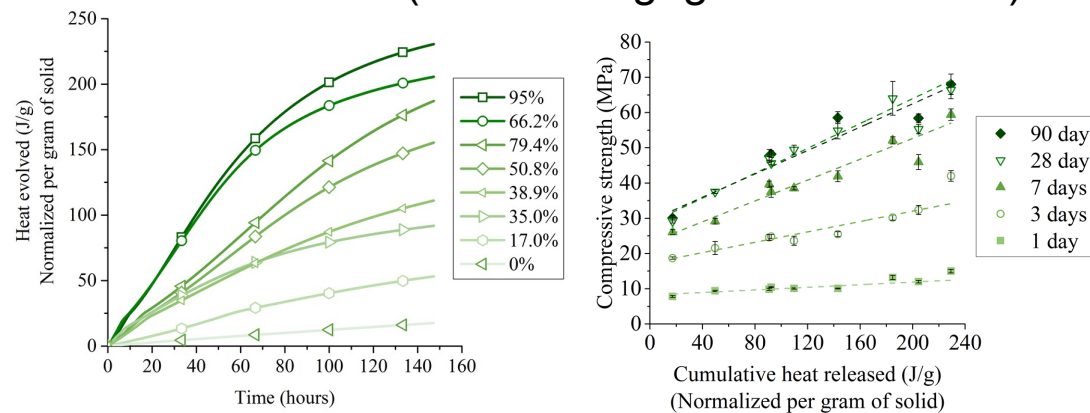
4. Les pouzzolans

Tous les pouzzolans n'ont pas la même réactivité

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

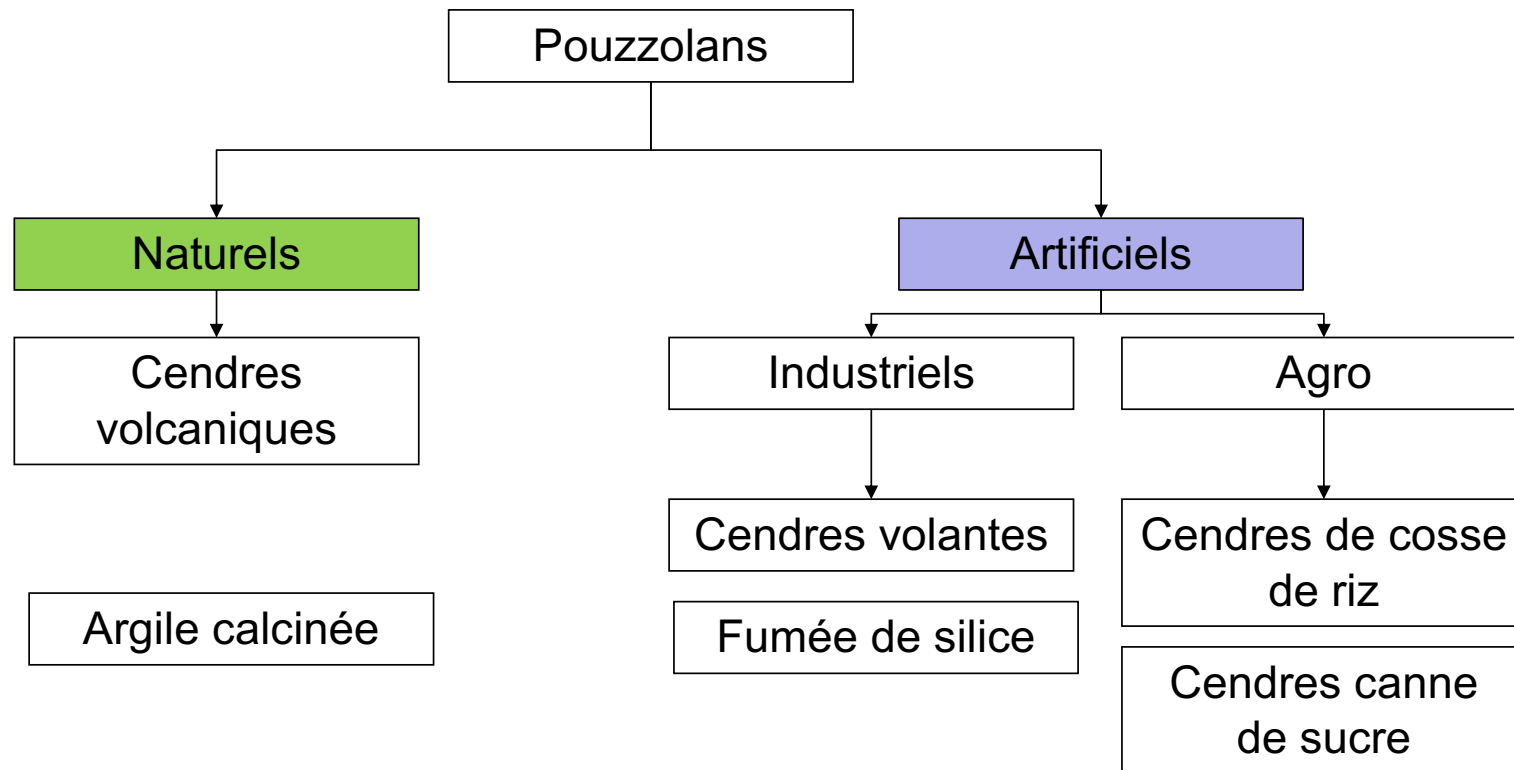
Mélange de
Portlandite / Matériau Pouzzolan (+Calcaire)

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

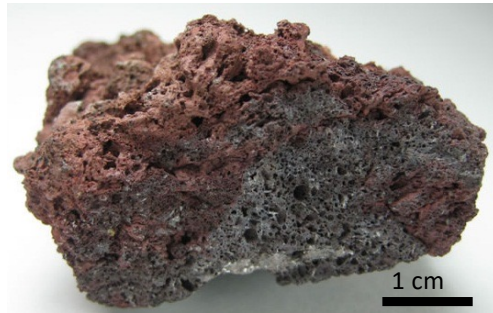


Les volcans produisent des cendres riches en verre de silice et alumine.

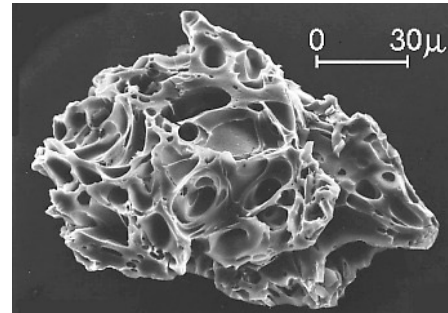
4.1. Les pouzzolans naturels

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

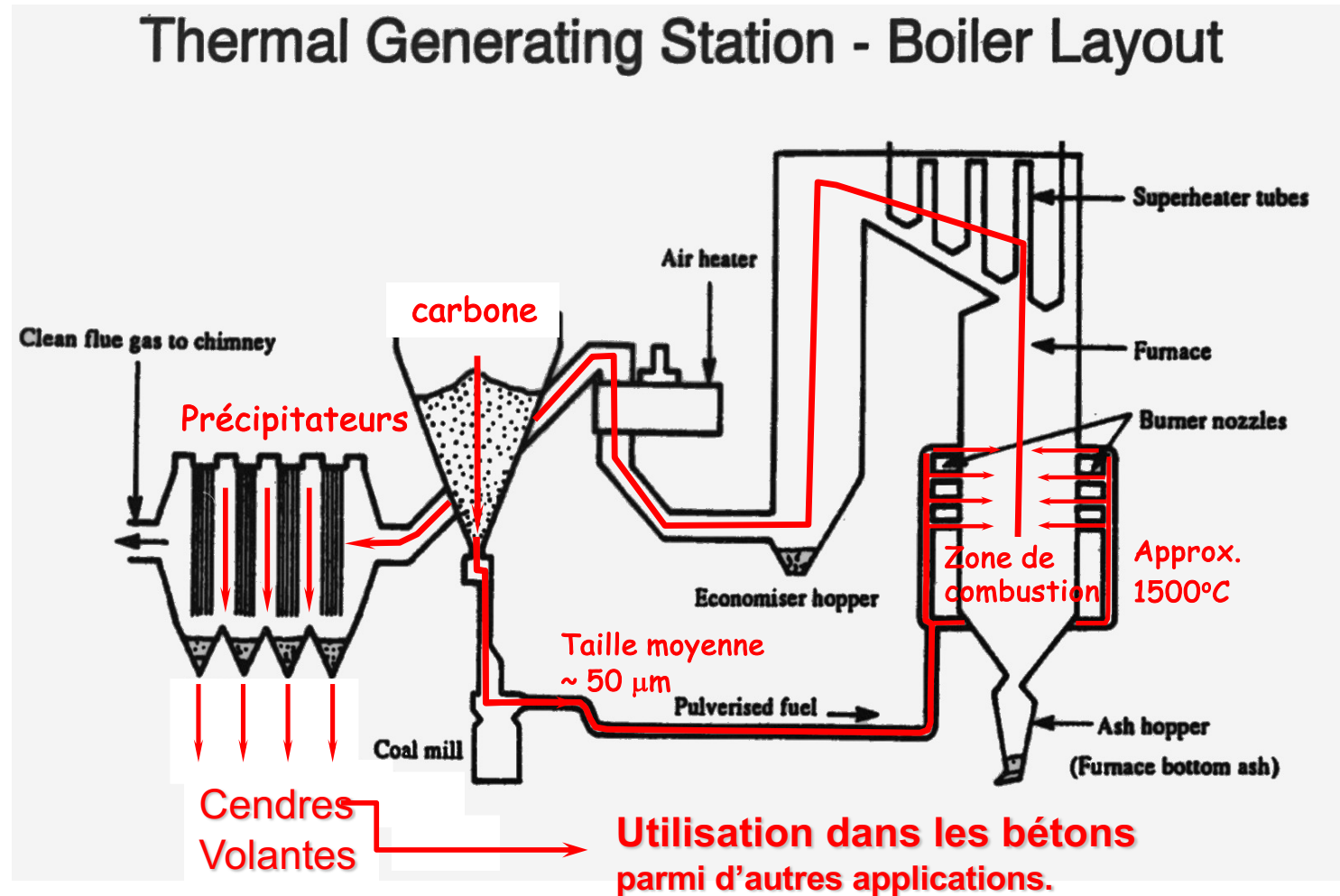


4.2. Cendres volantes « Fly ash »

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

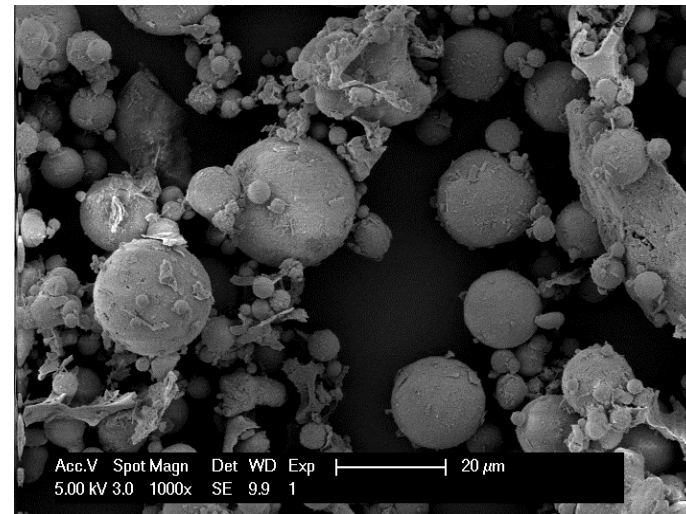


4.2. Cendres volantes « Fly ash »



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 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 »

