

---

# Comment le béton liquide se transforme en solide rigide?

---

Prof. Karen Scrivener  
Laboratoire des Matériaux de Construction



# Sommaire

---

1. Réaction de durcissement: hydratation
2. Dissolution des grains de ciment
3. Précipitation des hydrates
  - 3.1. C-S-H
  - 3.2. CH
  - 3.3. Ettringite
4. Changement de volume
5. Cinétique de la réaction d'hydratation
  - 5.1. C3S + C2S
  - 5.2. C3A
6. L'essentiel

# 1. Réaction de durcissement

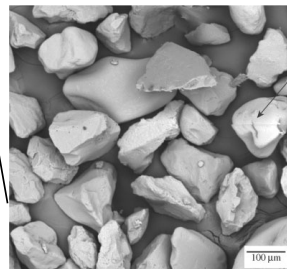
## Rappel sur le ciment



Echelle  
Macro



Echelle  
micro

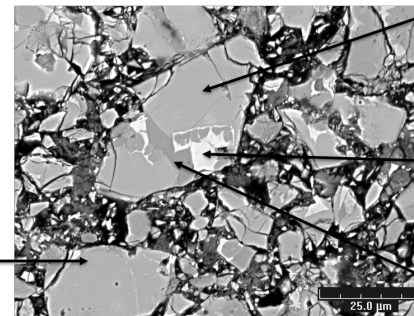


Composition chimique des grains:

Alite,  $C_3S$

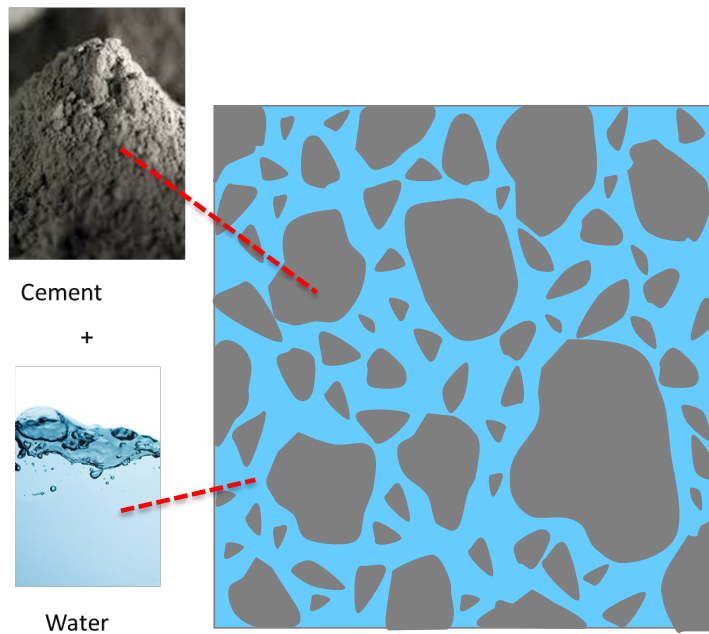
Ferrite,  $C_4AF$

Belite,  $C_2S$



# 1. Réaction de durcissement

---

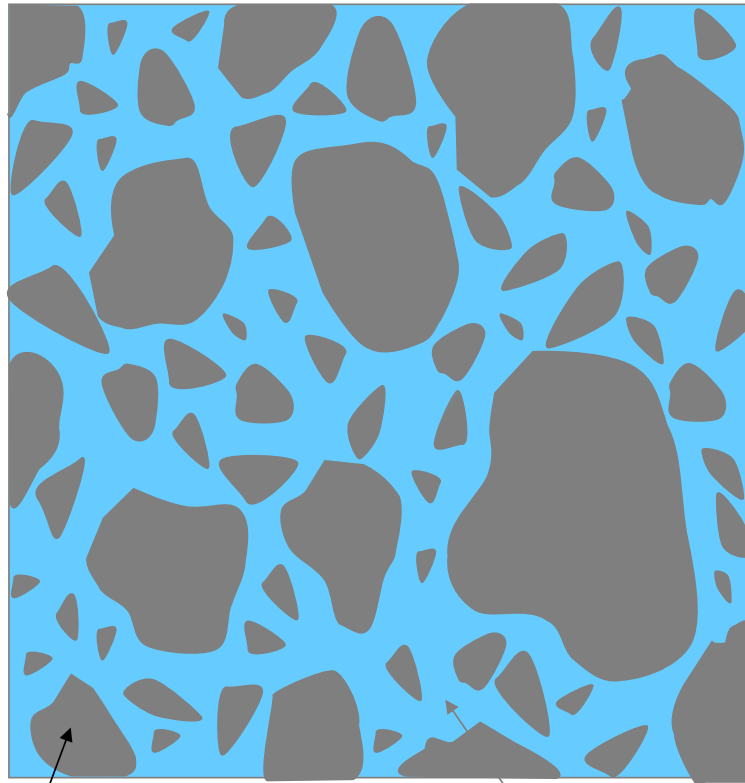


La recette du durcissement:

Ciment  
+  
Eau  
+  
Temps!

# 1. Réaction de durcissement

---



Grain ciment

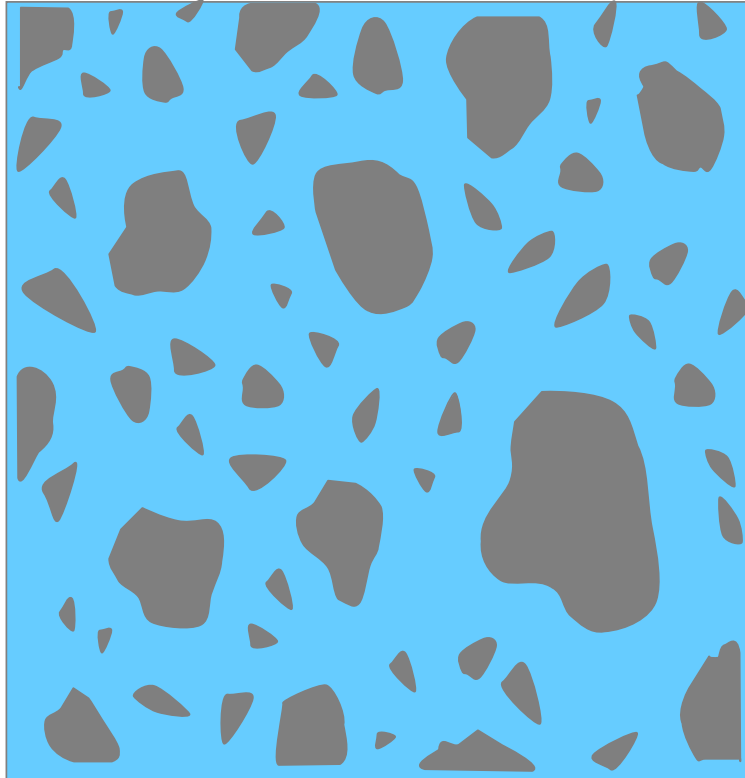
eau

Le ciment (poudre) est mélangé avec l'eau

Au début, les grains de ciment flottent dans l'eau. Ceci donne une grande fluidité à la matière béton qui peut être moulée dans n'importe quelle forme.

# 1. Réaction de durcissement

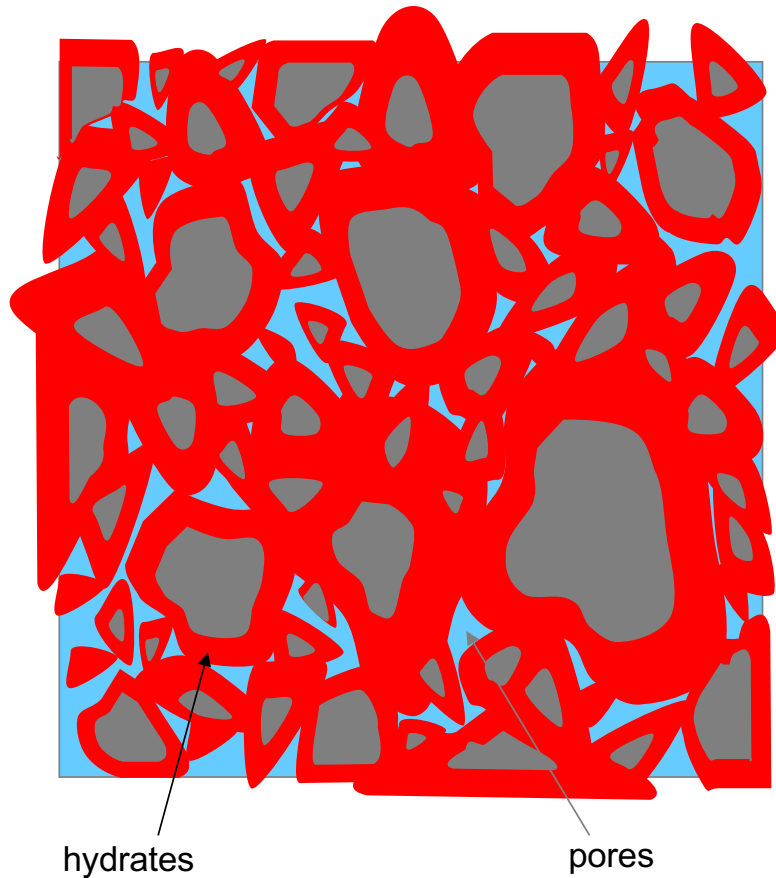
---



Les grains de ciment commencent à se dissoudre.

# 1. Réaction de durcissement

---

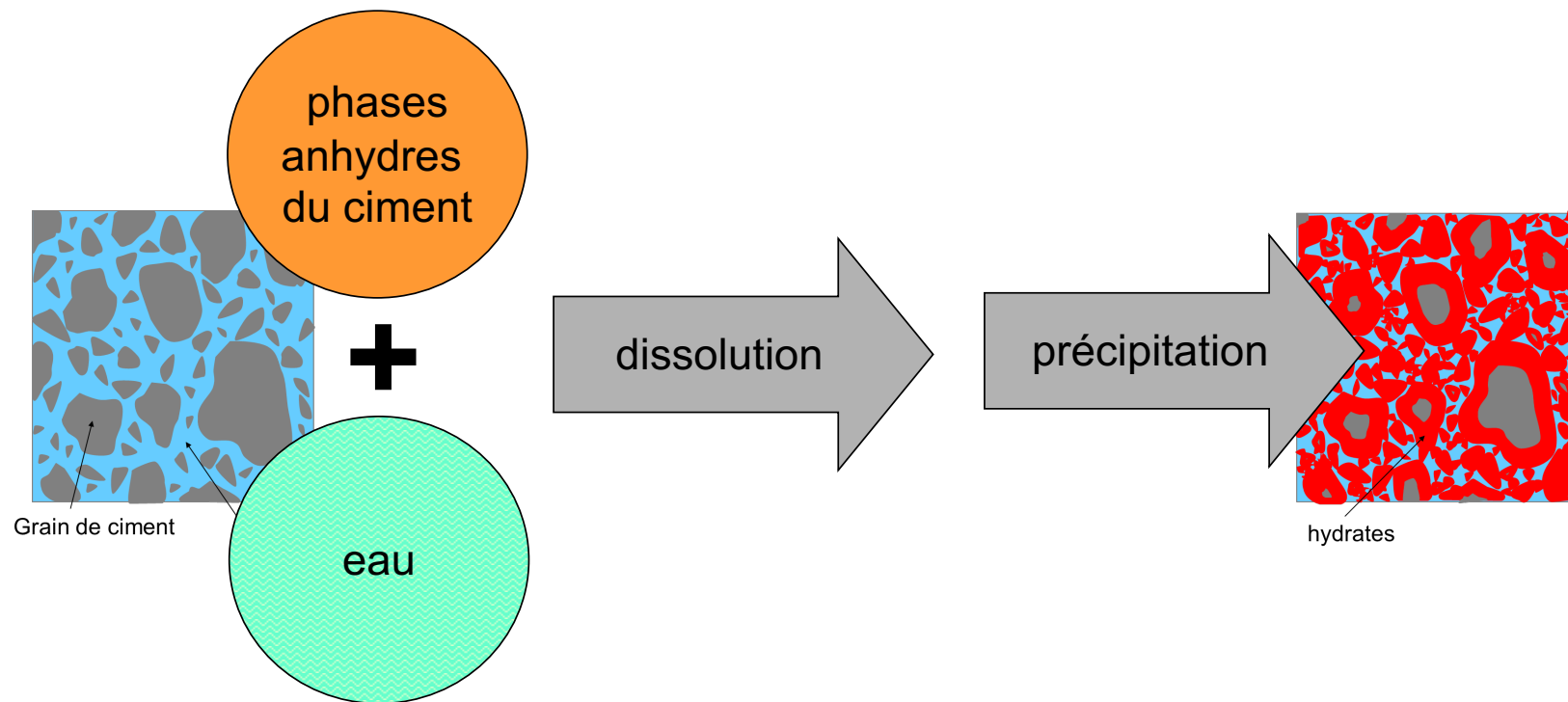


Les grains de ciment se dissolvent de plus en plus,

Et les hydrates précipitent. Les hydrates sont des nouveaux solides de plus grand volume et qui connectent les grains ensemble: on obtient un béton rigide à ce moment là

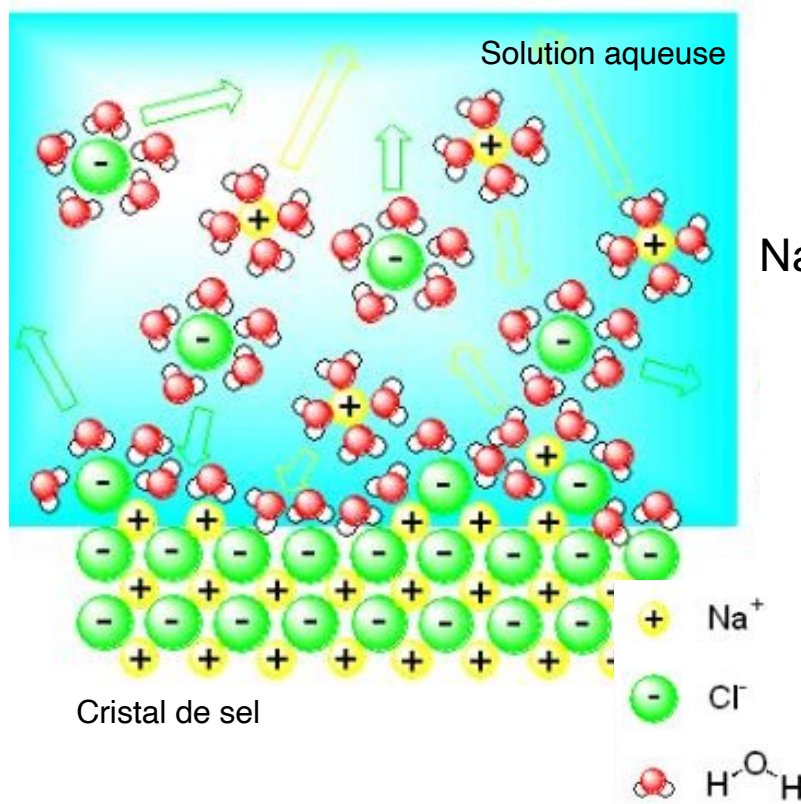
# 1. Réaction de durcissement: hydratation

---

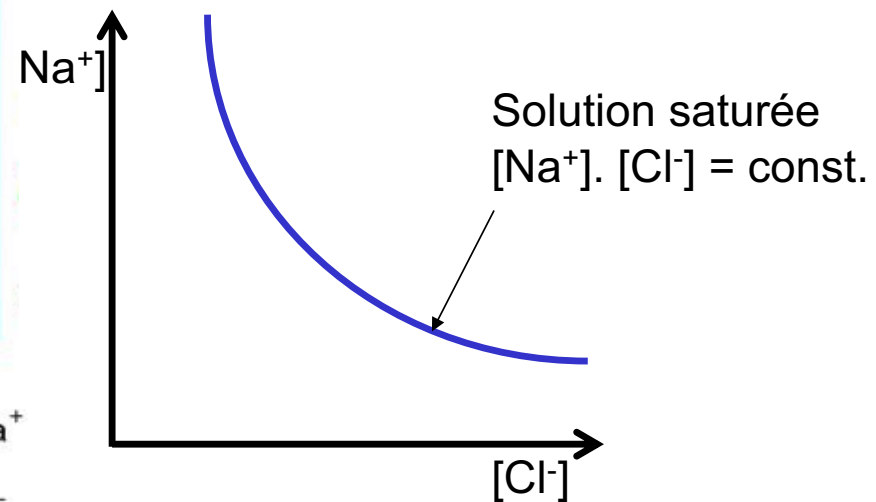




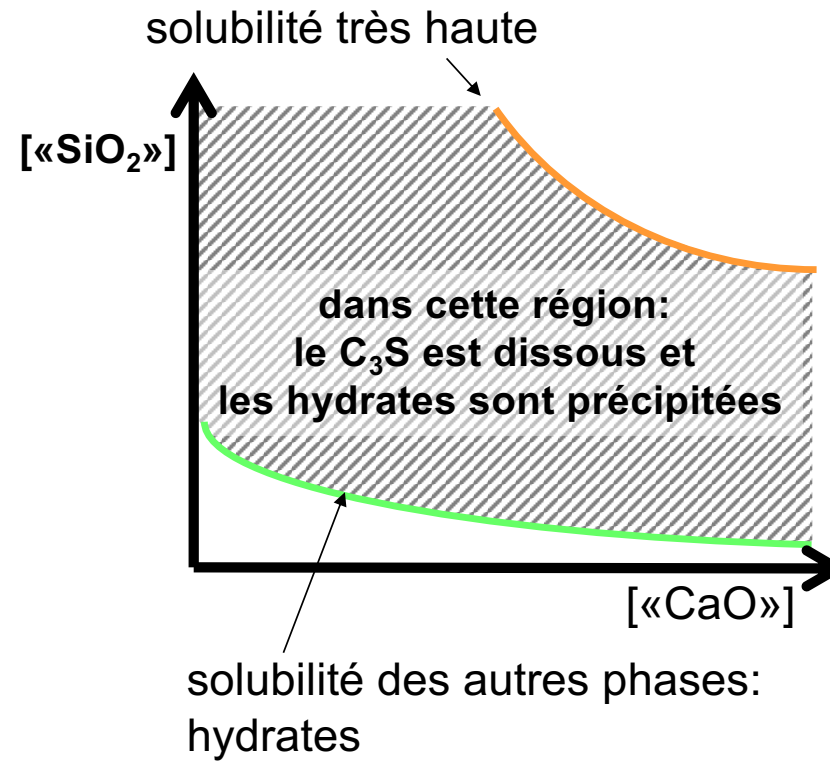
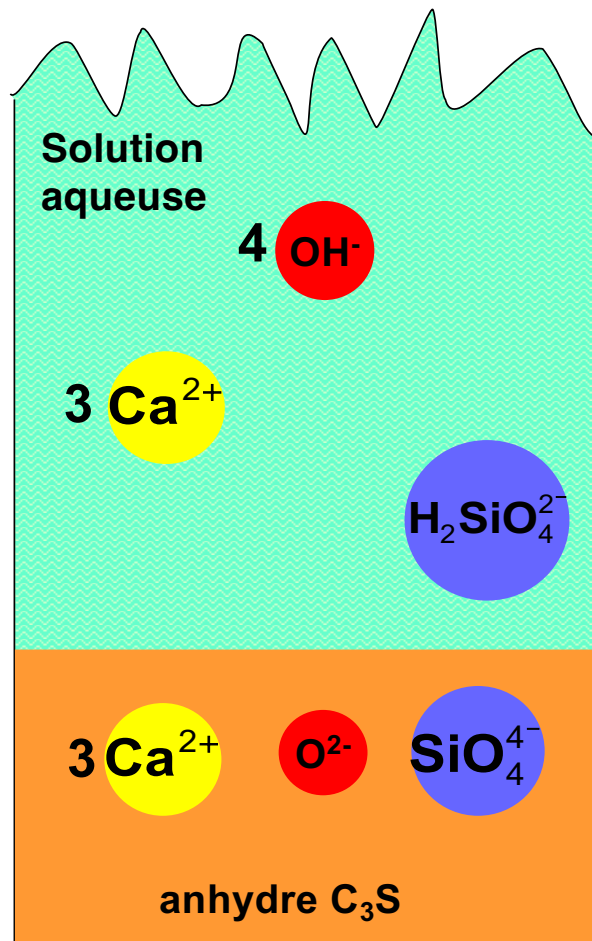
## 2. Dissolution: exemple du sel



Il y a une « *limite de solubilité* »  
au-delà de laquelle la solution est  
« *saturée* »