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

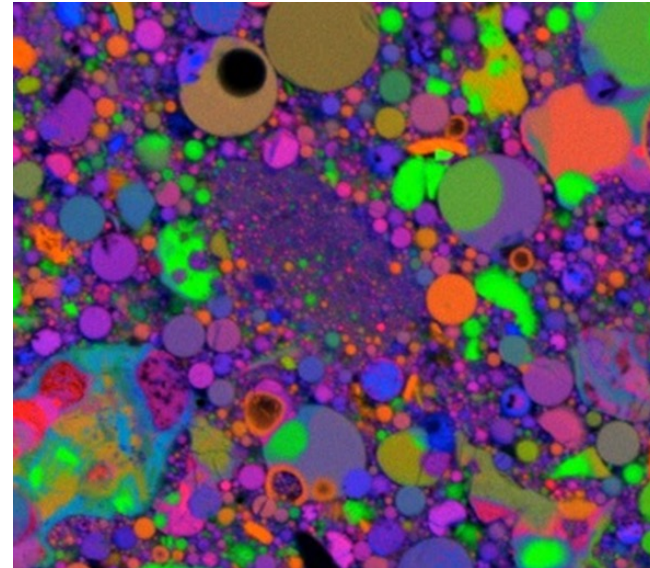
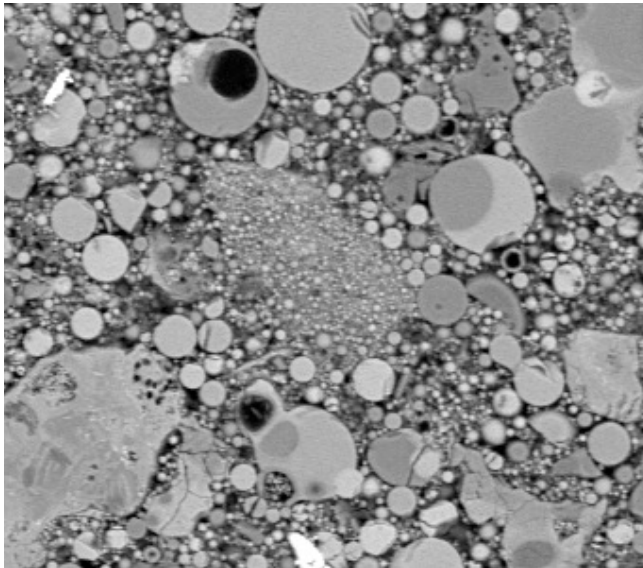
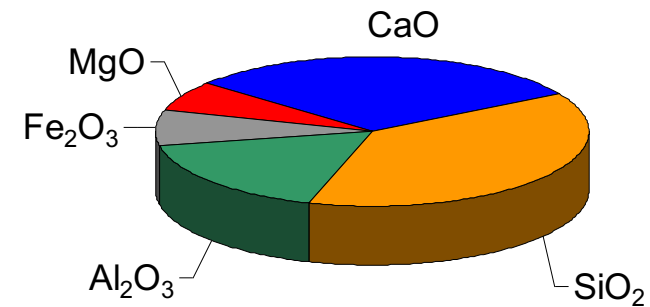
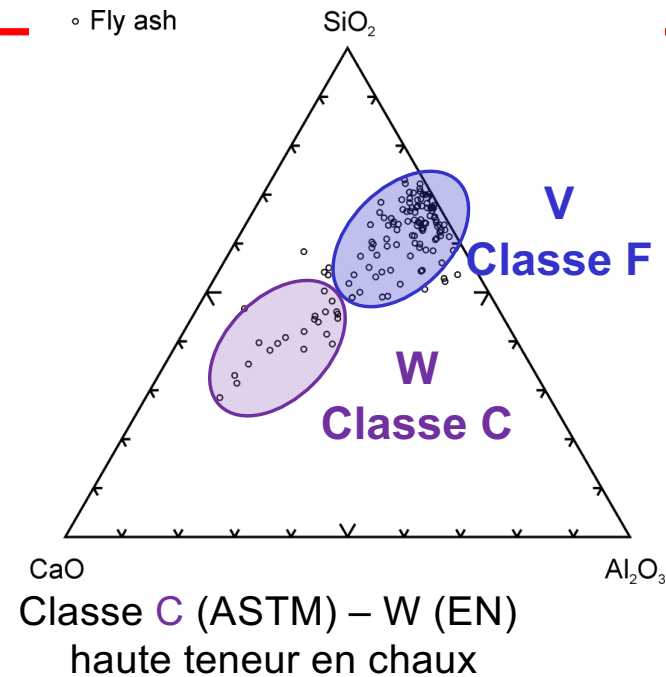
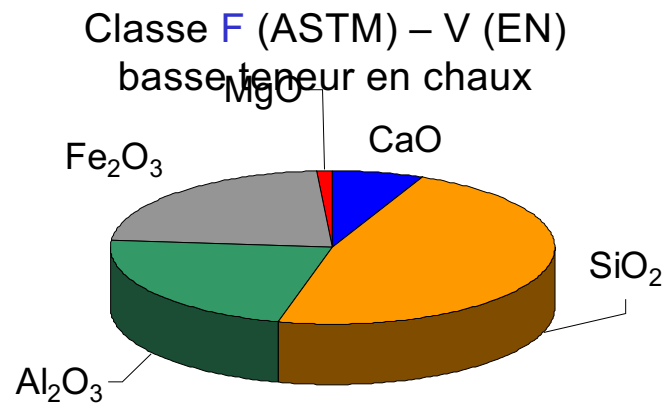


Image “chimique”

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

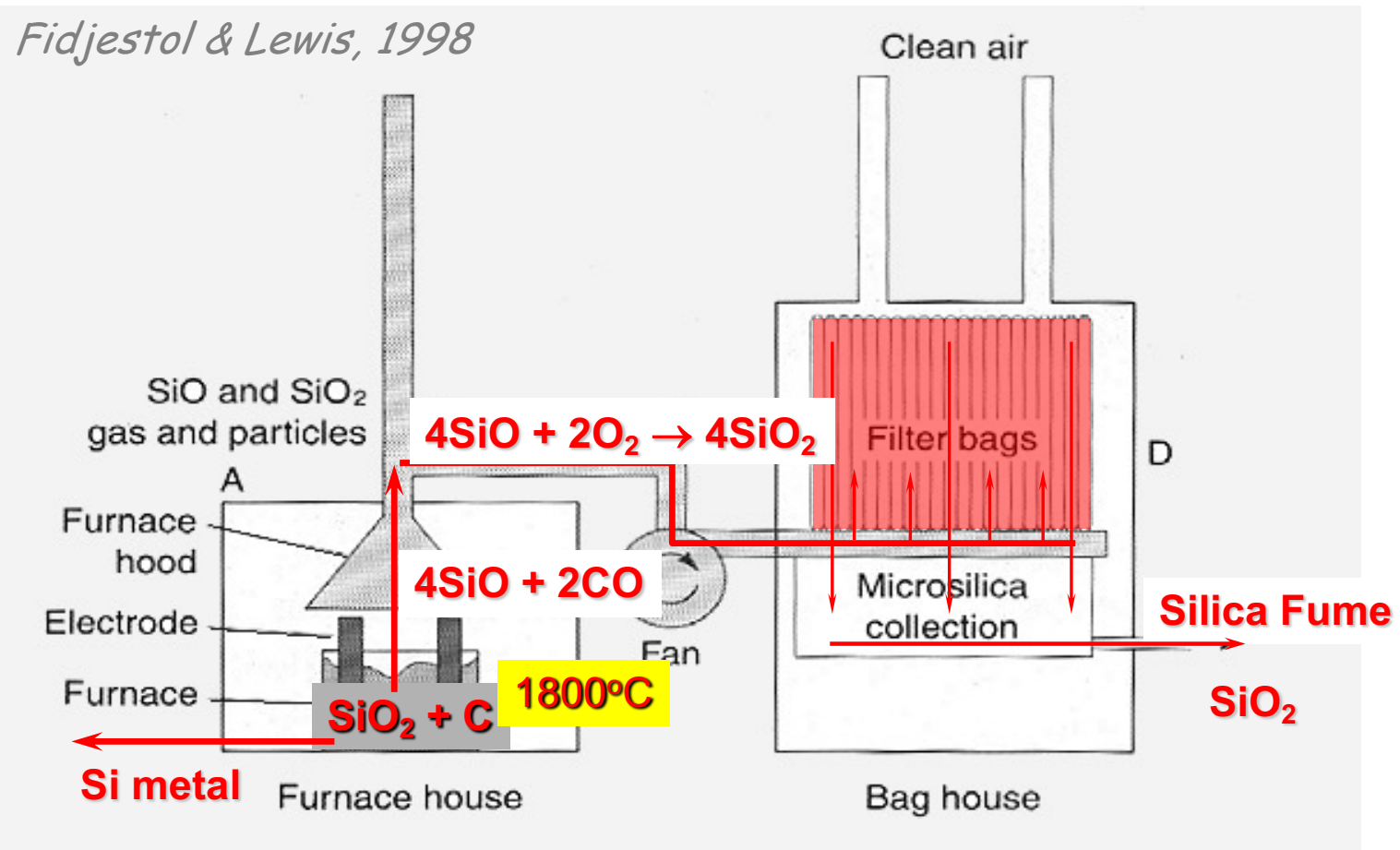
- Amélioration de l'ouvrabilité ($e/l \downarrow$ pour même cône d'Abrams (slump))
- Réduction de la chaleur d'hydratation
 - Réduire le risque de fissuration thermique dans les grandes masses
- Réduction de la porosité
 - Augmentation de la résistance à terme
 - Diminution de perméabilité
 - Augmentation 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% SiO_2
- Basse teneur en carbone
- diamètre moyen des particules: 0.1 μm
(1/100th de la taille moyenne d'un grain de ciment)
- Surface spécifique : 15 000 m^2/kg
(contre 350 m^2/kg pour CPO)

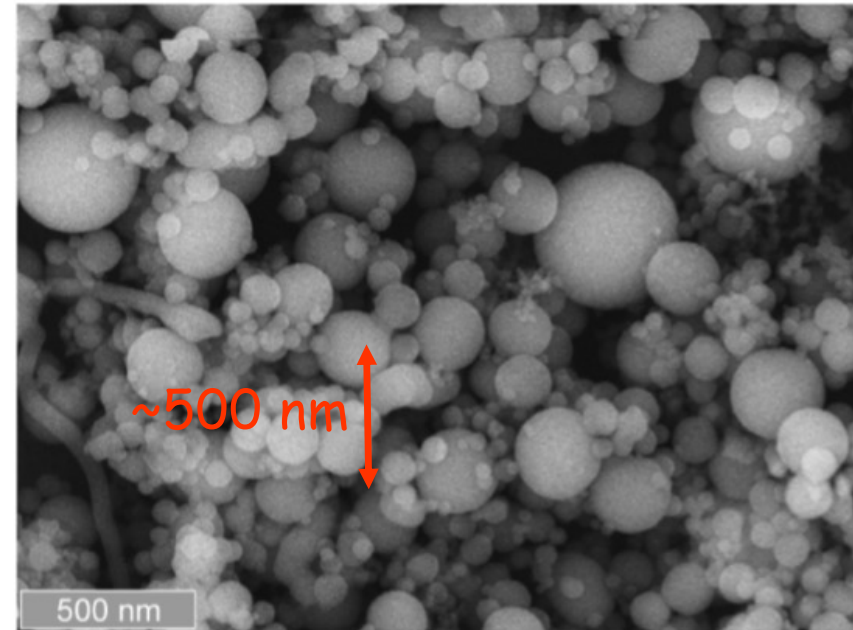
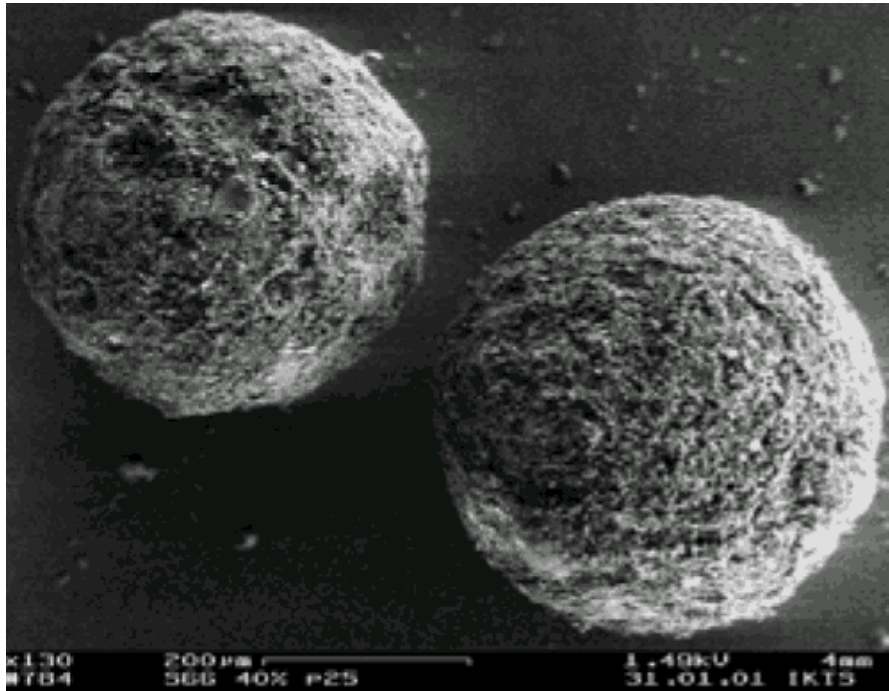


Figure 2.20. SEM picture of a typical silica fume with average particle diameter of 0.1 μm . [Used by permission of Elsevier, from Jo et al. (2007), *Construction and Building Materials*, Vol. 21, Fig. 1, p. 1352.]