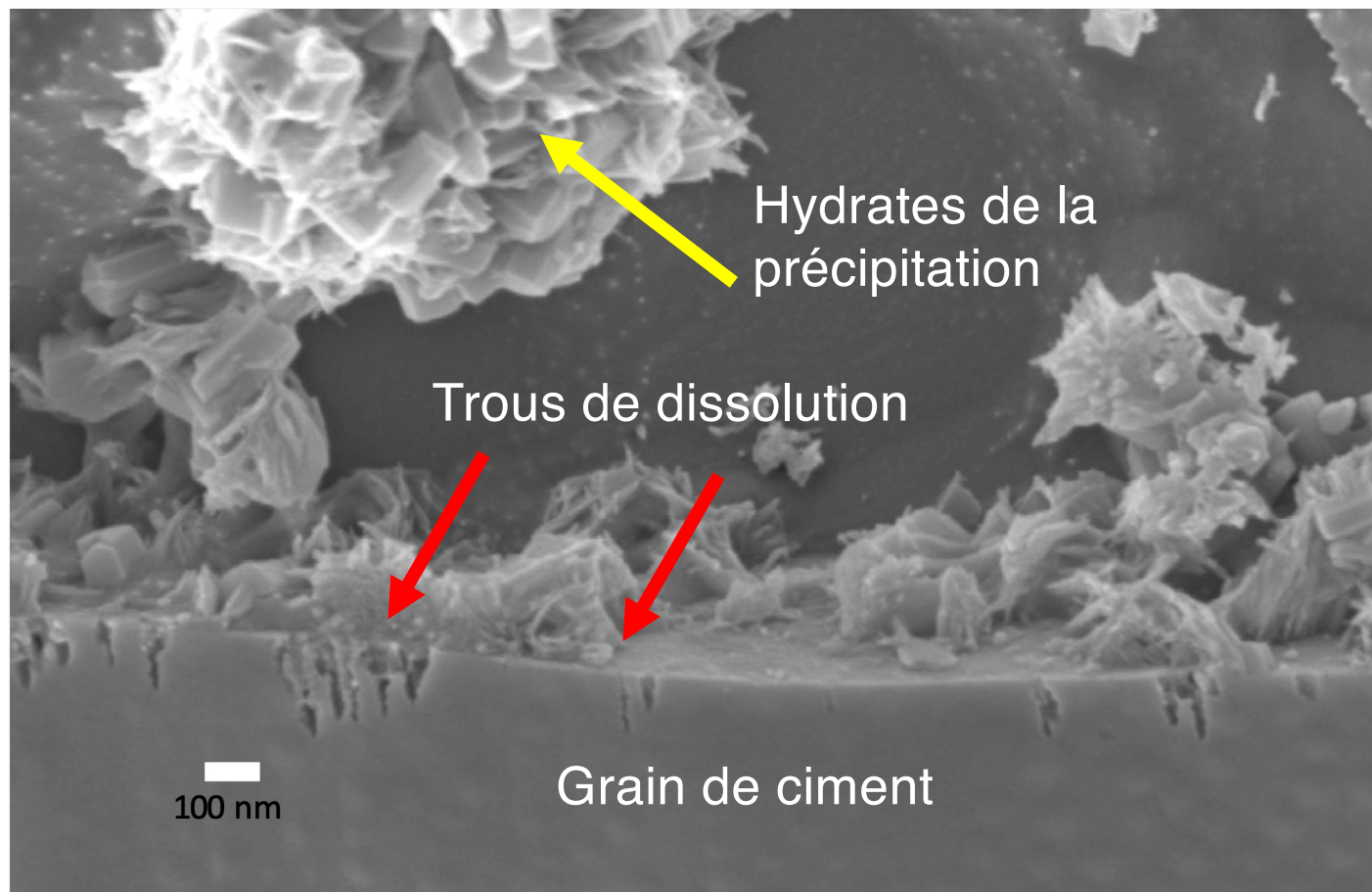


## 2. Dissolution des grains de ciment



## 2. Dissolution des grains de ciment

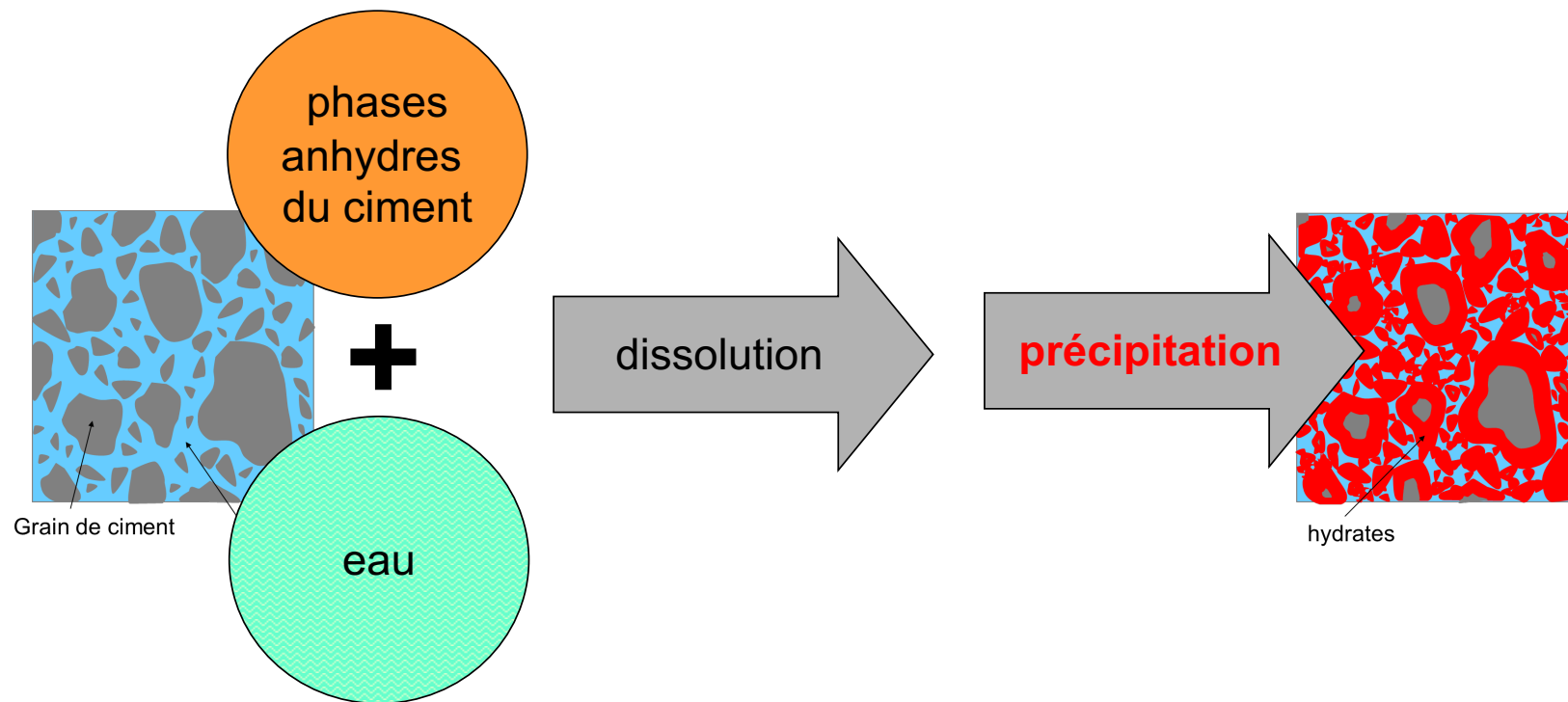
---



*Image: Luc Nicoleau avec un cryoSEM*

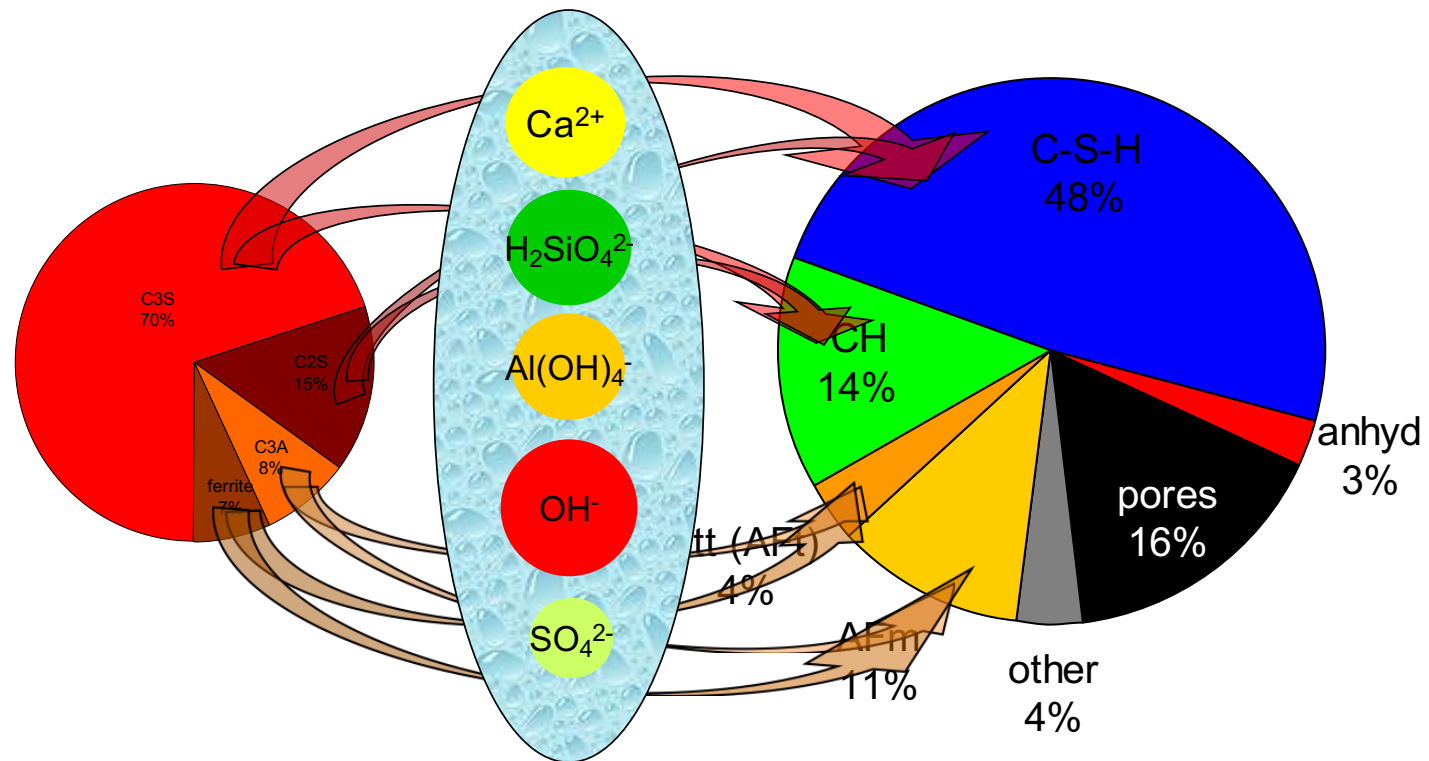
### 3. Précipitation des hydrates

---

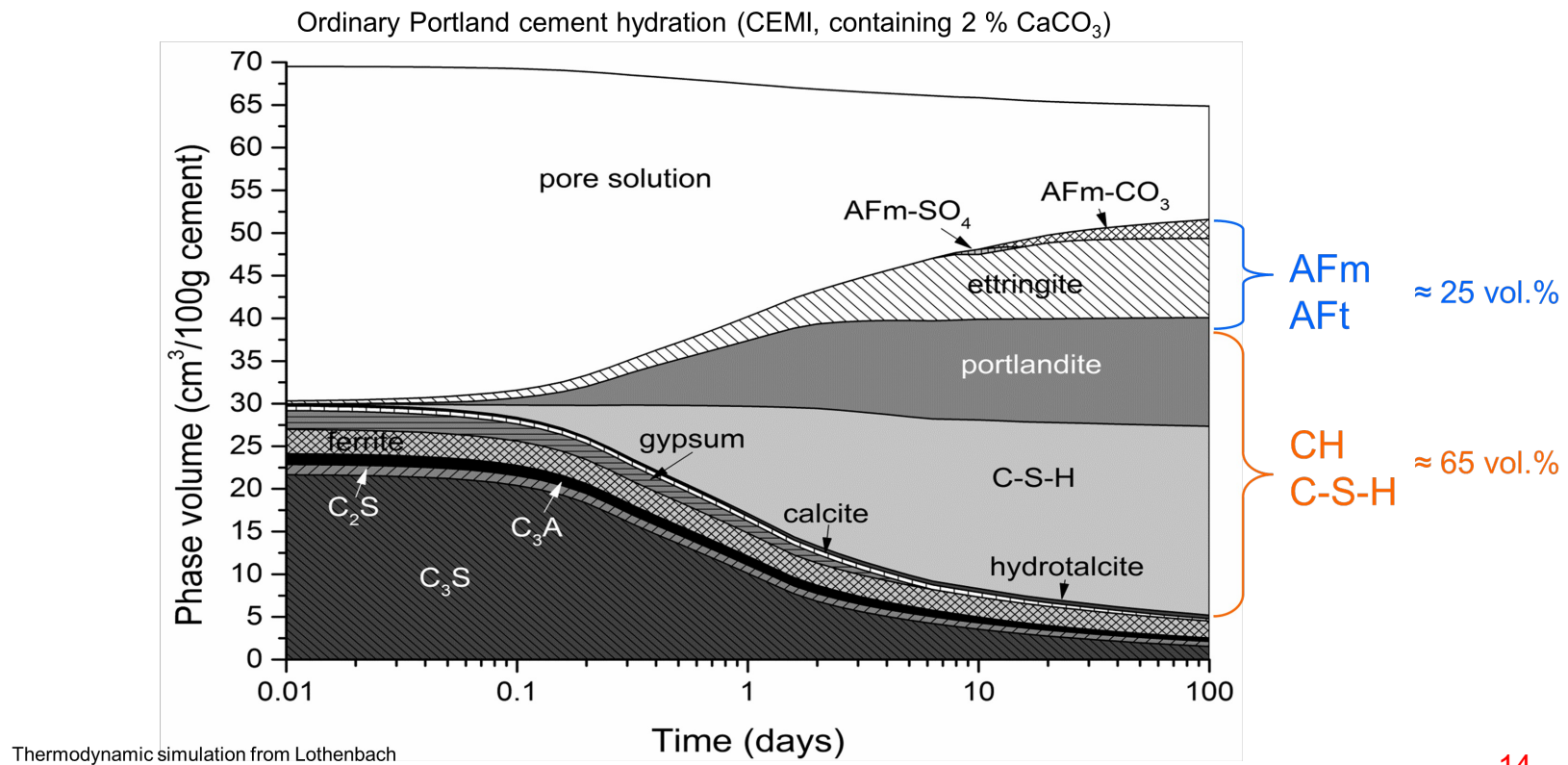


### 3. Précipitation des hydrates

---



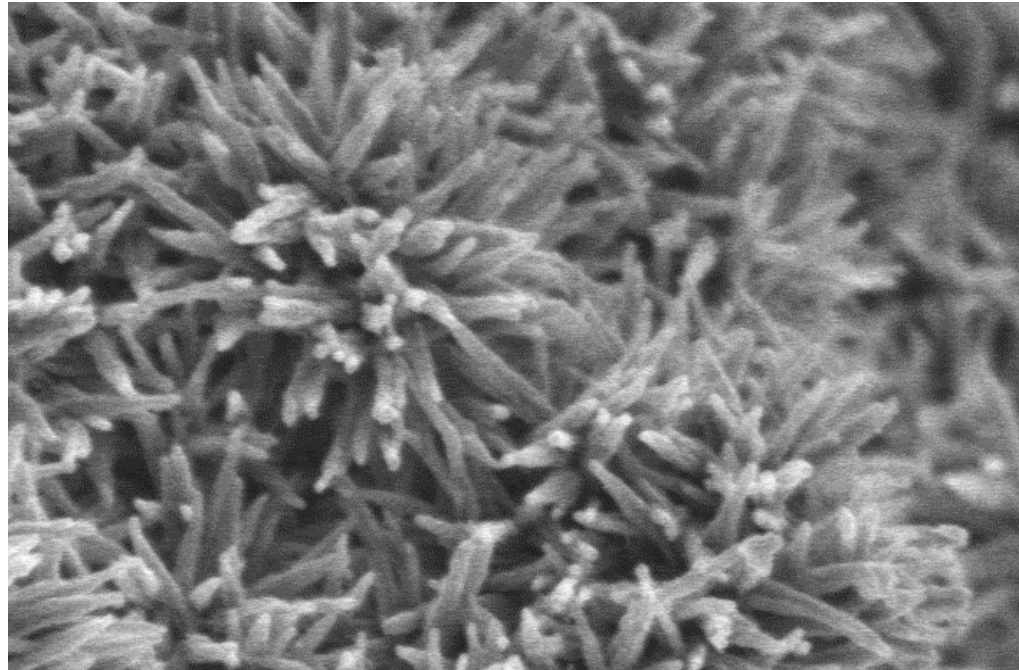
### 3. Précipitation des hydrates



### 3.1. C-S-H: composition variable

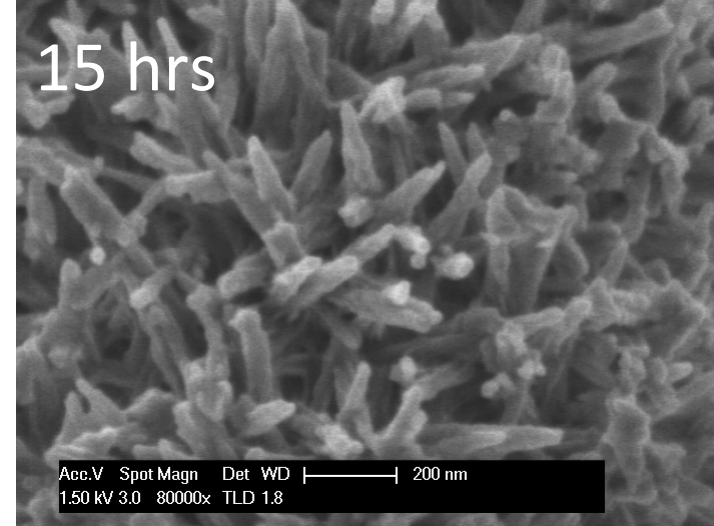
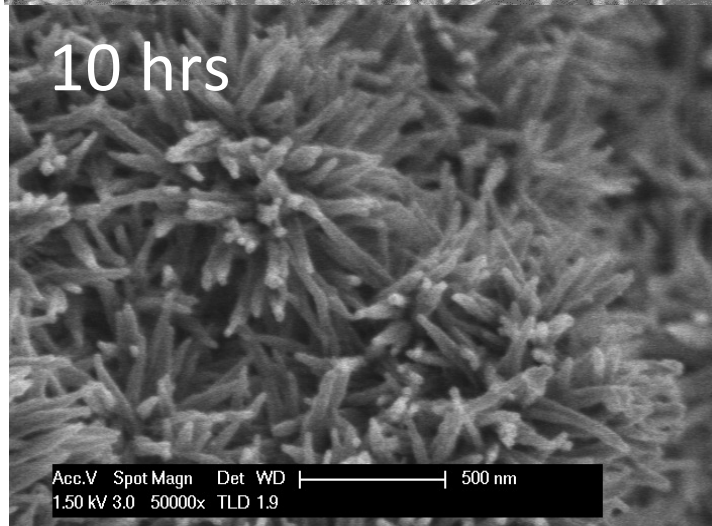
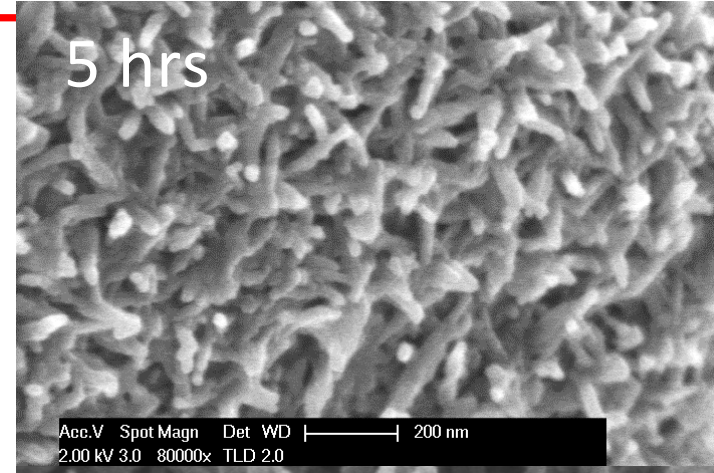
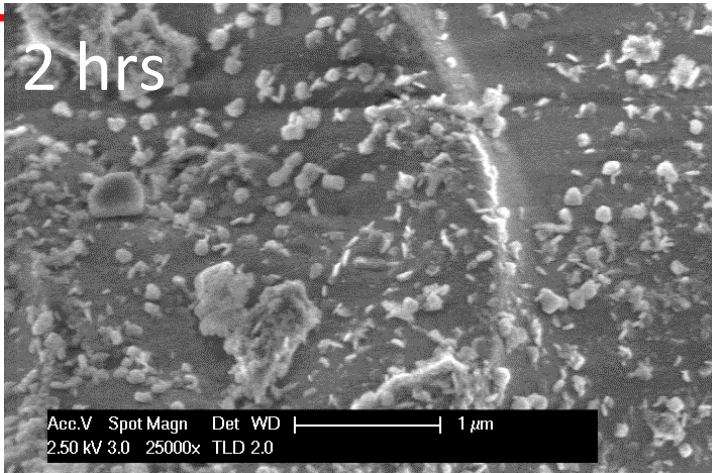
---

**C**alcium **S**ilicate **H**ydrate





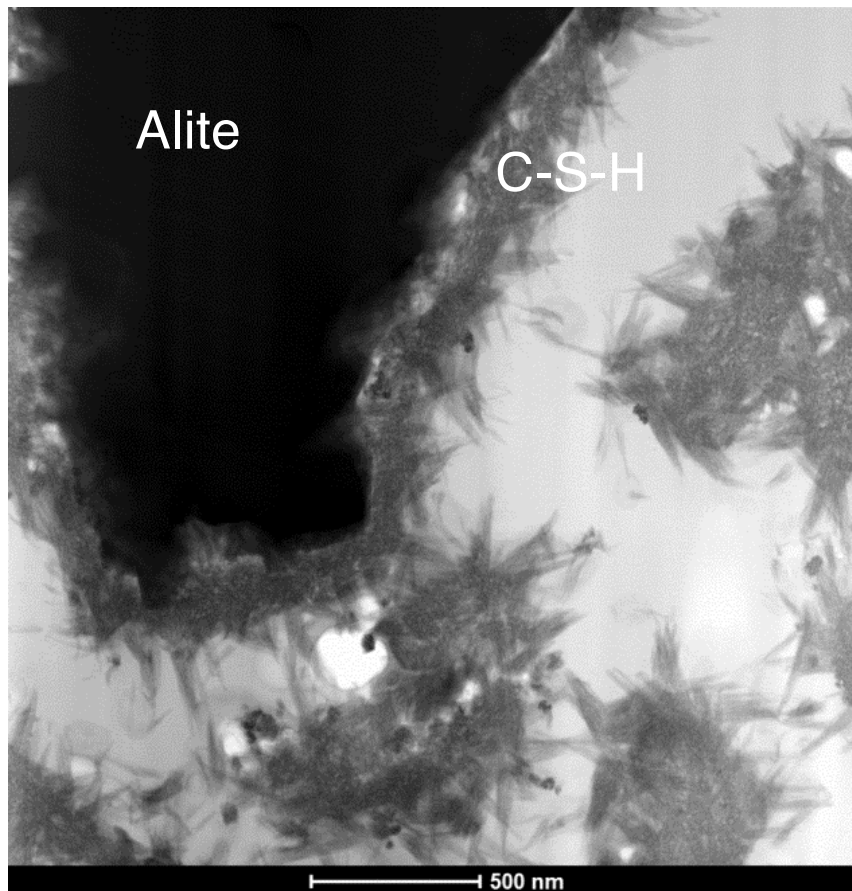
### 3.1. C-S-H: précipitation et croissance





## 3.1. C-S-H

---



C-S-H précipitent sur la **surface** des grains de ciment

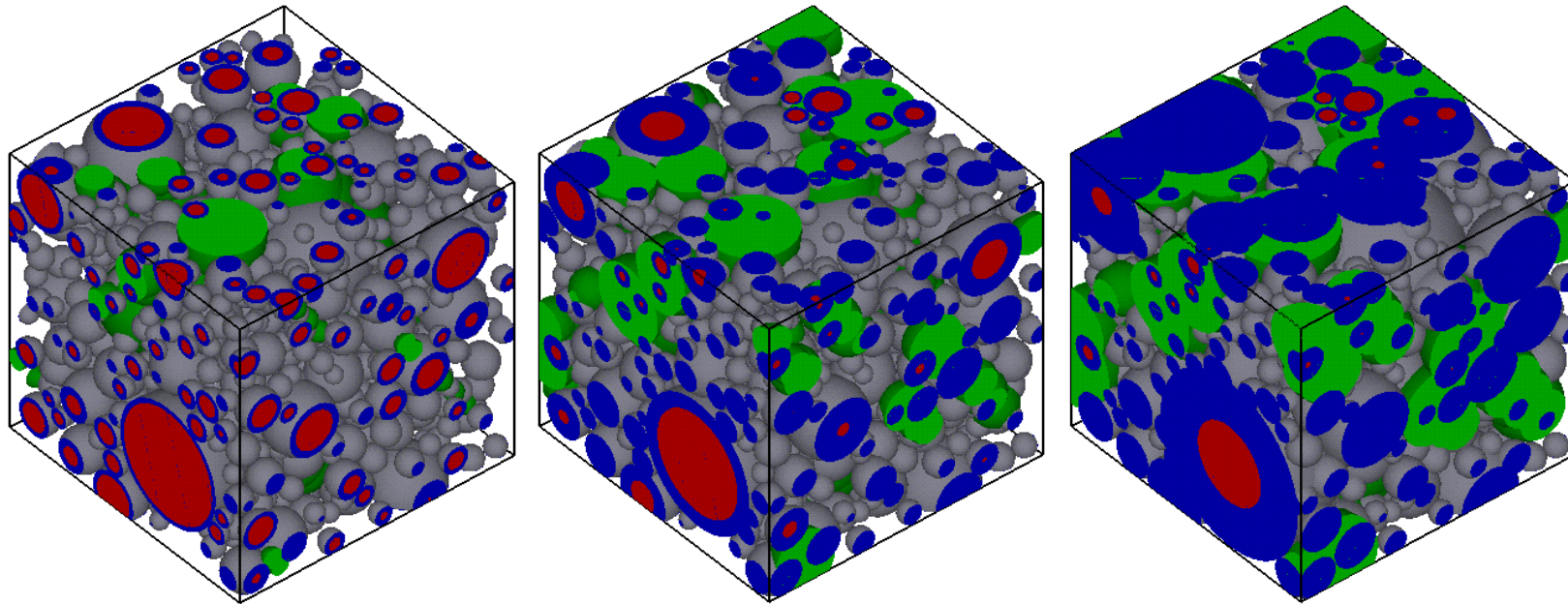
Ils **remplissent** l'**espace** laissé par l'eau

Ils représentent **~50%** du volume d'hydrates

Image: Bazzoni 2014 avec un TEM

## 3.1. C-S-H

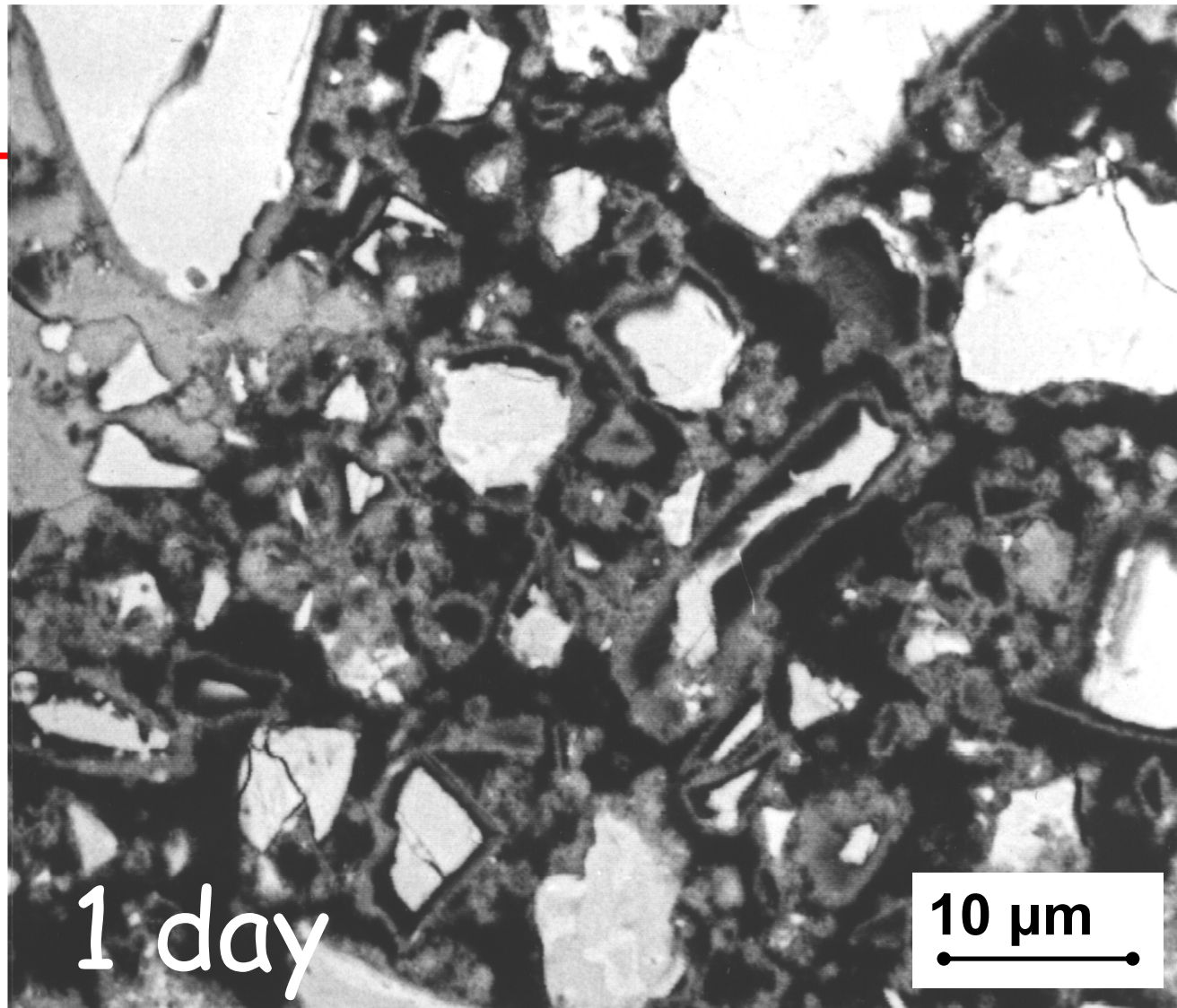
---



2D vs 3D

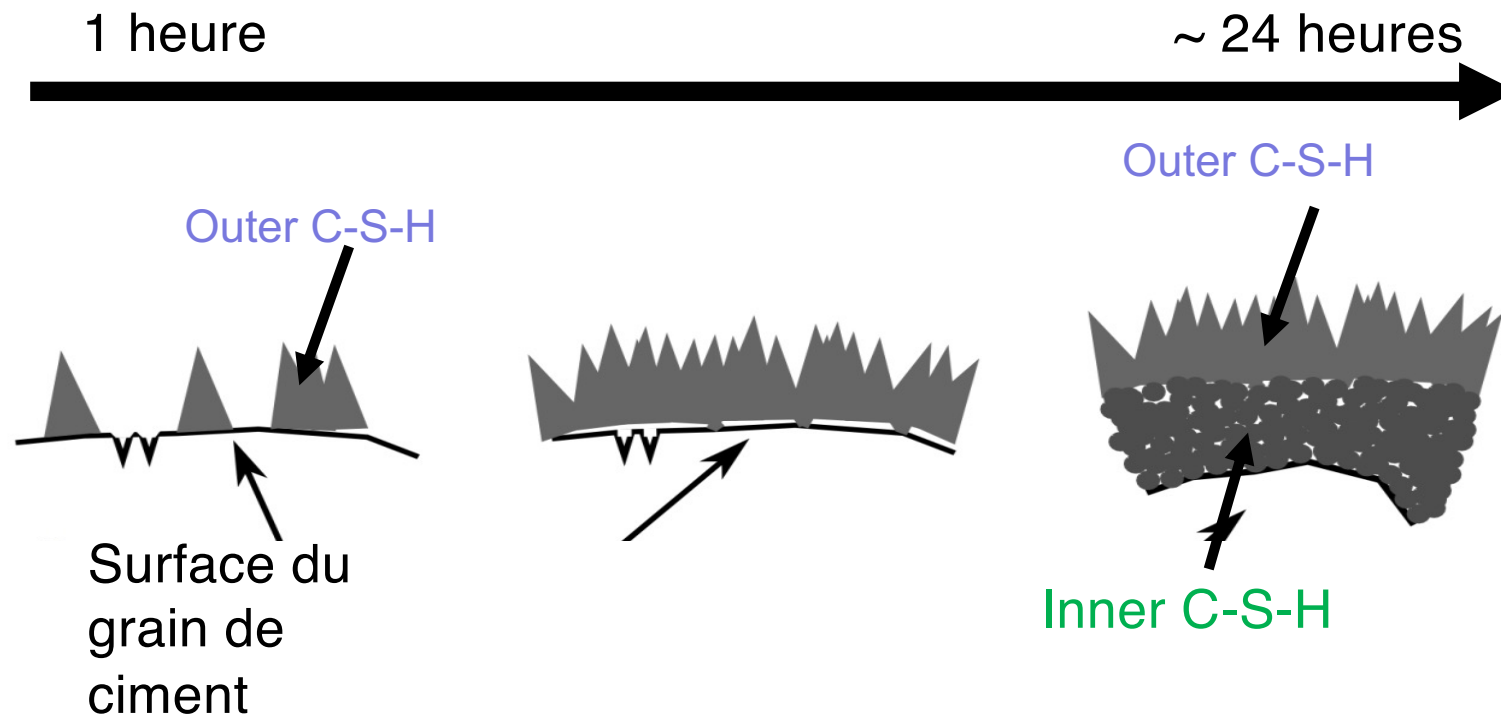
Il n'y a pas besoin de beaucoup d'hydratation pour lier les grains de ciment ensemble