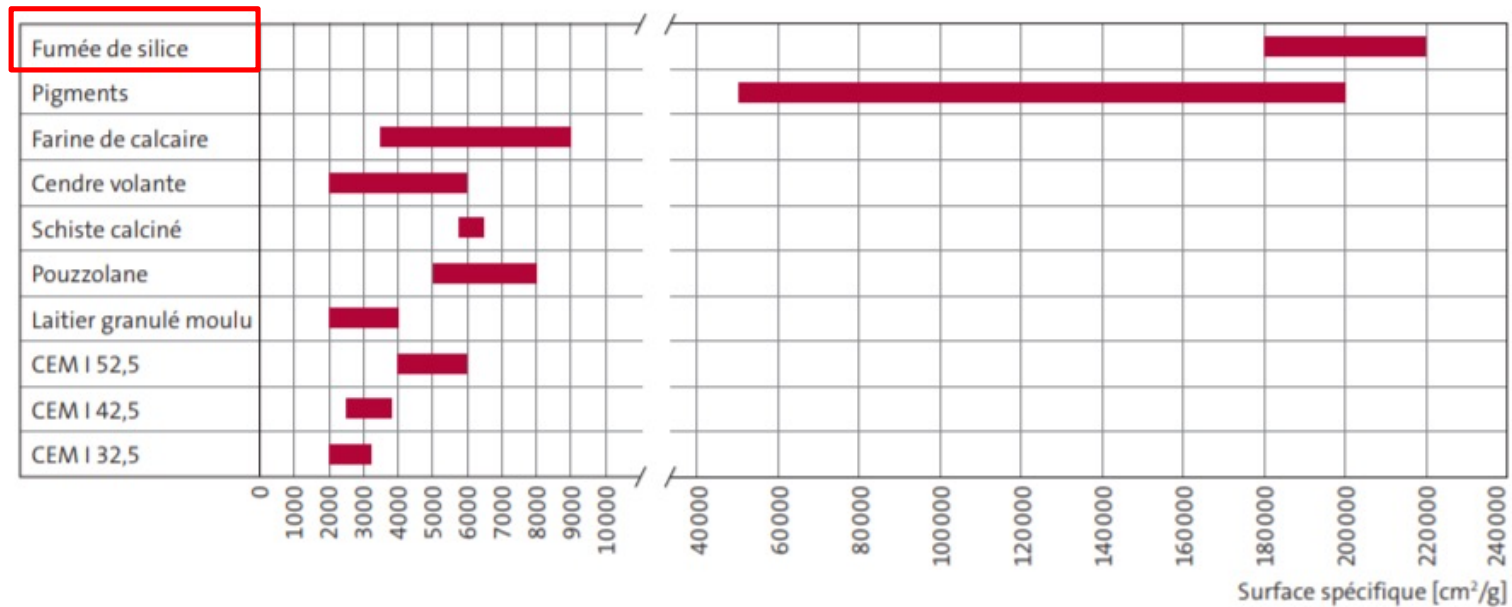
4.3. Fumée de silice



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

4.3. Fumée de silice

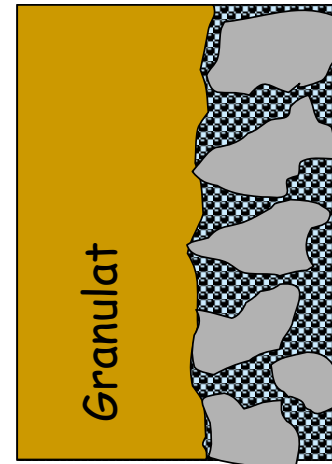
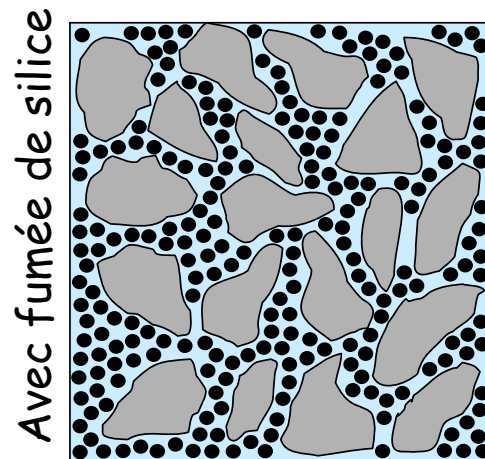
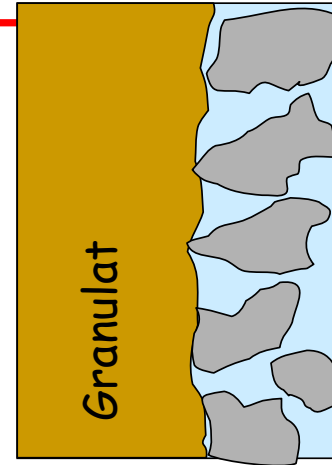
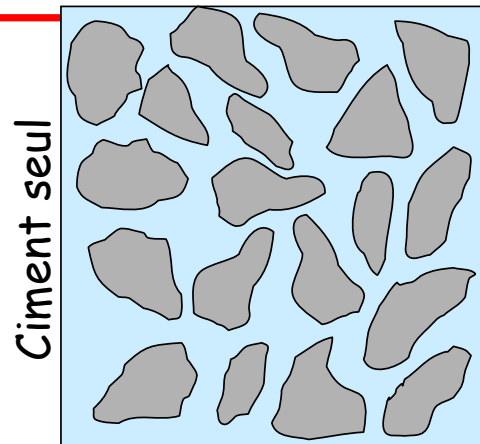
Extremement fines
particules → impact sur la
PSD du béton



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: Microfillérisation

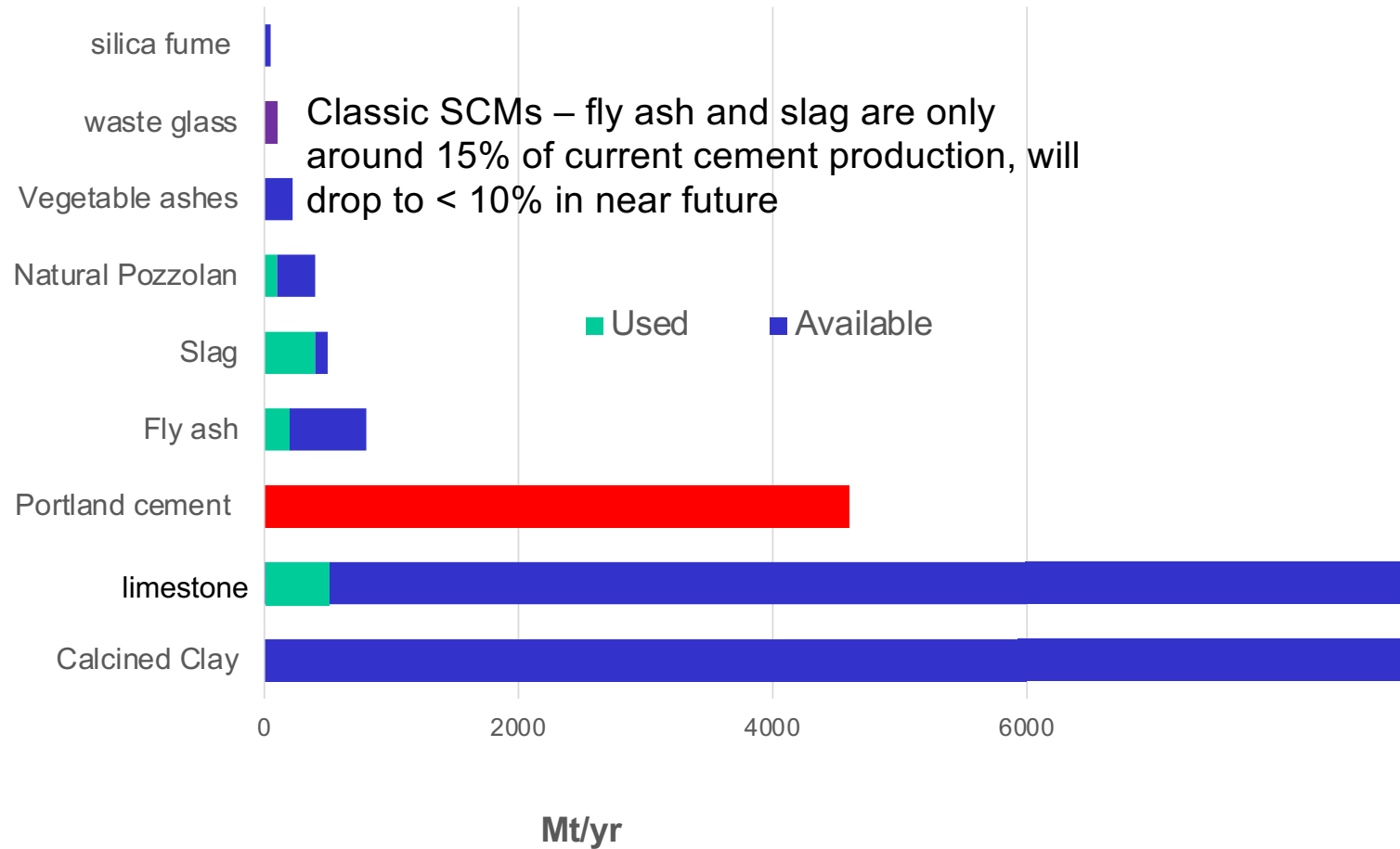


Amélioration
de l'interface
entre
granulats
et pâte
de ciment

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



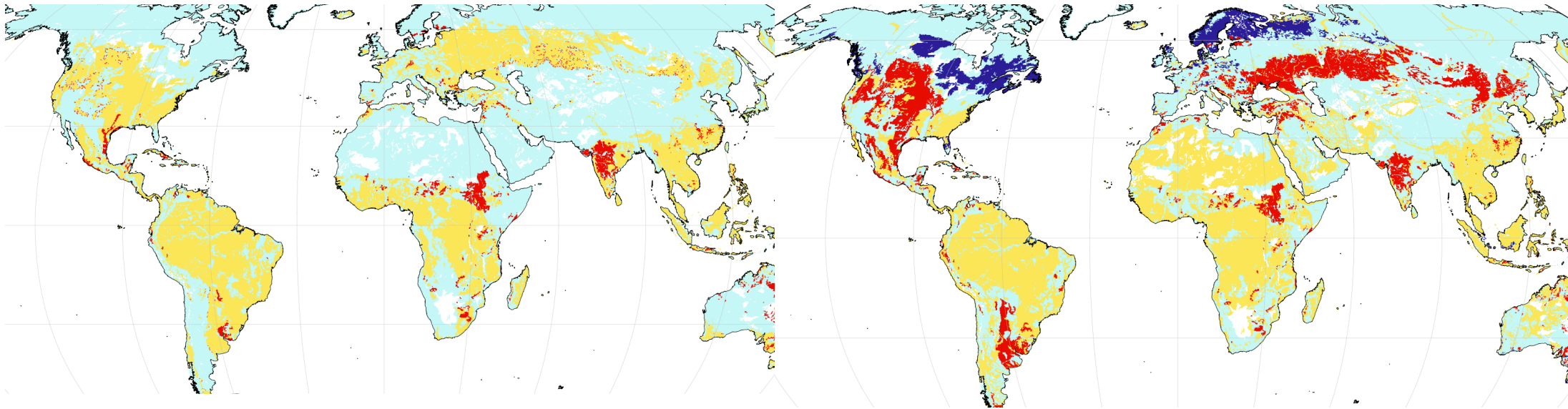
Distribution of Kaolinitic clays

data 2017

Ito and Wagai, Scientific

0-5m

>5m



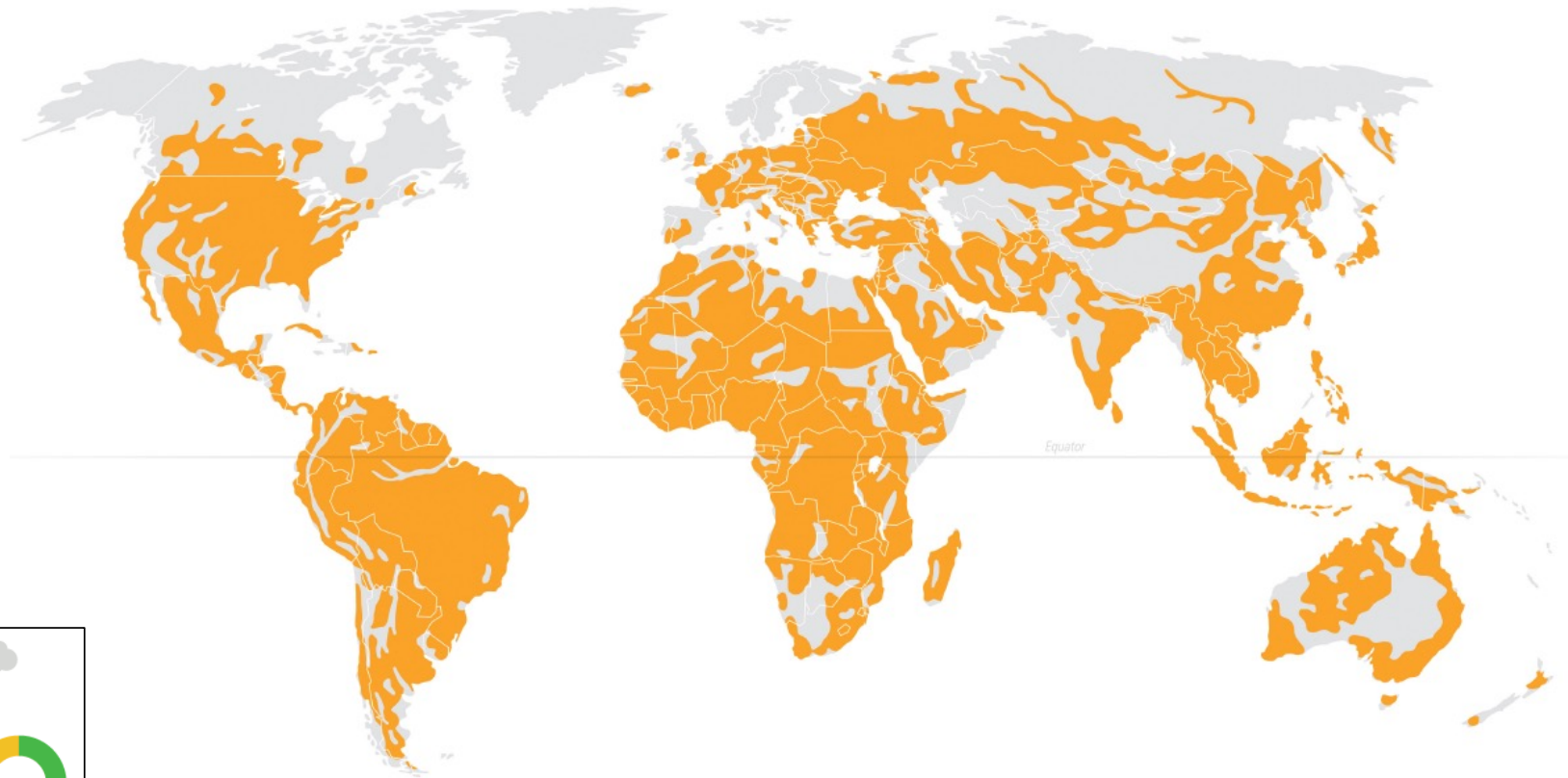
Illite/mica

Kaolinite

Smectite

Vermiculite

World distribution of kaolinitic clays



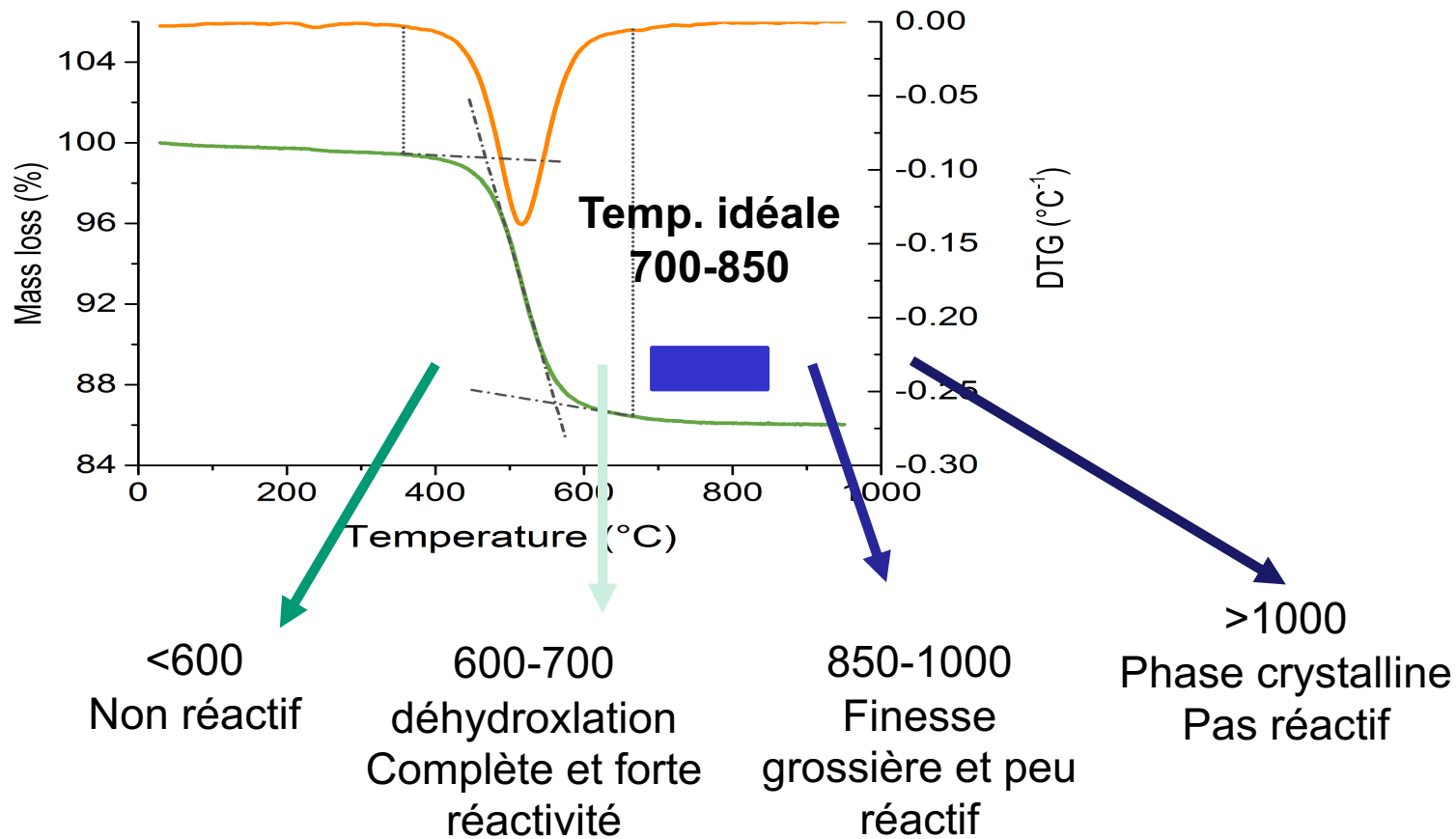
Source: Ito and Wagai, Scientific data 2017

4.4. Argile calcinée

Rebus d'industrie de céramique



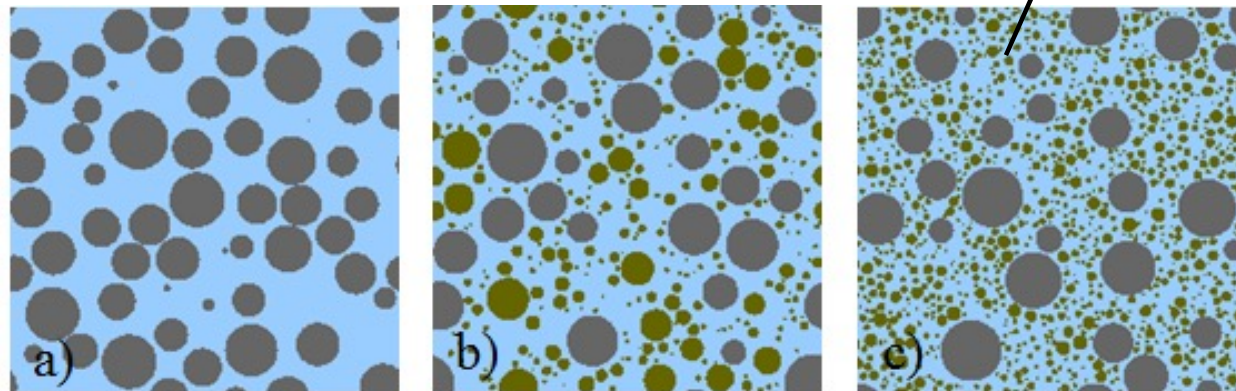
4.4. Argile calcinée



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)



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**

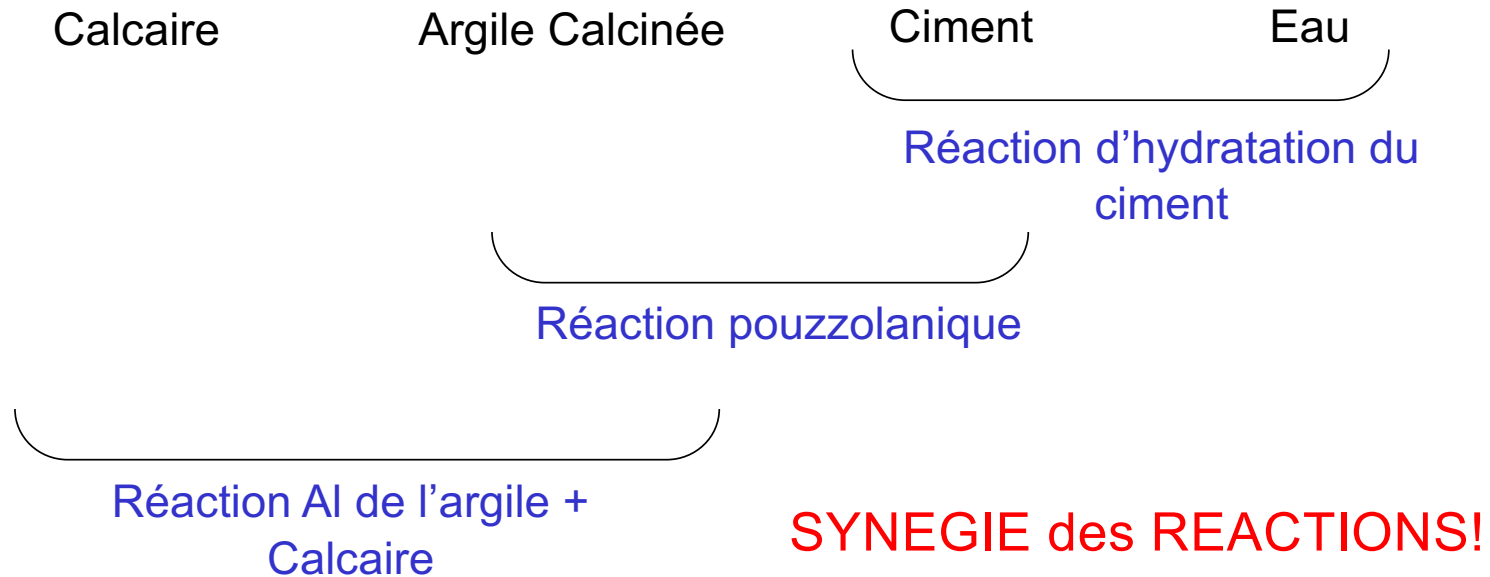
Souvent vu comme inerte, le calcaire broyé finement **peut réagir** avec les ions Al pour former de nouveaux hydrates en plus de ceux du ciment.

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)

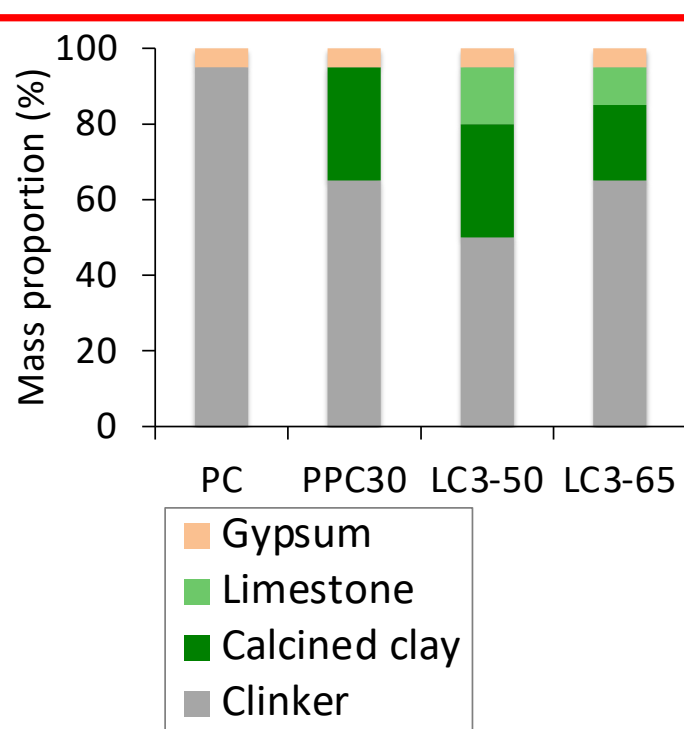
Exemples: Ciment Portland + Fly Ash + Calcaire
 Ciment Portland + Argile Calcinée + Calcaire