La prise peut intervenir à partir de ~2% hydratation



### 3.1. C-S-H: 2 types

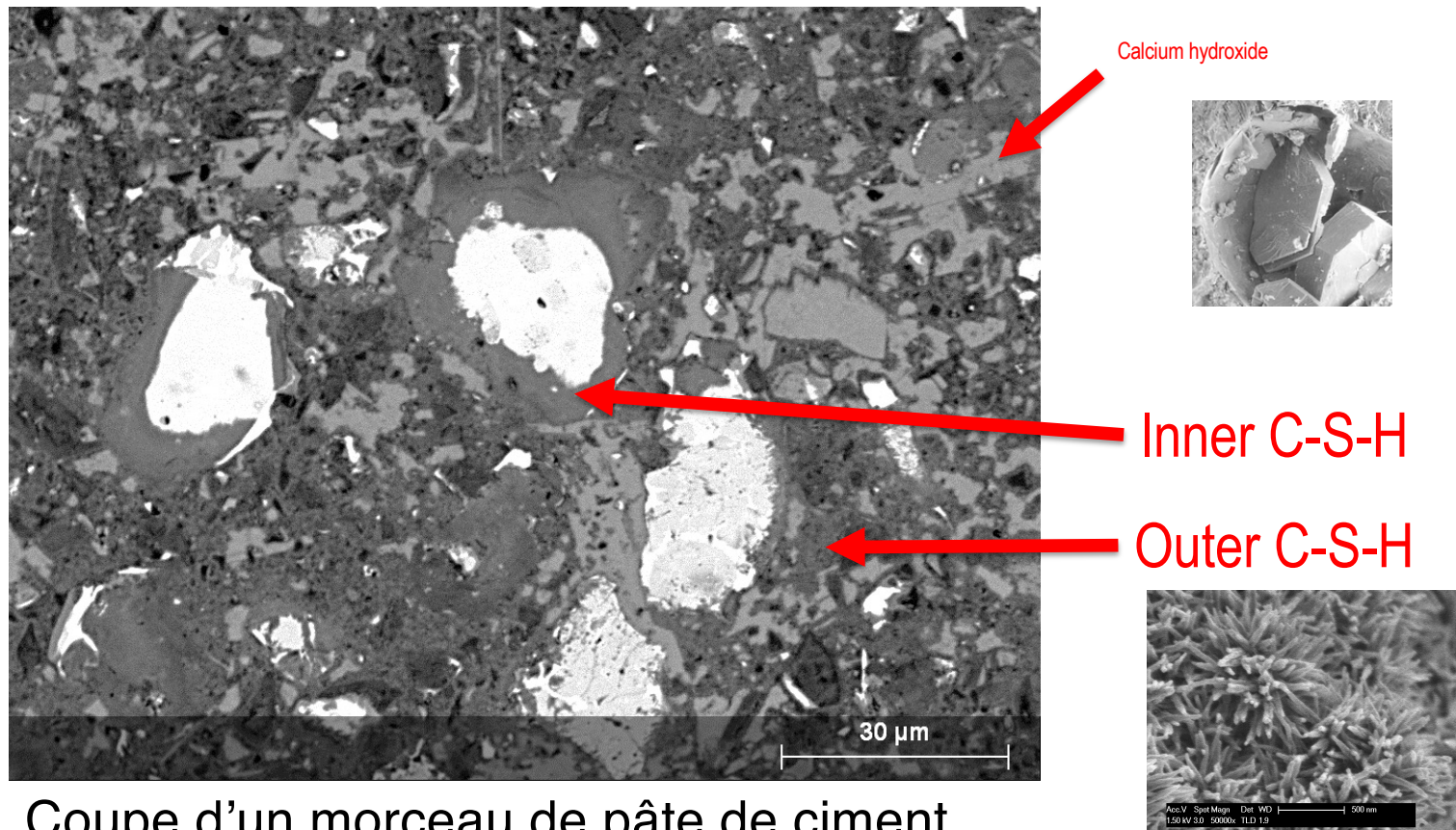
---





### 3.1. C-S-H: 2 types

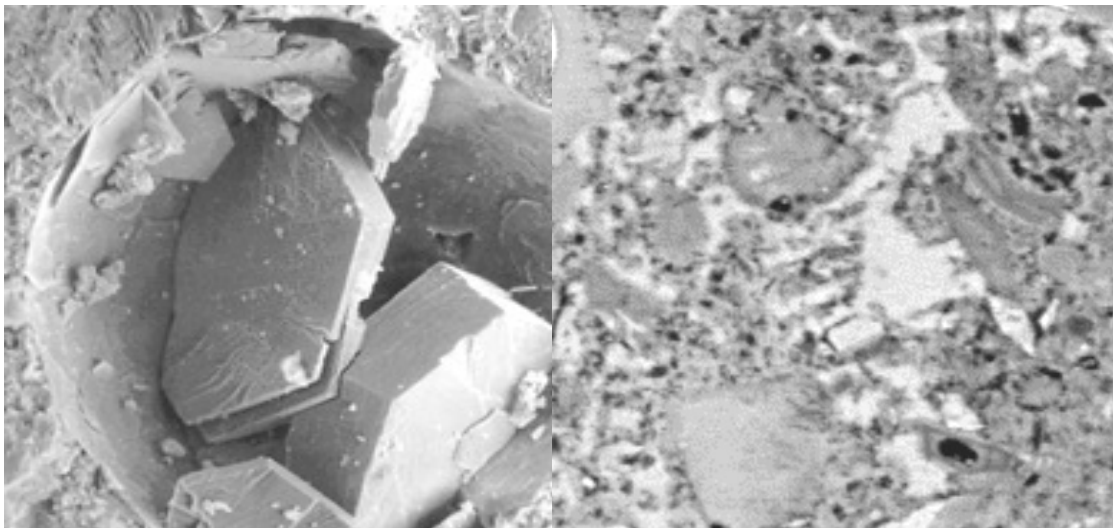
---



Coupe d'un morceau de pâte de ciment hydratée

## 3.2. CH, Portlandite

**C**alcium **H**ydroxyde  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

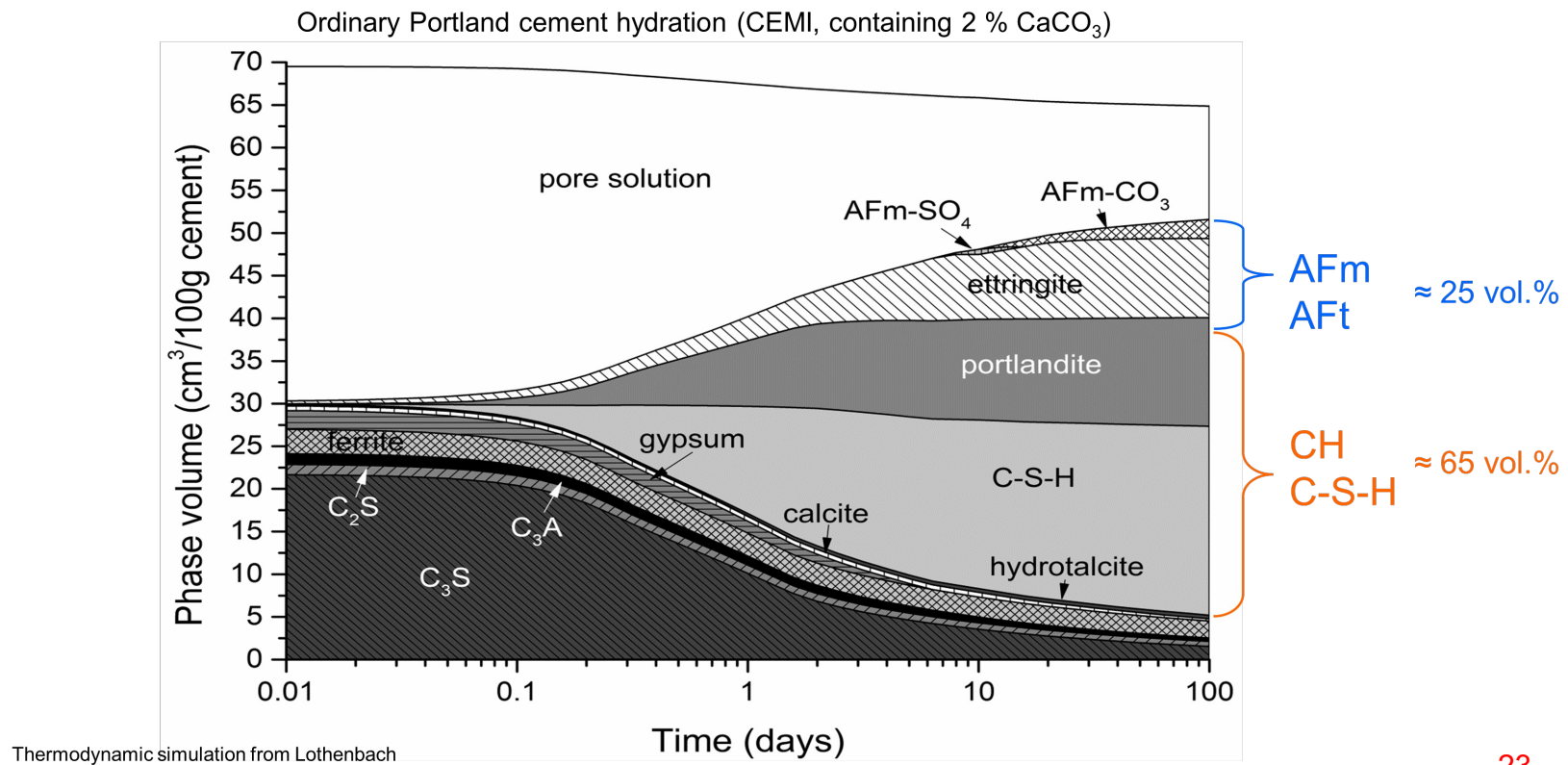


~ 15% pâte  
hydratée

Morphologie hexagonale – s'il y de l'espace  
Hydrate venant de l'hydratation du  $\text{C}_3\text{S}$  et  $\text{C}_2\text{S}$

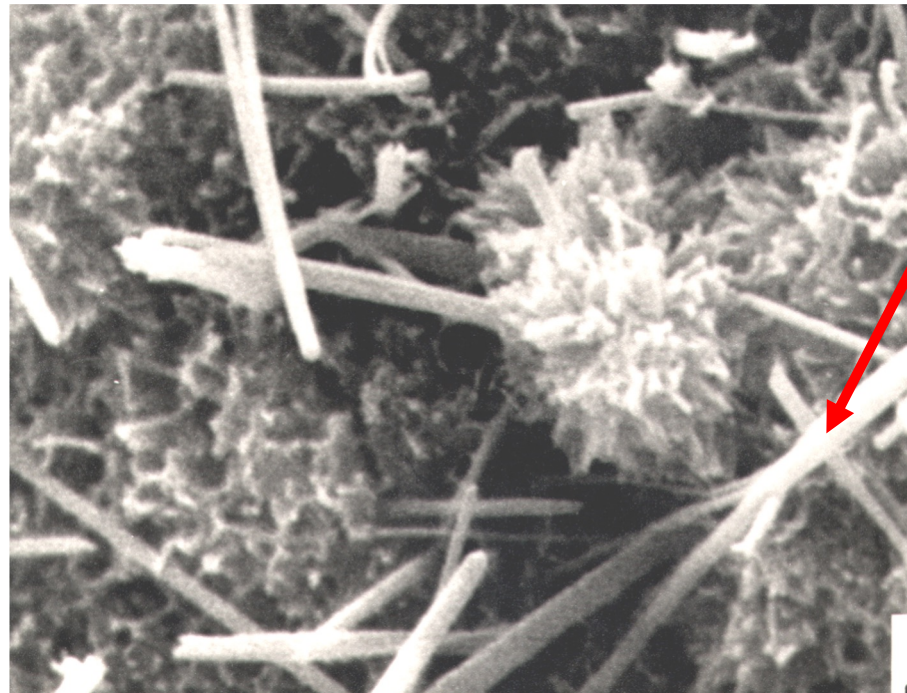
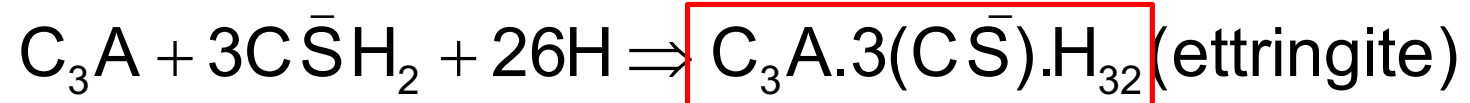


## 3.2 Précipitation des hydrates



### 3.3. AFt, Ettringite

---

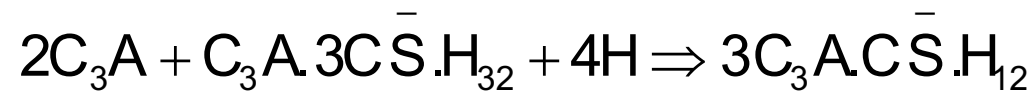


La formation d'ettringite dans le béton frais affecte le temps de prise du béton

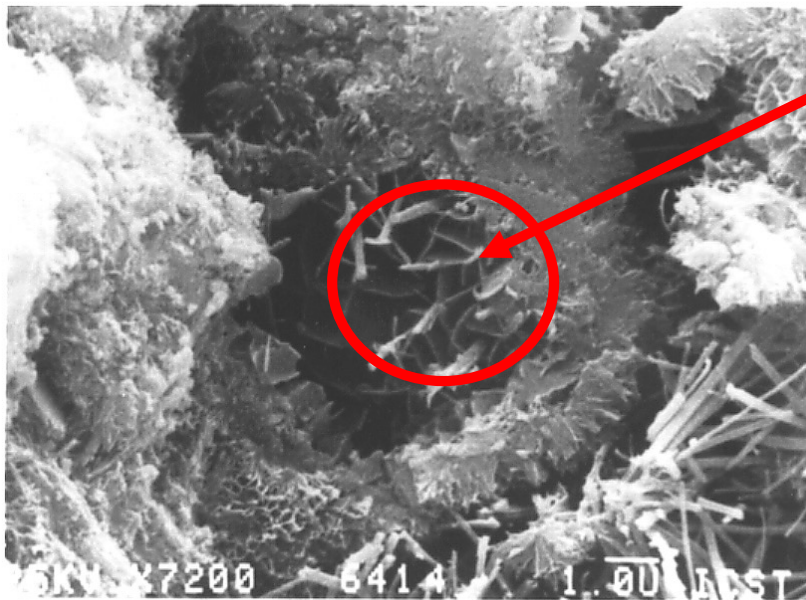


### 3.3. AFm, “Monosulfo”

---

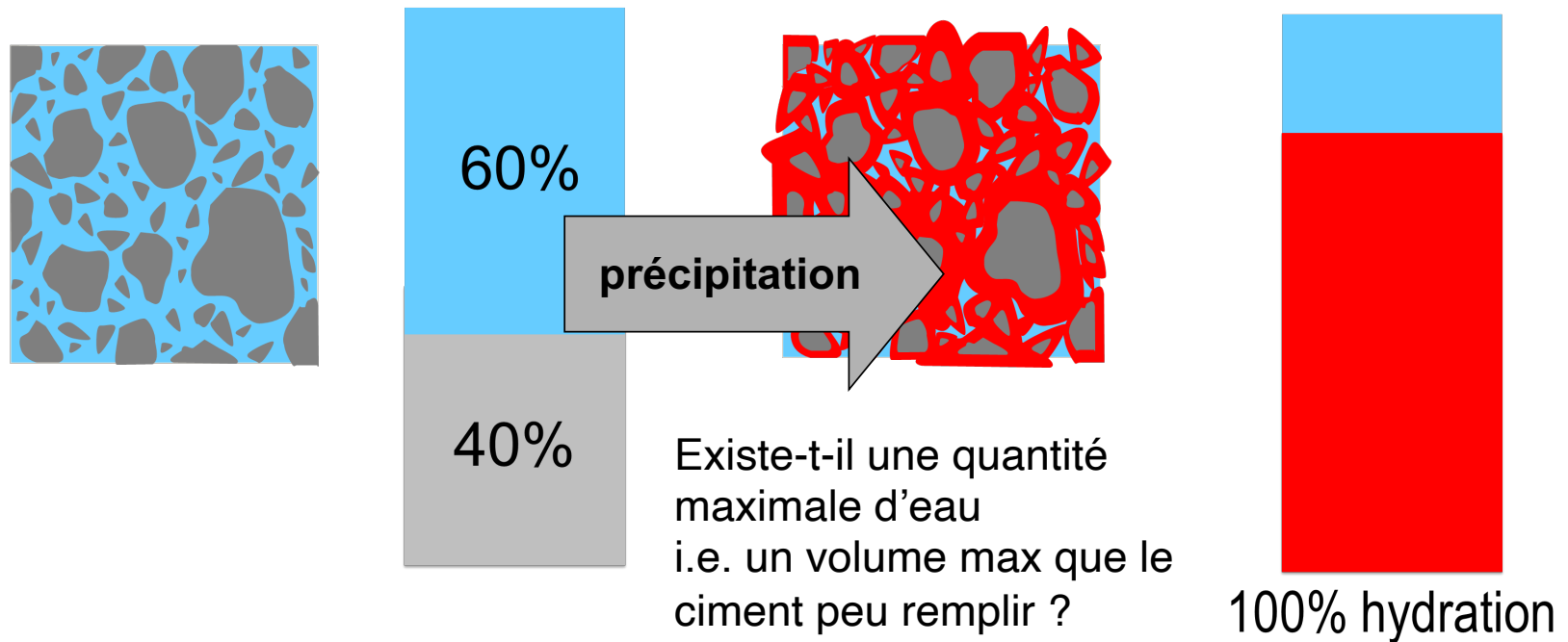


Calcium monosulfo aluminate  
Monosulfo aluminate de calcium  
"AFm"