6. Les ciments ternaires

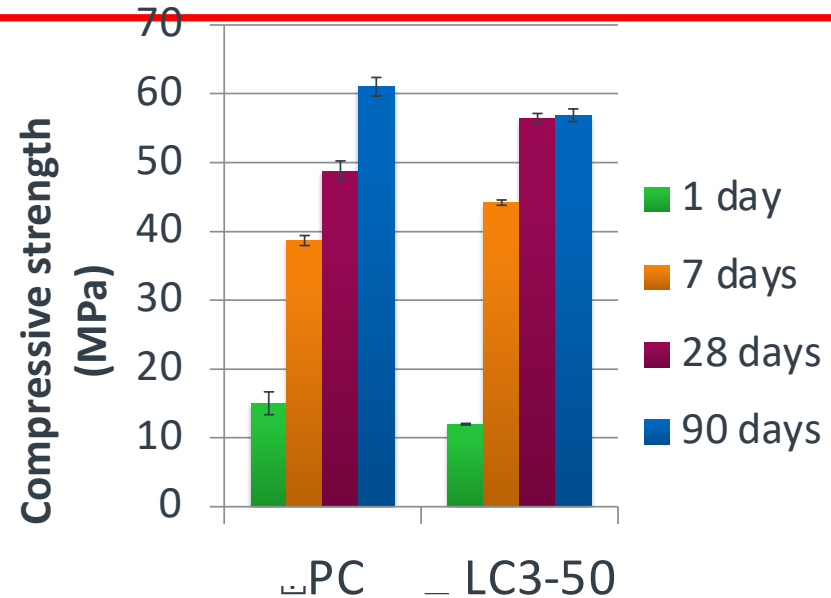
Exemple: Projet



LC³



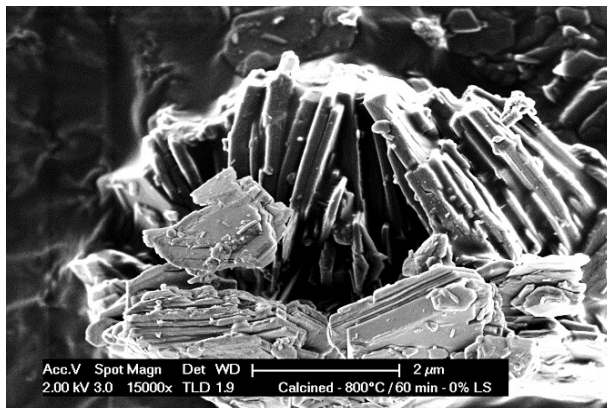
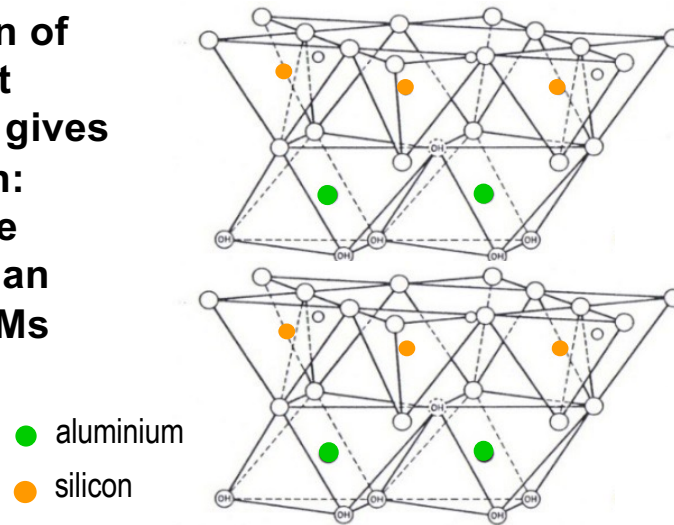
LC³ is a family of cements, the figure refers to the **clinker** content



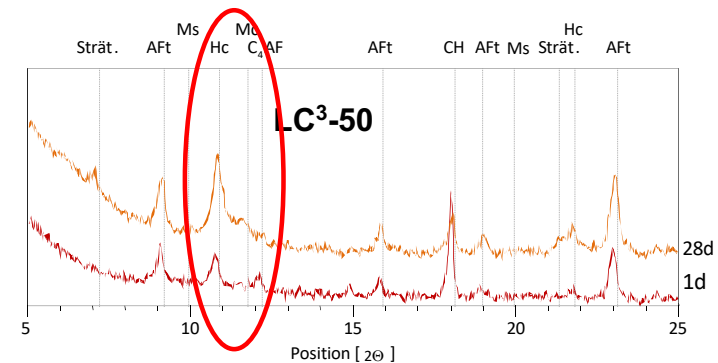
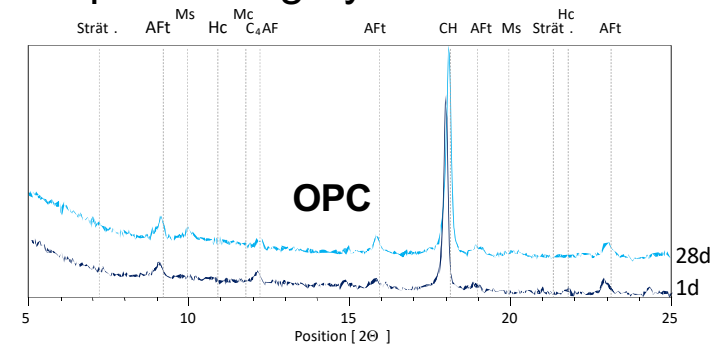
- 50% less clinker
- 30% less CO₂
- Similar strength
- Better chloride resistance
- ASR resistant

Why can we get such high replacement levels?

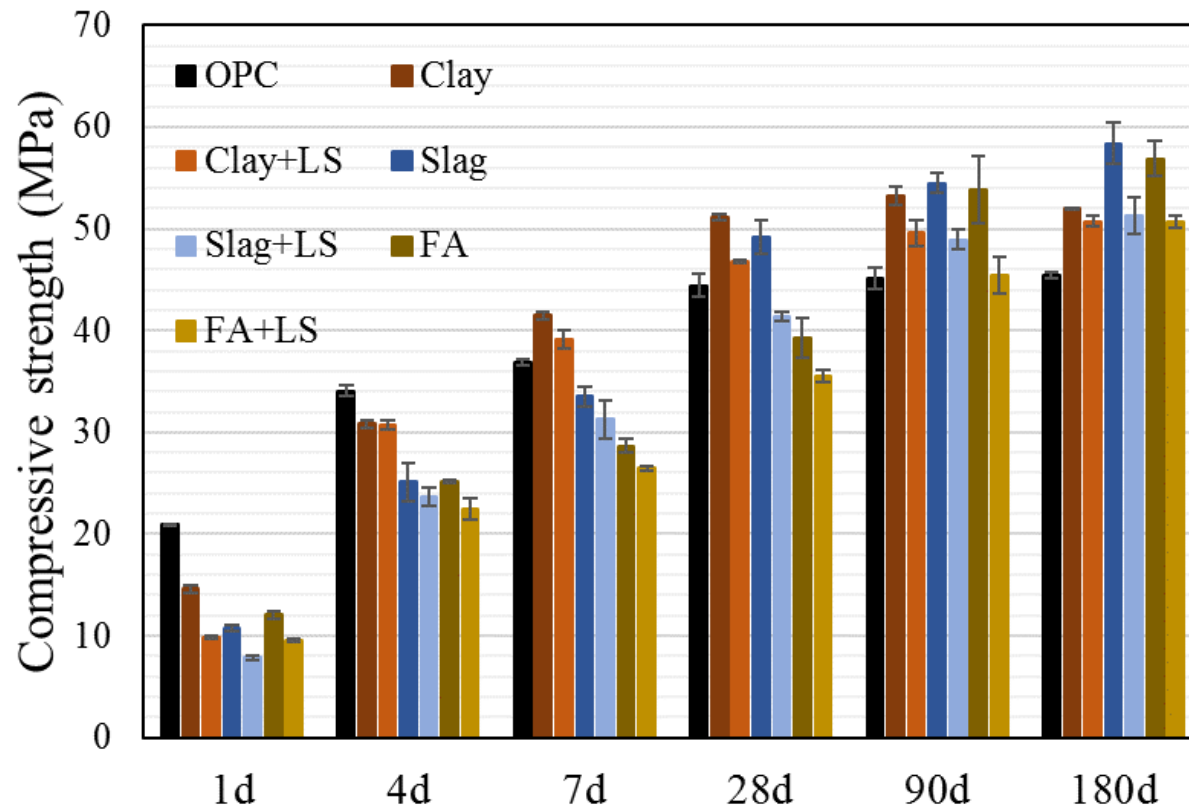
- Calcination of kaolinite at 700-850°C gives metakaolin: much more reactive than glassy SCMs



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



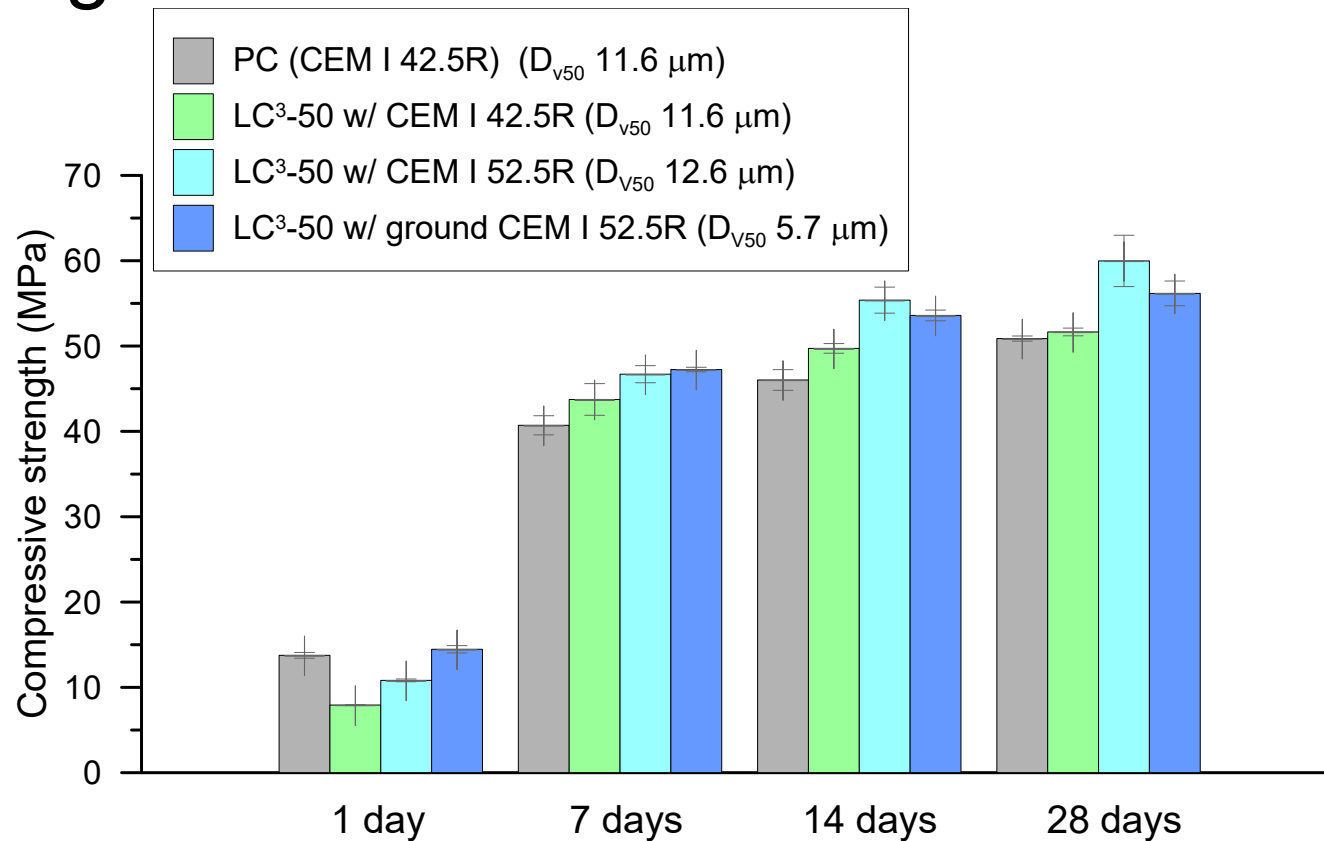
Comparison of calcined kaolinitic clay, slag and fly ash



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)