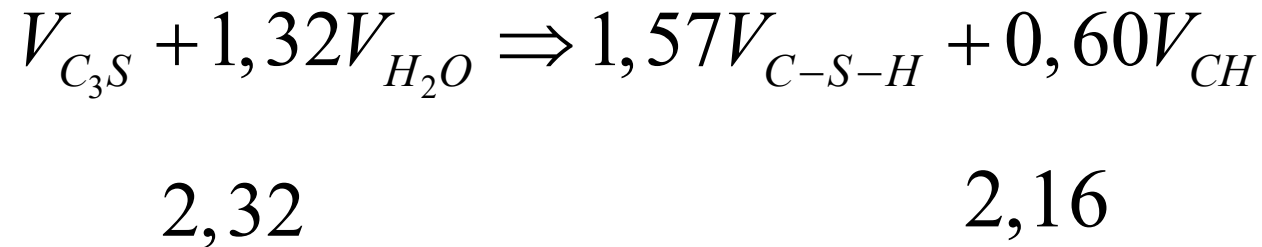
## 4. Changement de volume

---



## 4. Changement de volume

---

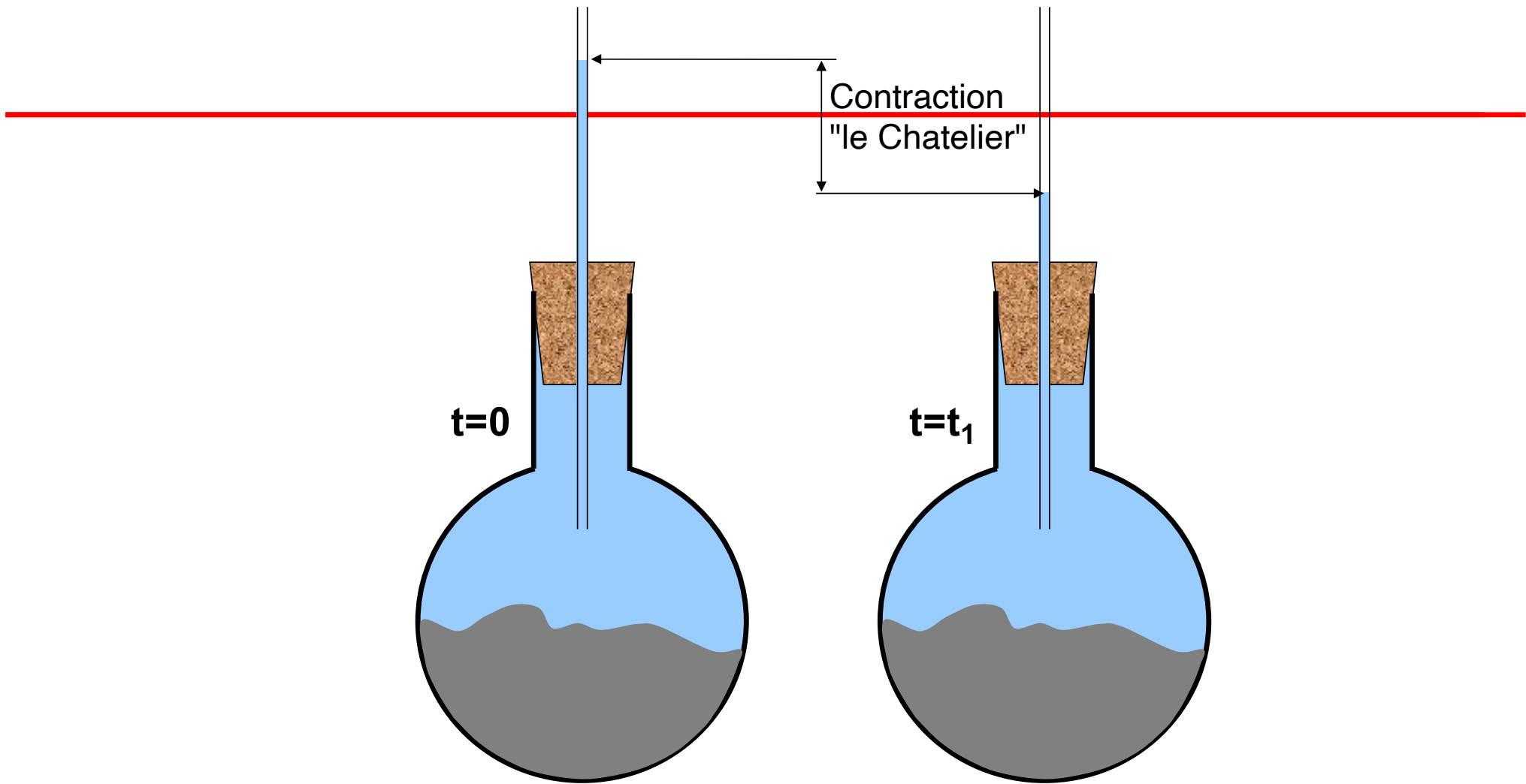


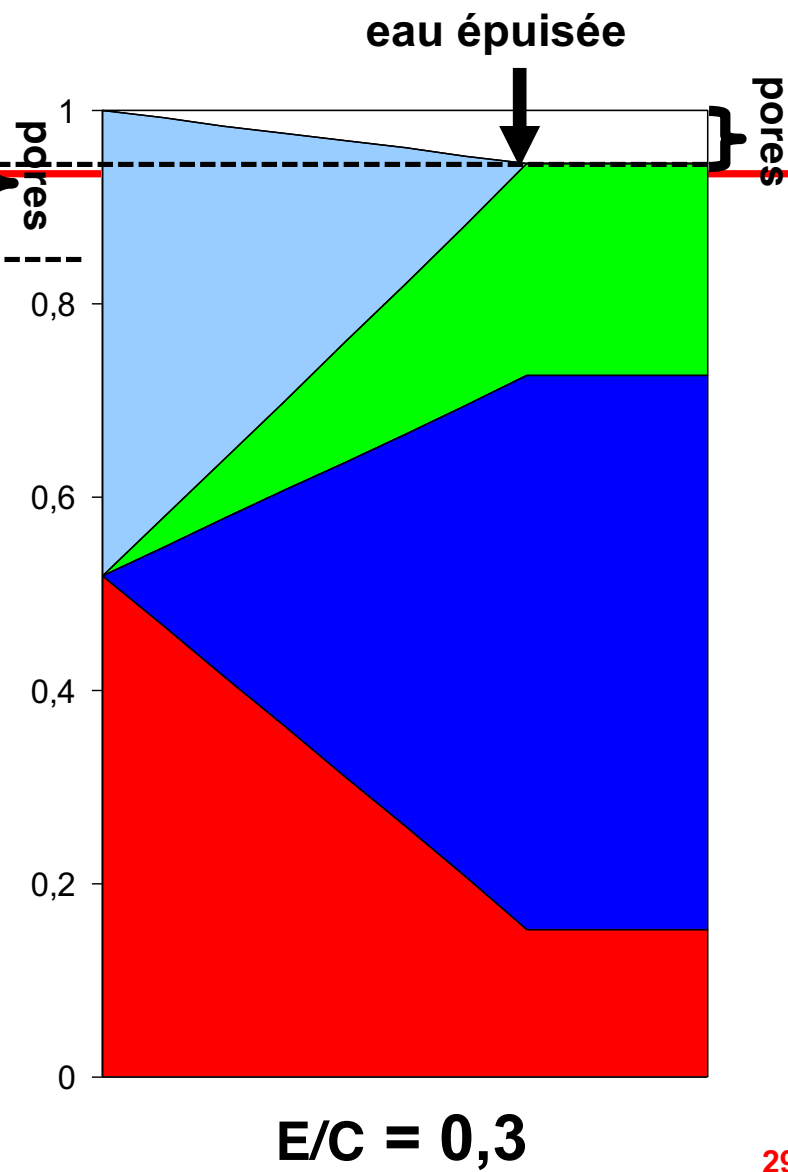
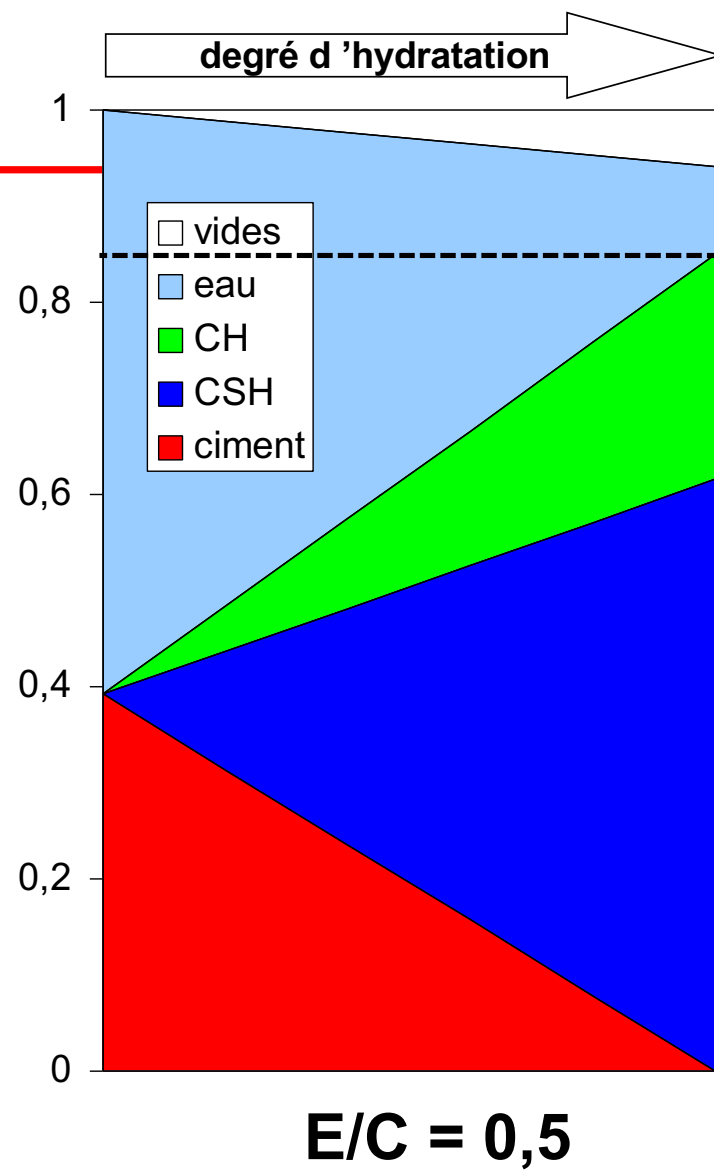
**Le volume du solide augmente, mais le volume total diminue:**

**Contraction Le Chatelier:**

$$\Delta V = \frac{0,16}{2,32} \approx 7\%$$

**Valeurs entre  
5 et 10%  
en fonction des  
hypothèses**





## 4. Changement de volume

---

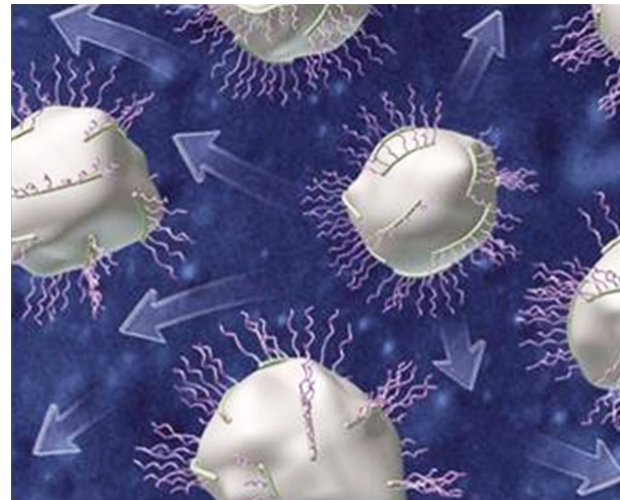
- Moins de pores  
= Plus solide  
= Plus durable
- Eau pour l'hydratation complète à  $e/c$  0.38
- mais maintenant, bétons  $e/c < 0.2$ !
- Peu importe que tout le ciment s'hydrate  
– en fait il est plus solide que les hydrates.
- Toutefois, il faut limiter les pertes d'eau sans quoi l'hydratation sera limitée

## 5. Cinétique de réaction

---

La réaction de prise du ciment est le résultat de multiple réactions se produisant en même temps mais à des vitesses différentes