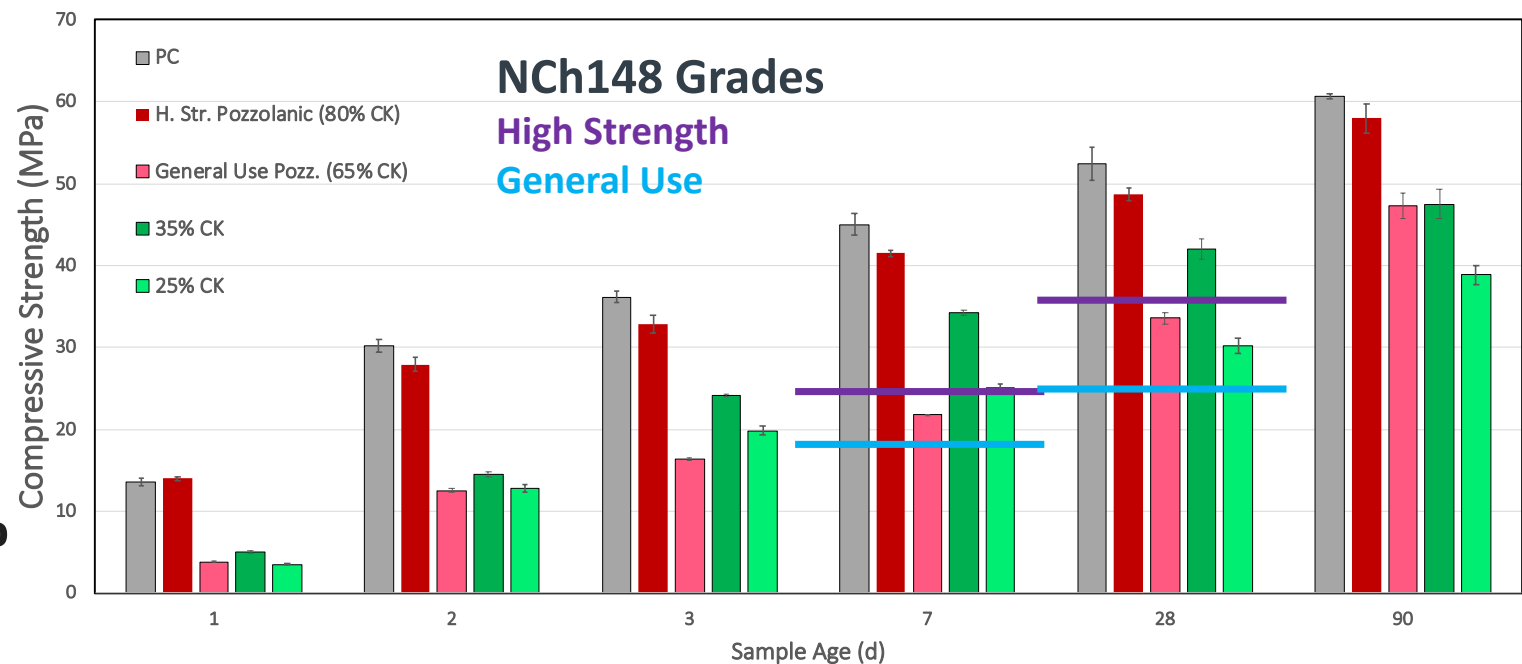


LC³-35 (35% CK)

LC³-25 (25% CK)

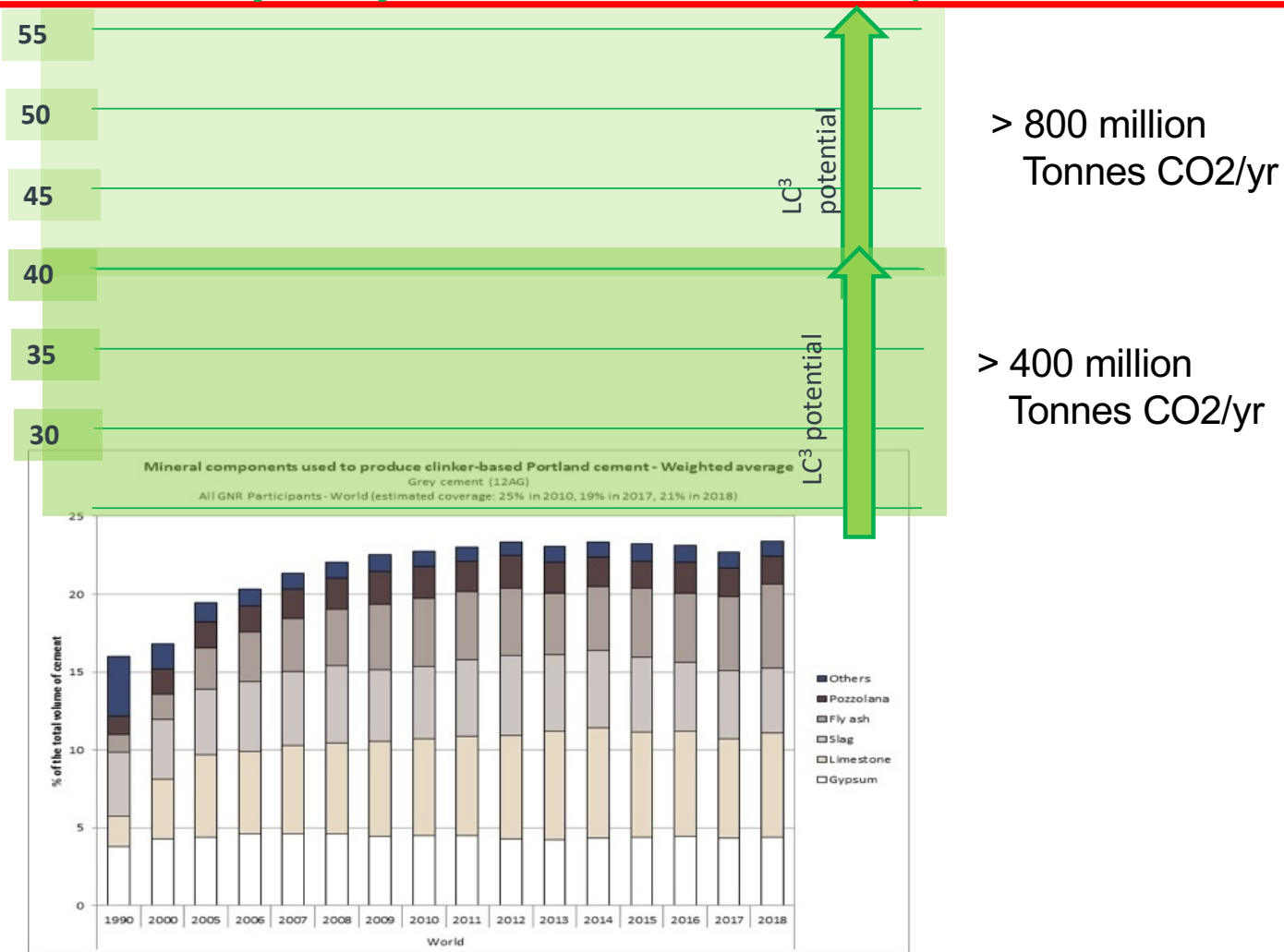
Clinker savings

40-45%



The reactivity of SCMs matters!

Calcined Clay only SCM which can expand substitution



Effet sur les performances du béton

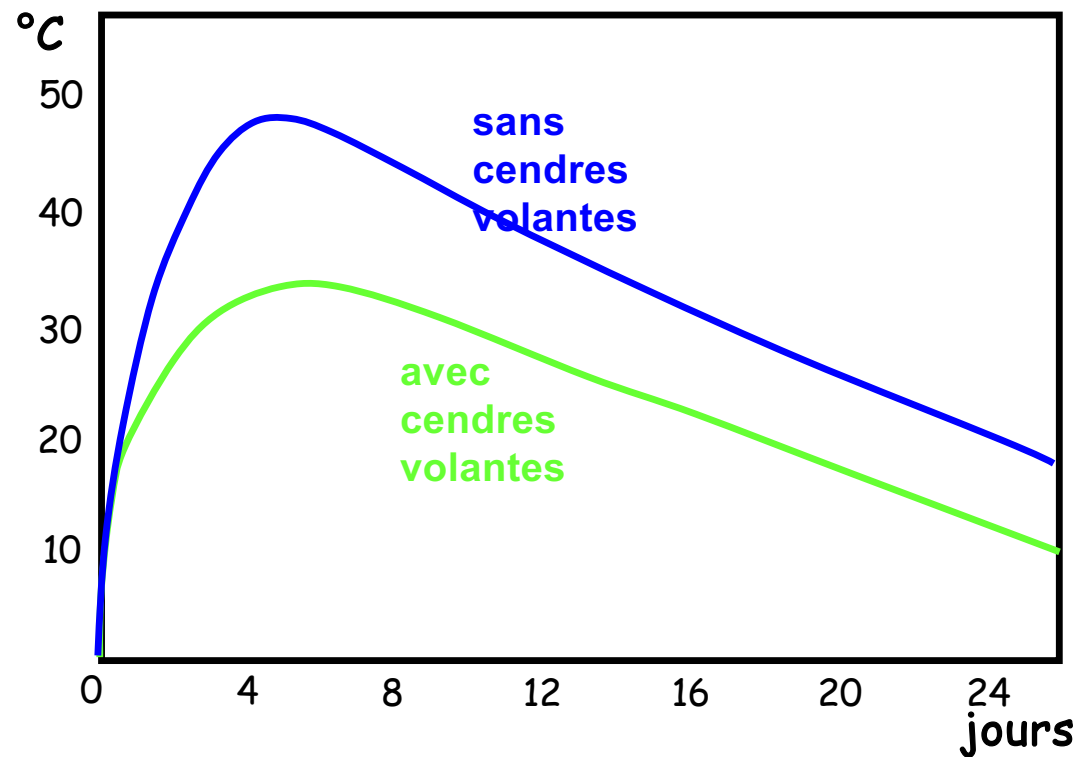
L'addition de matériaux remplaçant le ciment Portland permet d'avoir de **nouvelles propriétés** de béton.

Parmi celles-ci:

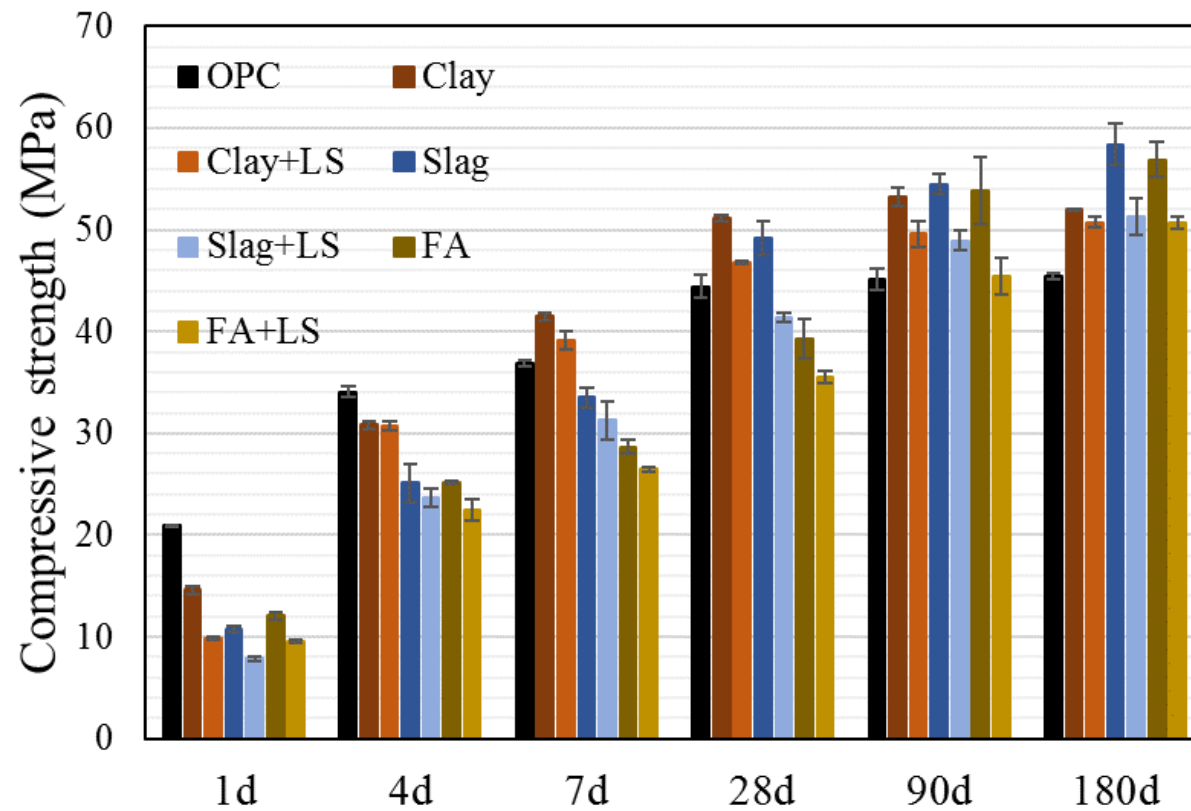
- Masse volumique plus faible
- Chaleur dégagée plus faible
- Réaction plus lente, décoffrage plus tardif
- Porosité réduite
- Résistance mécanique plus élevée à long terme
- Meilleure durabilité