Mais, la réaction de  $C_3S$  est dominante

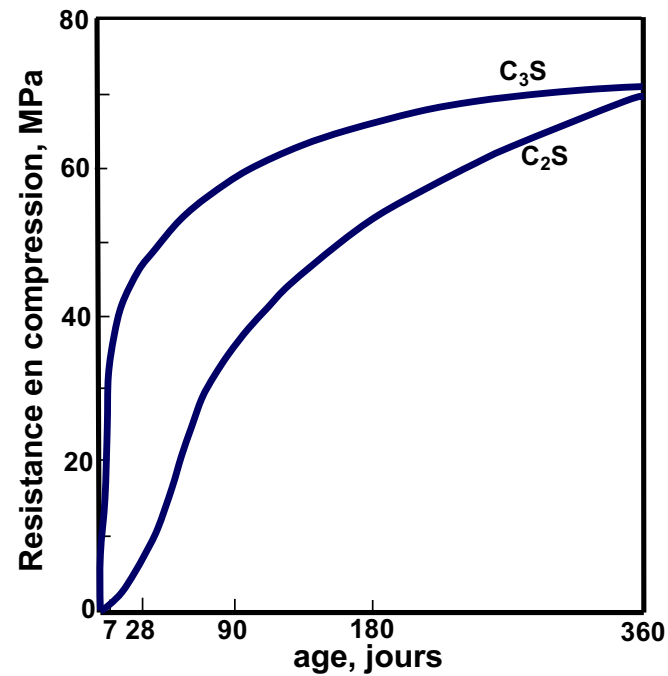


## 5.1. Cinétique de réaction du $C_3S$

---

Contribution à la résistance finale

$C_2S$ : pas de réaction avant ~10 jours

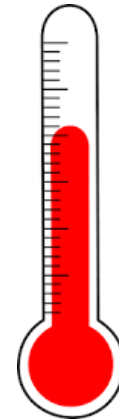




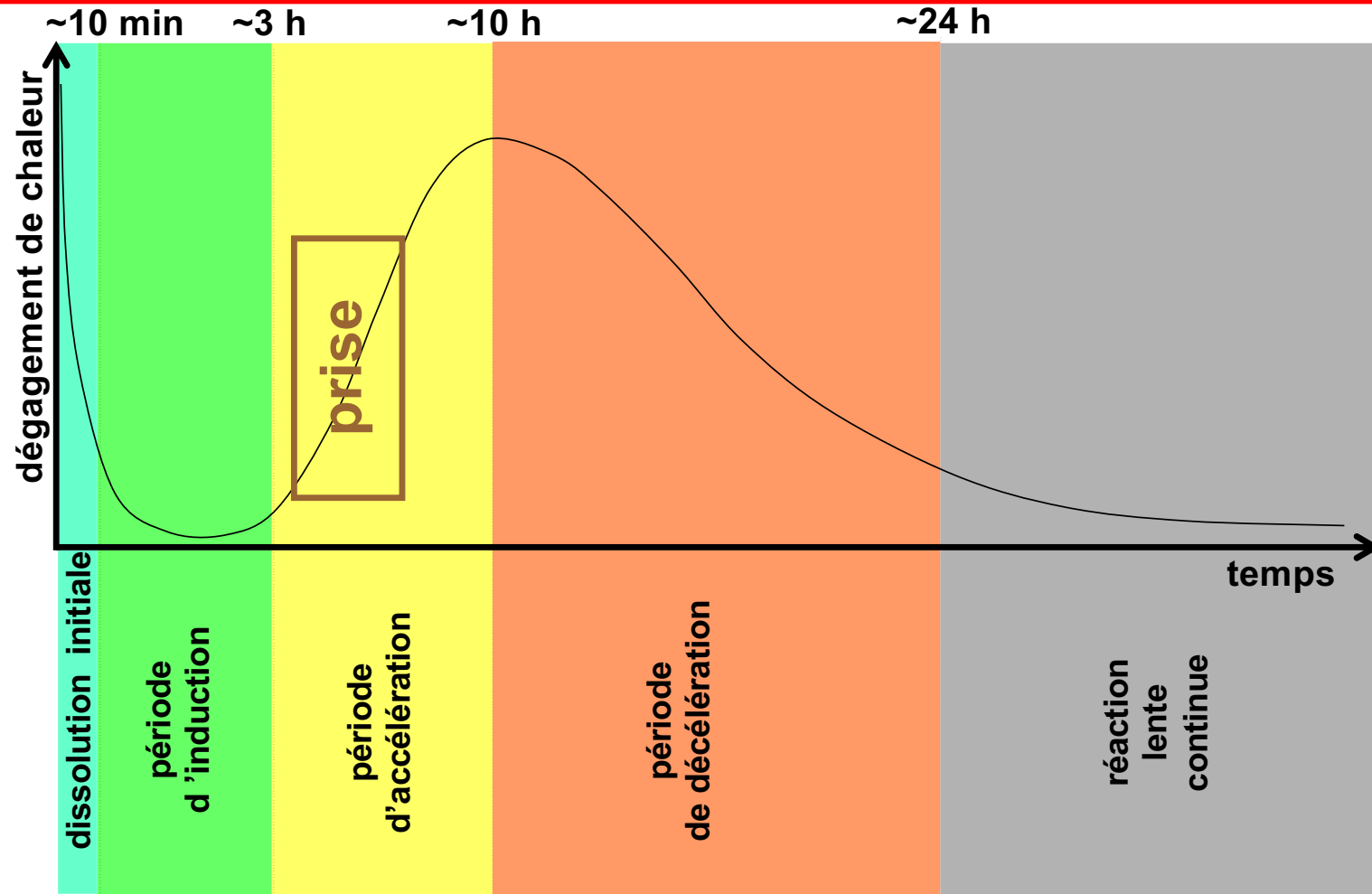
## 5. Cinétique de réaction

---

Ses réactions sont **exothermiques**= elles rejettent de la **chaleur** qui peut être mesurée: chaleur d'hydratation

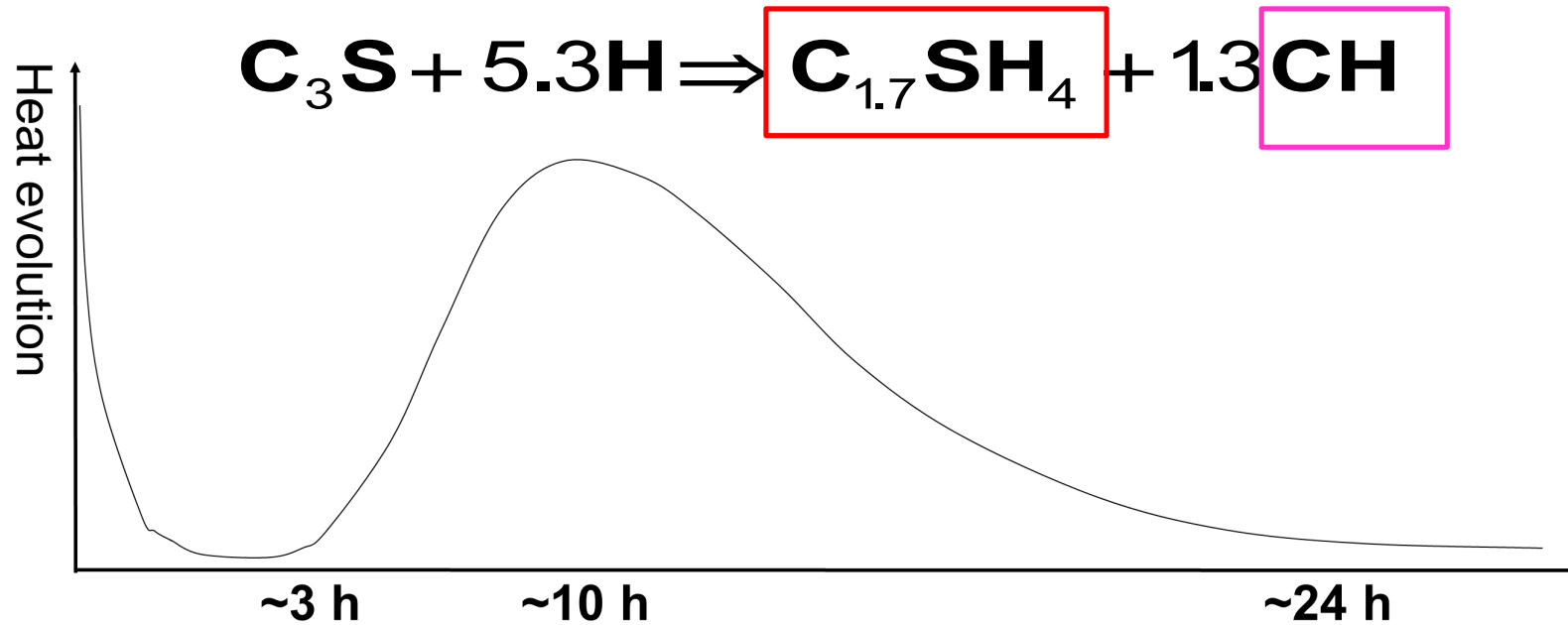


## 5. Cinétique globale de réaction

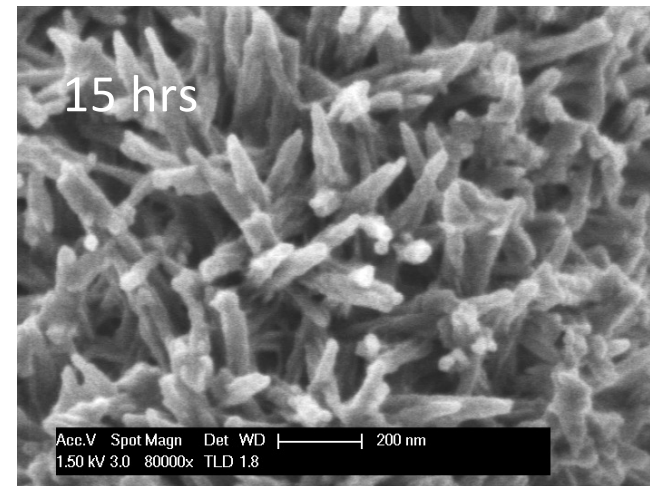
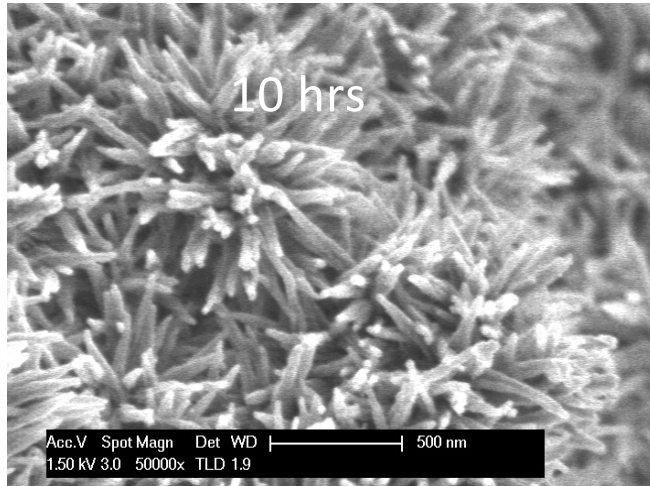
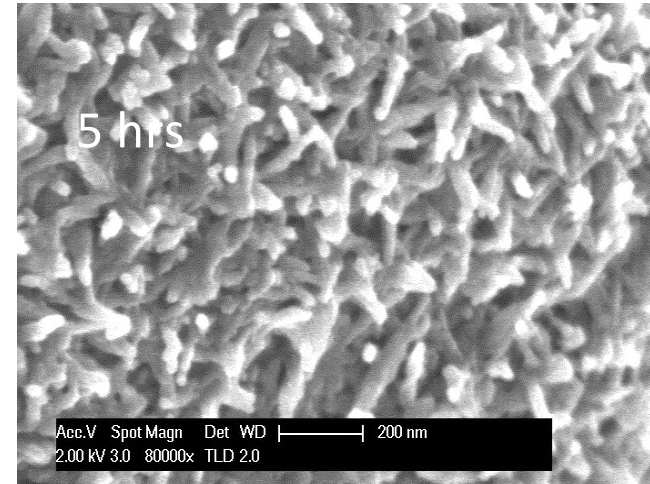
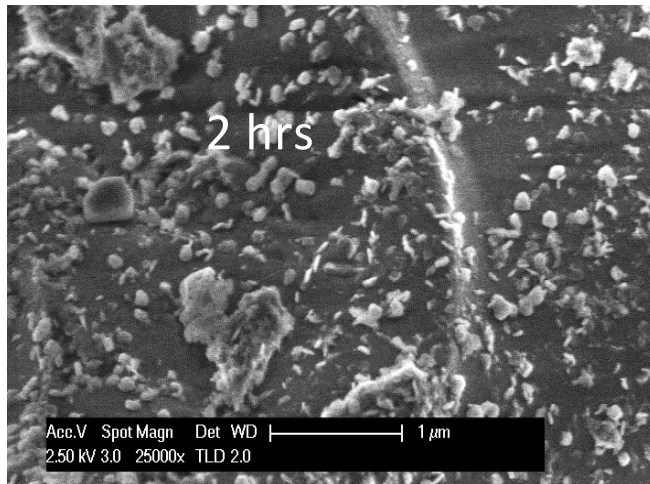


## 5.1. Cinétique de réaction du $C_3S$

---



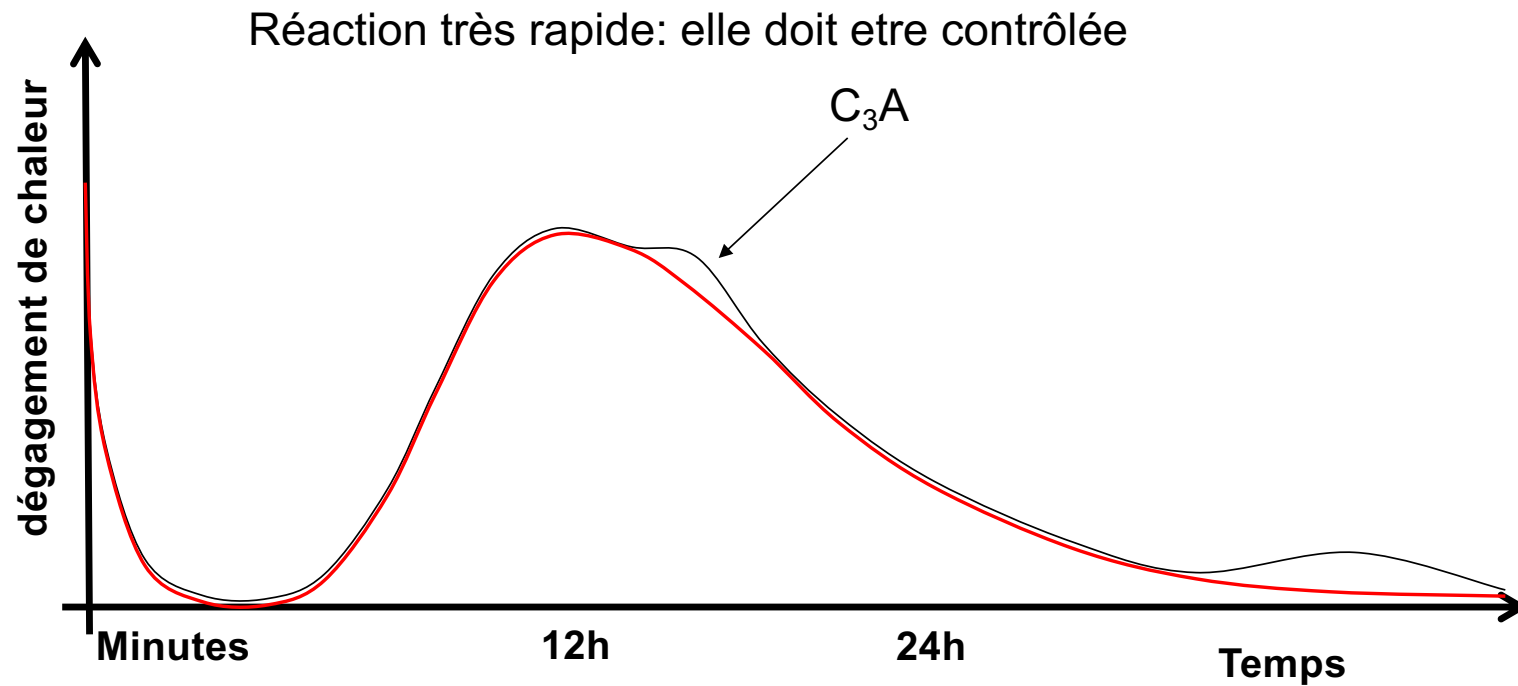
## 5.1. Cinétique de réaction du $C_3S$



Berodier 2015

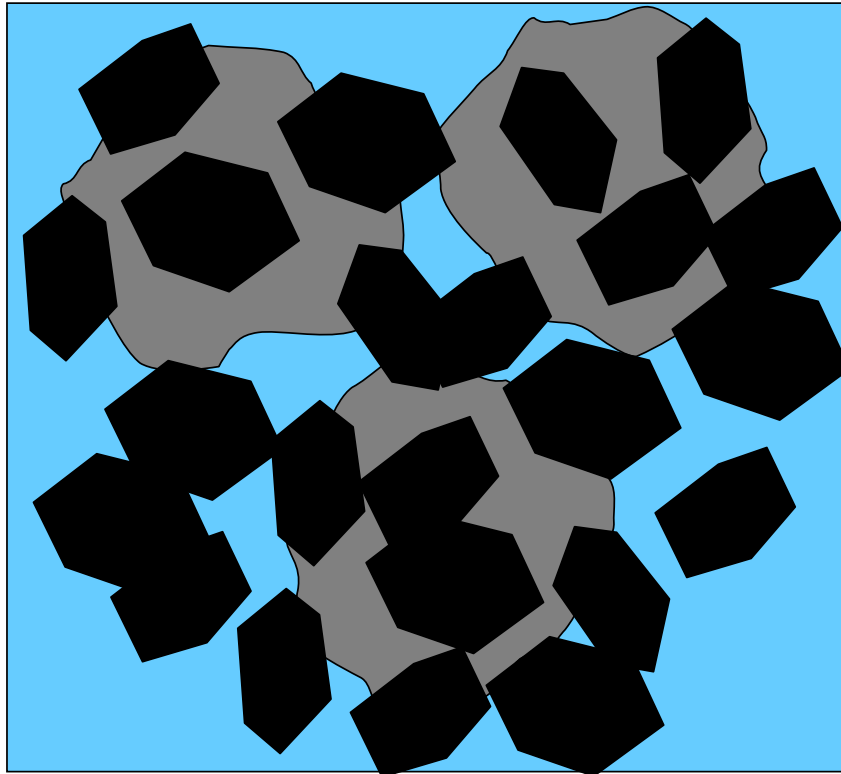
## 5.2. Cinétique de réaction du $C_3A$

---



## 5.2. Cinétique de réaction du $C_3A$

---



$C_3A$

+

eau



réaction rapide  
grandes plaques  
d'hydrates



rigidification  
« prise flash »  
« flash set »