7. Effet sur les performances du béton

7.1. Réduction de la chaleur dégagée

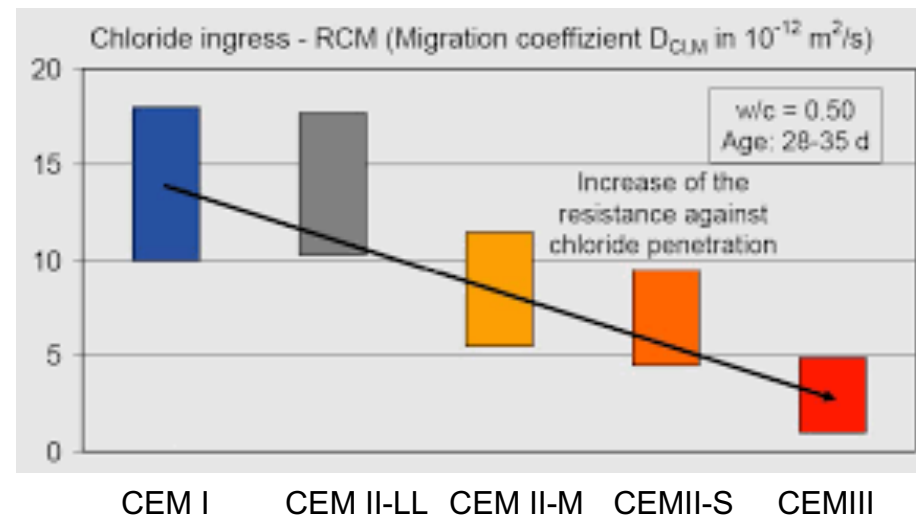


Augmentation des resistance long term



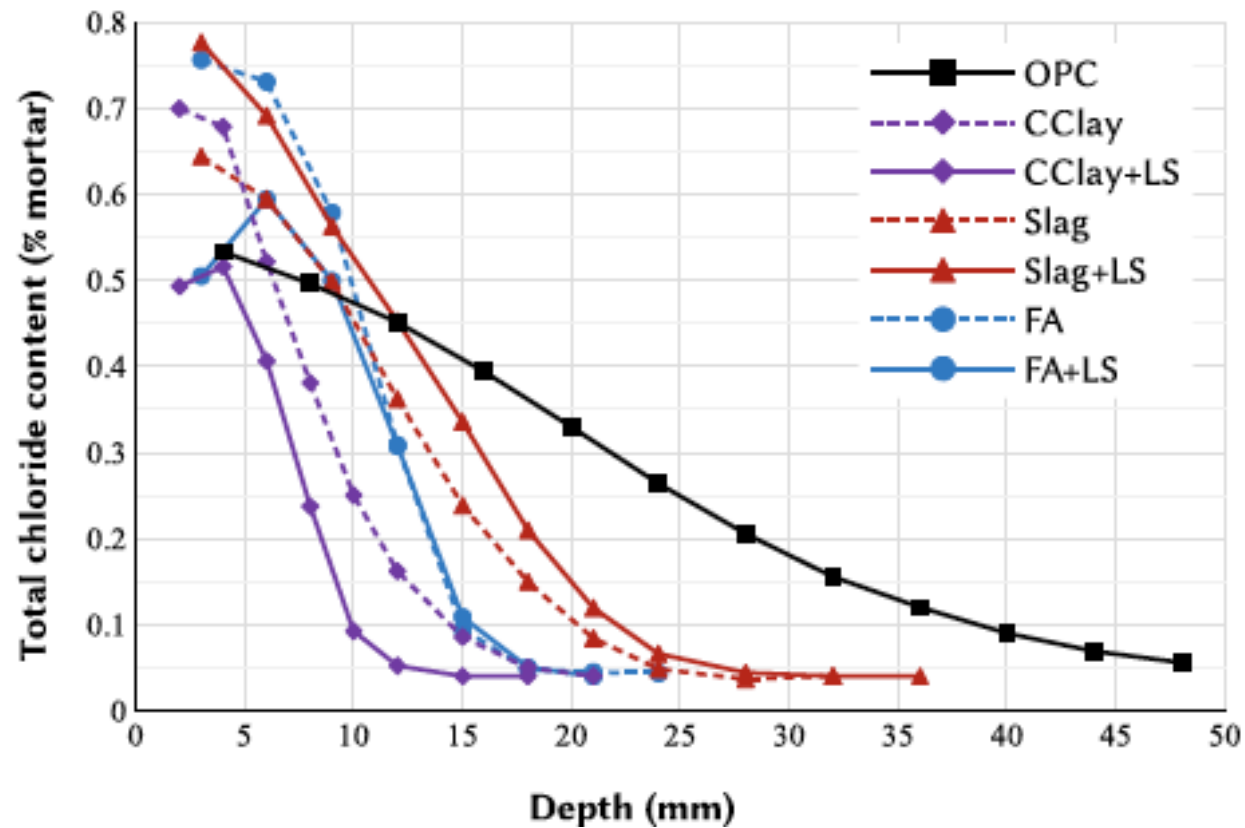
7. Effet sur les performances du béton

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

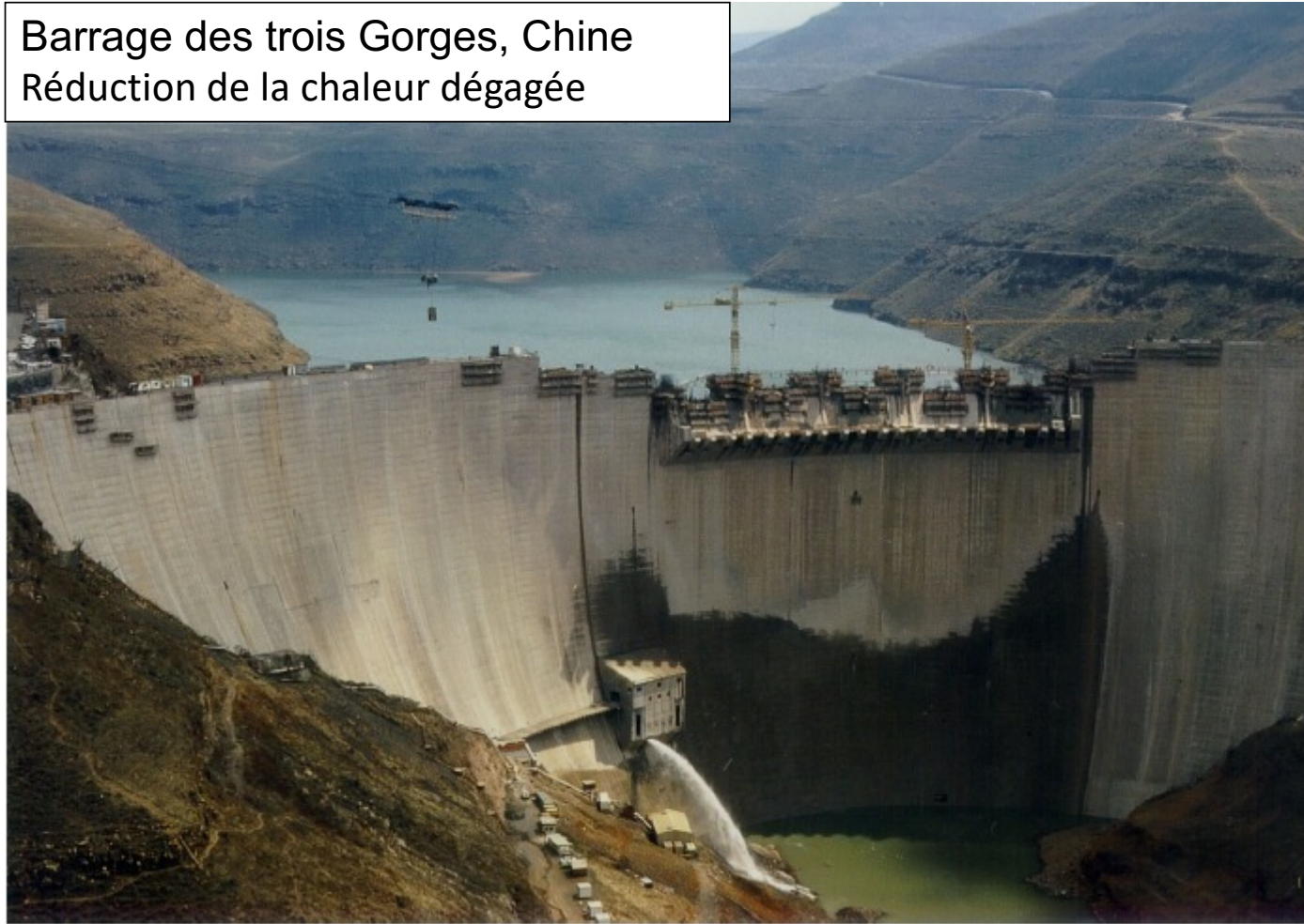
Hadrien Pantheon,
Rome

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 m³ de béton dans la structure –
Class I fly ash ciment

8. Exemples d'utilisation



Confédération bridge, Canada:

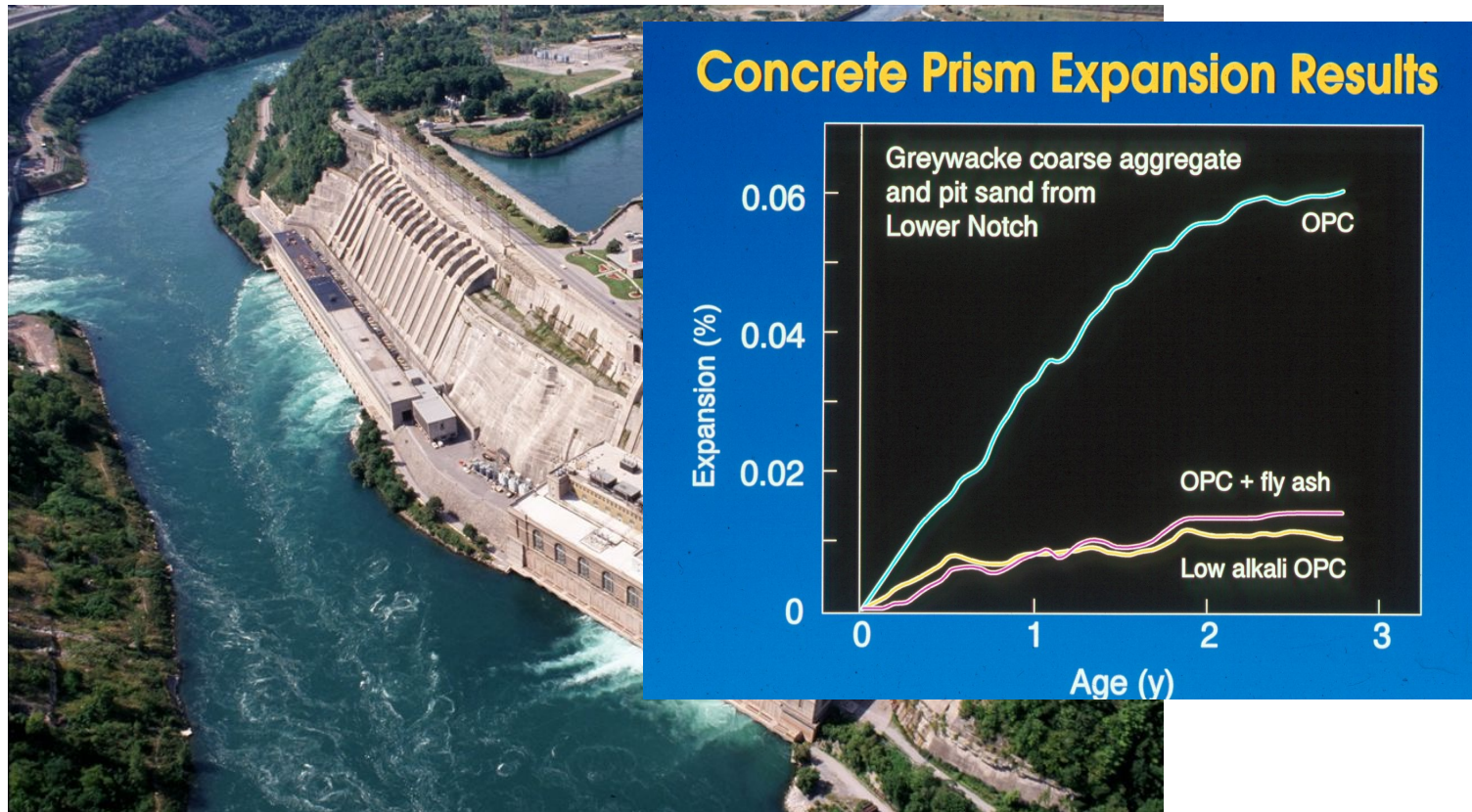
ciment+FS pré-mélangé +cendres volantes ajoutées au stade de fabrication du béton – pour augmenter la durabilité, améliorer la pompabilité, réduire la chaleur, et obtenir une meilleure résistance. + Charges de glace

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



Constructions with LC3 materials

2014 → 2024





Some examples Of CO₂ saving in application

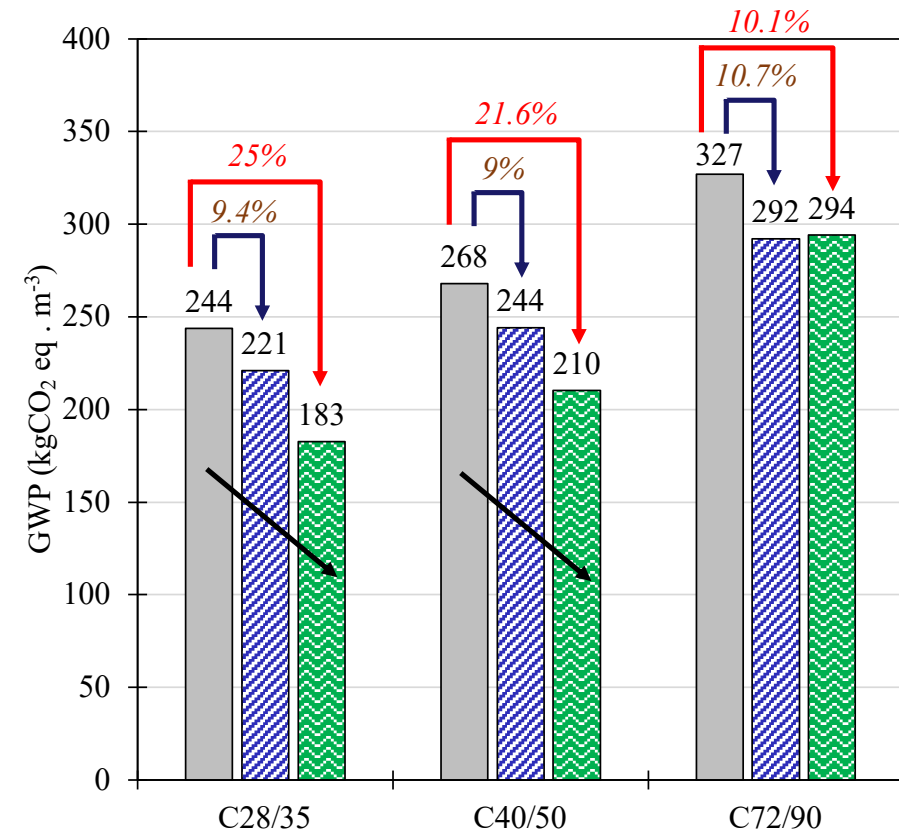
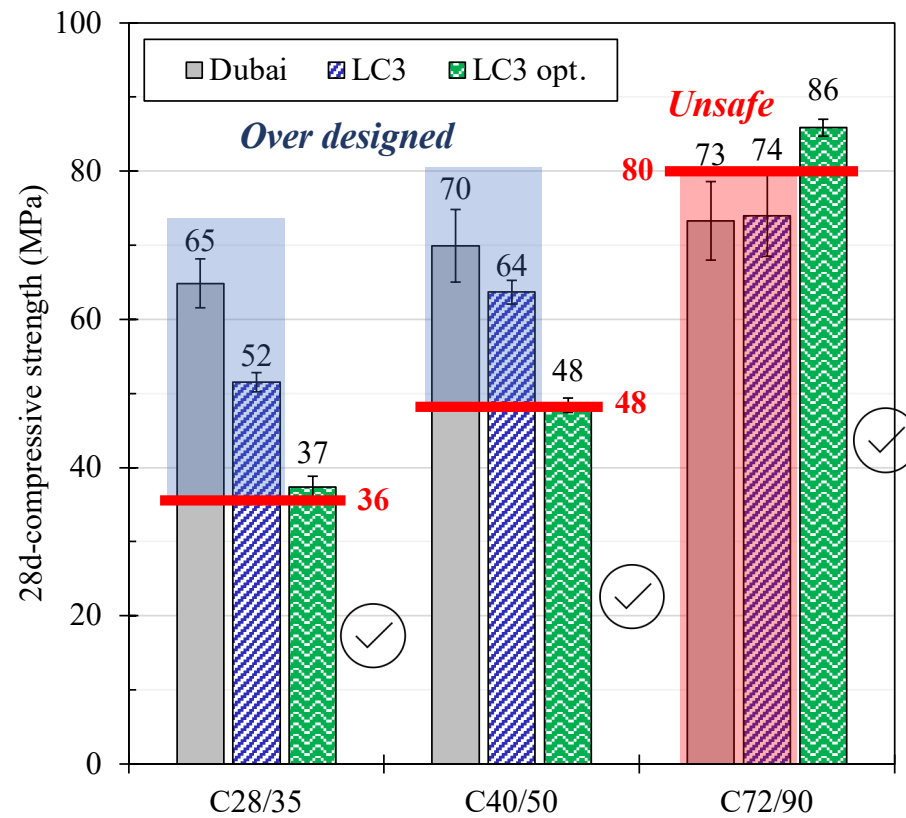
Comparison of LC3 concrete with concretes prescribed in Dubai

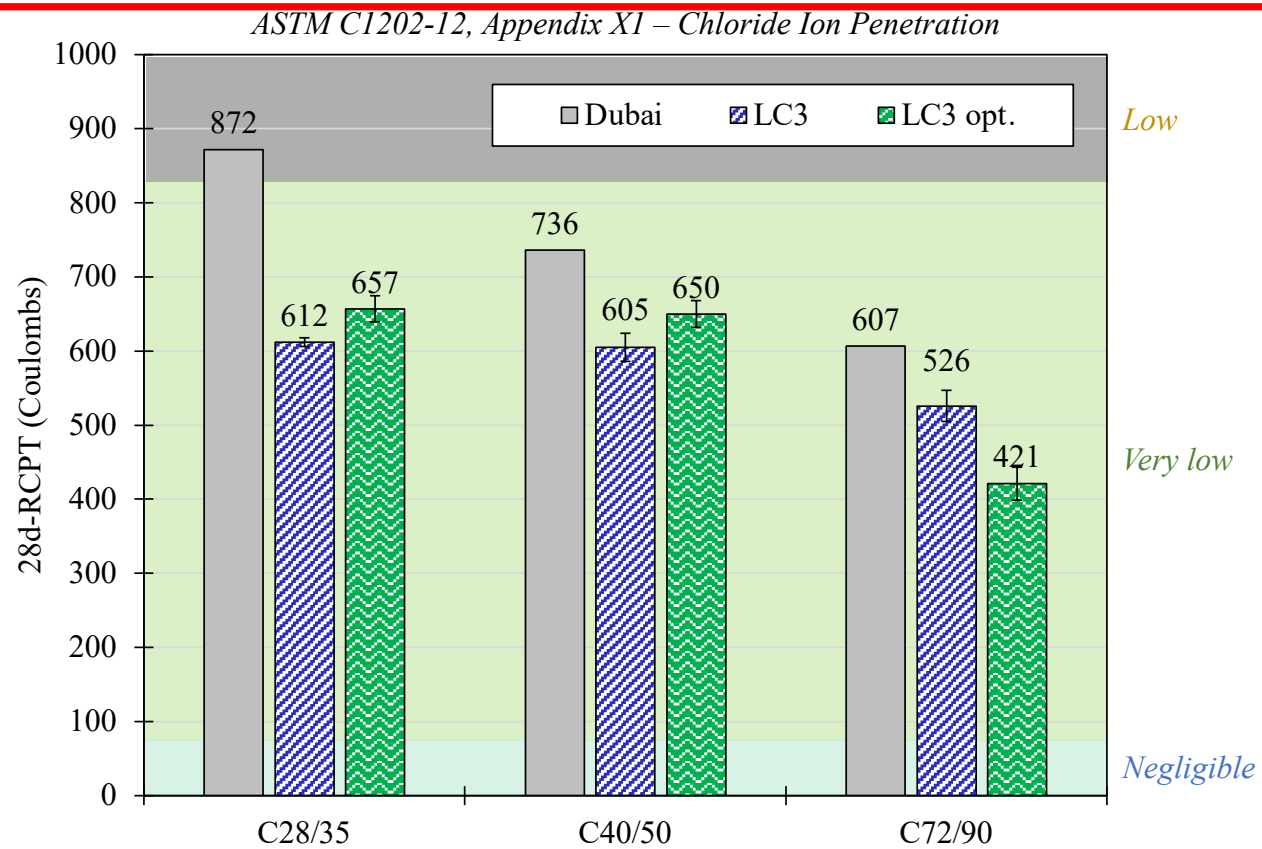
A report on the Dubai Building Code for sustainable concrete - 2021 edition

Strength class		C28/35		C40/50		C72/90	
Materials (kg/m³)	Dubai		Dubai		Dubai		
Total binder	380		420		510		
GGBS ratio	36%		36%		26%		
SF ratio					8%		
w/b ratio	0.42		0.36		0.29		
SP (%)	0.50		0.50		0.75		
Slump test (mm)	10		10		10		

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

Compressive strength and GWP



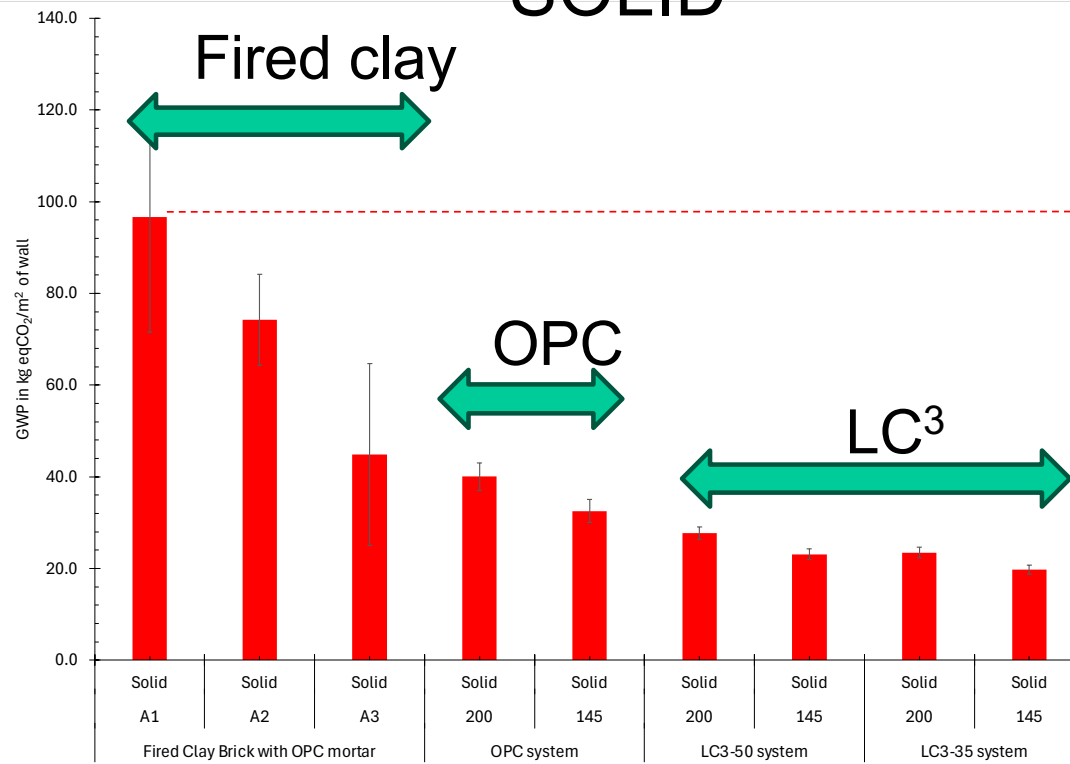


Concrete blocks

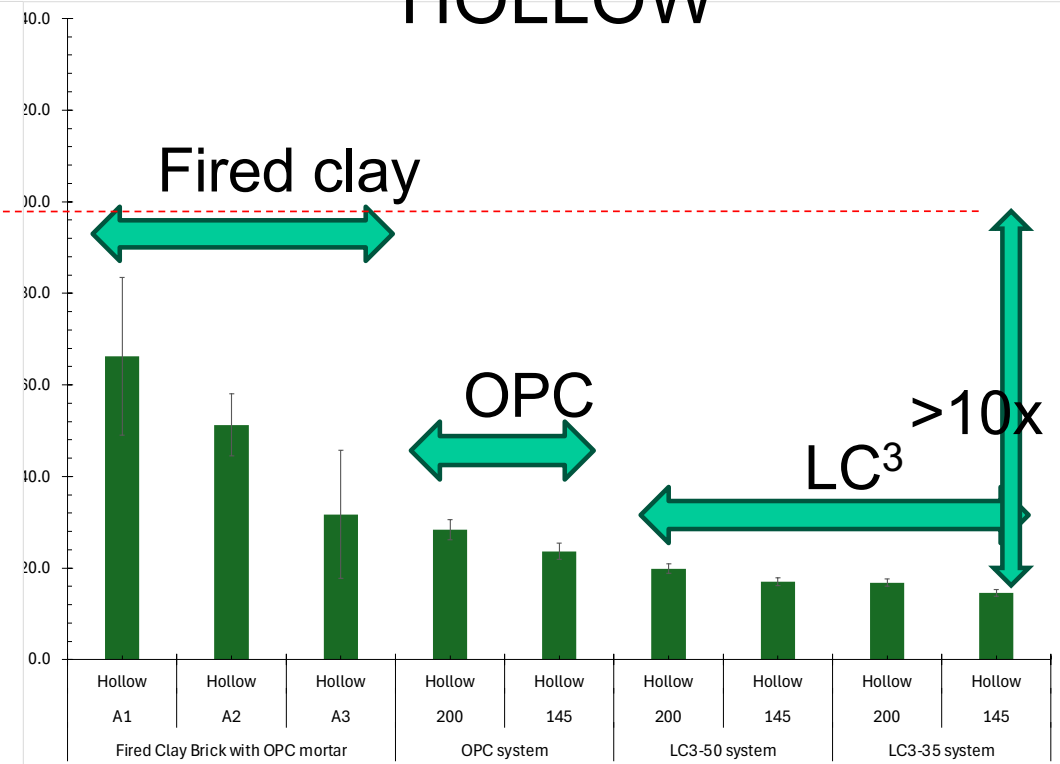




SOLID



HOLLOW



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

<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

Les fillers

bci-001_1995_63__142_d.pdf

Guide pratique du béton - Holcim