## 5.2. Cinétique de réaction du $C_3A$

---

### Prise flash:

Le béton prend instantanément  
Mise en place impossible  
Résistance réduite



## 5.2. Cinétique de réaction du $C_3A$

---

Solution au problème: ajout préalable de

**GYPSE**



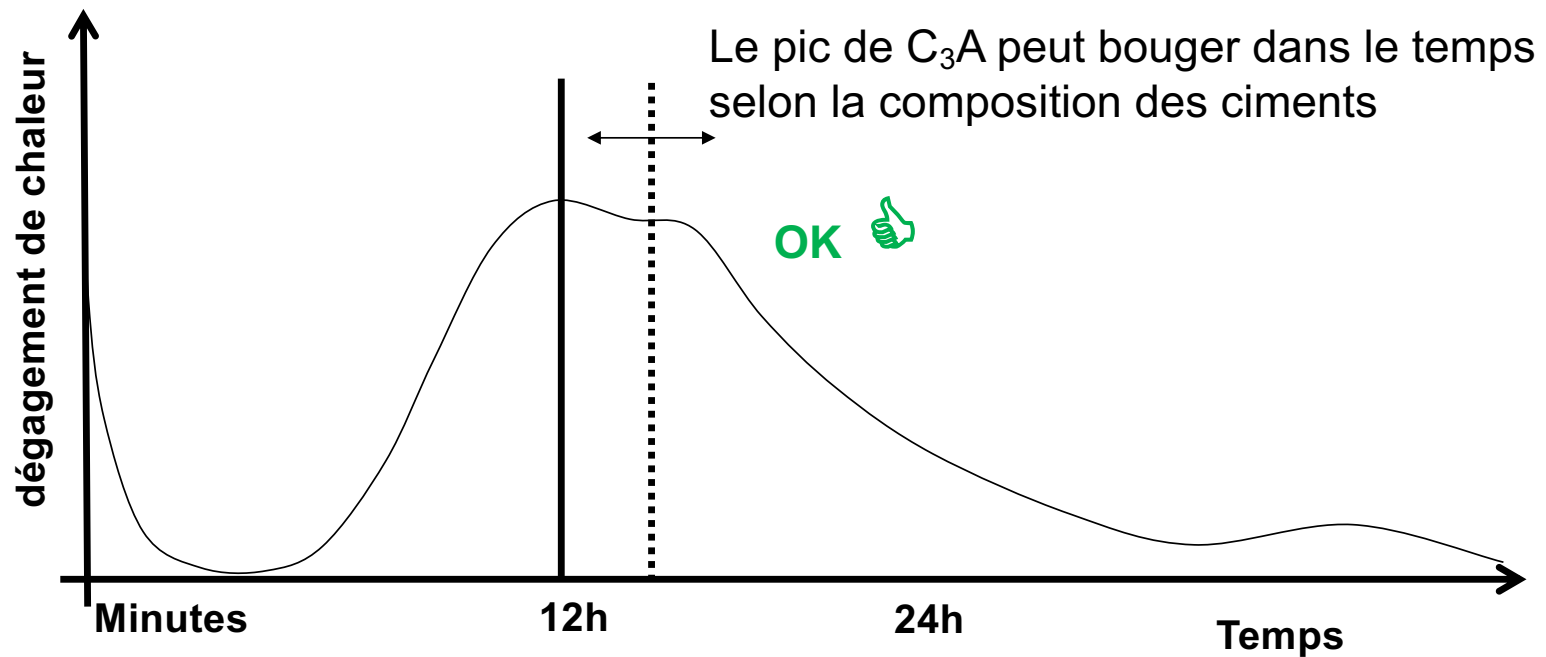


## 5.2. Cinétique de réaction du $C_3A$

---

Comment prévenir le risque de **prise flash**?

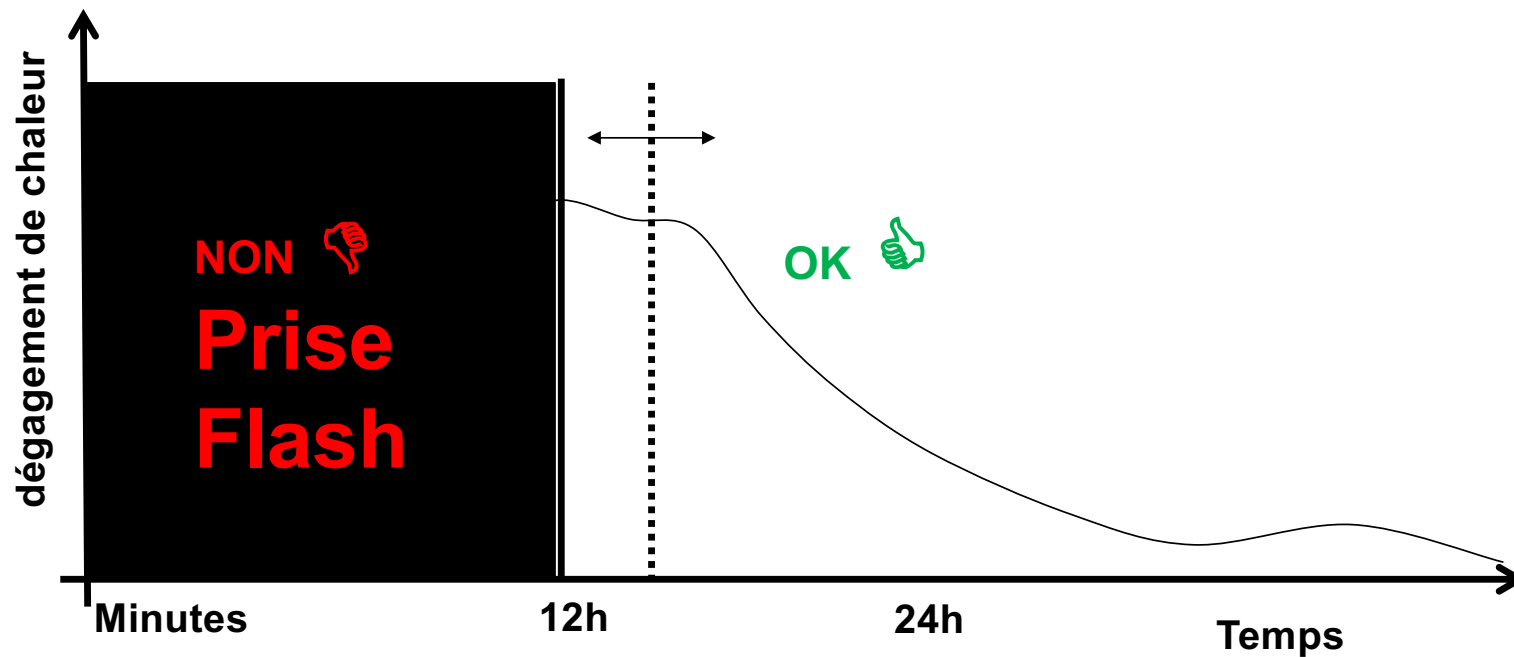
Solution #1: Verifier la cinétique de réaction



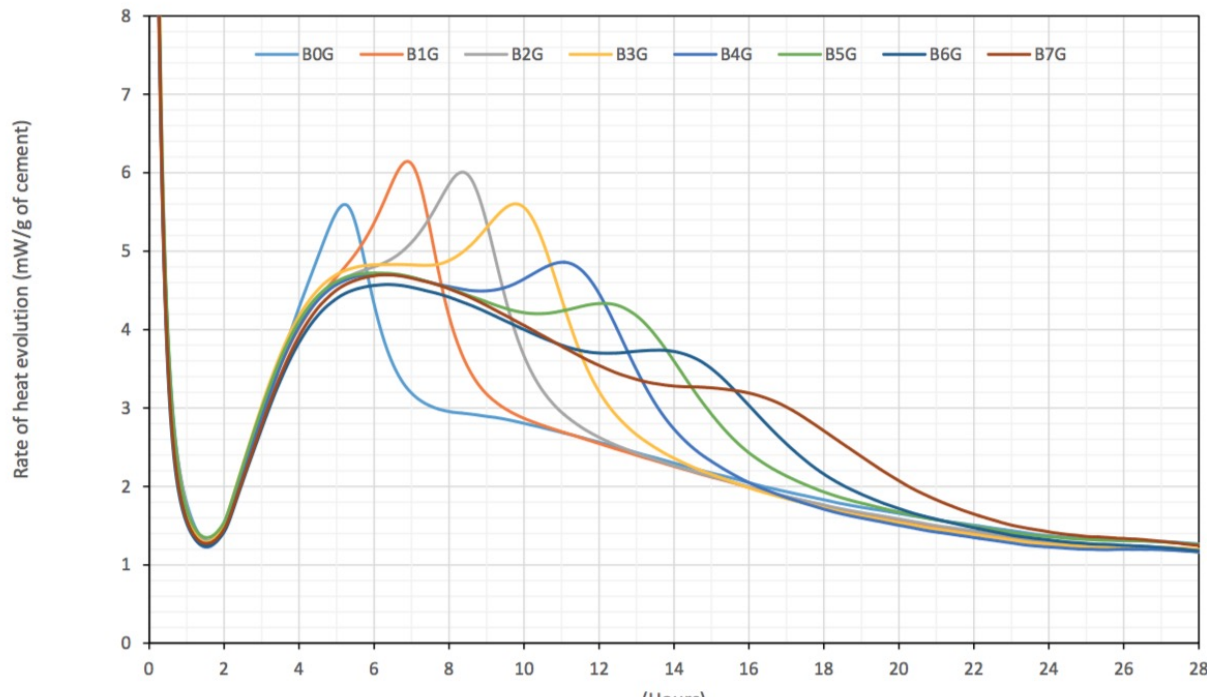
## 5.2. Cinétique de réaction du $C_3A$

Comment prévenir le risque de **prise flash**?

Solution #1: Verifier la cinétique de réaction



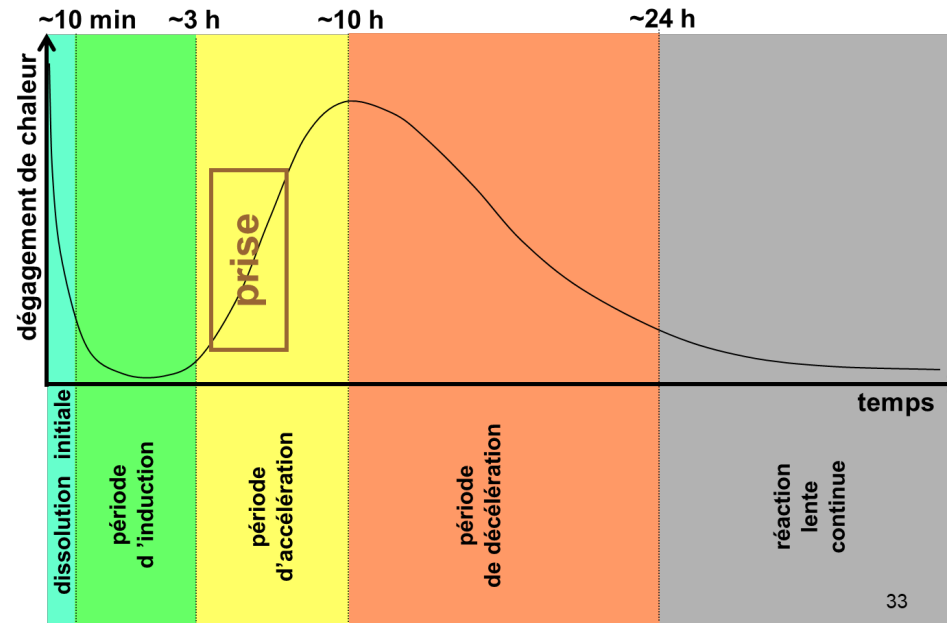
## 5.2. Cinétique de réaction du $C_3A$



Le pic de  $C_3A$  bouge dans le temps avec l'ajout de gypse.  
Plus de gypse, pic plus tard  
L'optimization de niveau de gypse est fait en usine

## 6. Facteurs qui affectent la cinétique

De **multiple facteurs** peuvent influencer la **cinétique**, c'est à dire ralentir ou accélérer la réaction du ciment.  
Il peut aussi avoir un effet sur le développement des performances du béton



Ralentir: permet de prolonger l'état liquide. Le béton peut être transporté sur de plus longue distance par exemple

Accélérer: permet un durcissement rapide. Le coffrage peut être enlevé plus rapidement par exemple.

## 6. Facteurs qui affectent la cinétique

---

6.1. Caractéristiques du ciment

6.2. Température

6.3. Vitesse de mélange

6.4. Additions: Supplementary cementitious materials

6.5. Additifs (retardateurs/accélérateurs)

Les changements de cinétique correspondent à des changements de vitesse de réaction de la dissolution des phases cimentaires ou de précipitation des hydrates

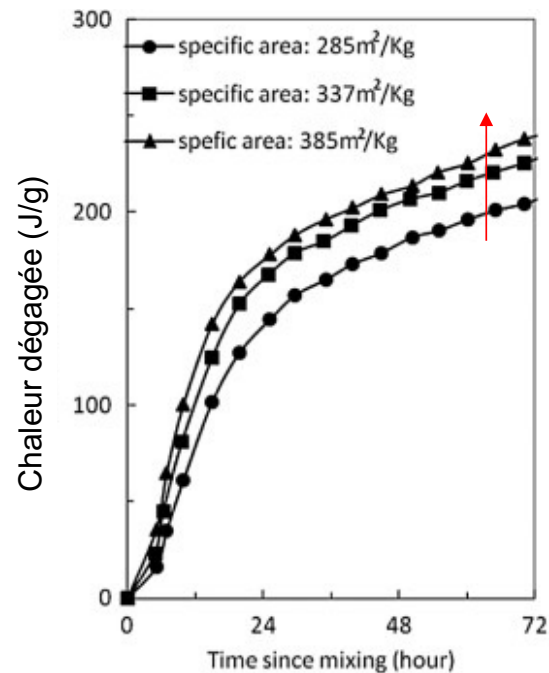
## 6. Facteurs qui affectent la cinétique

---

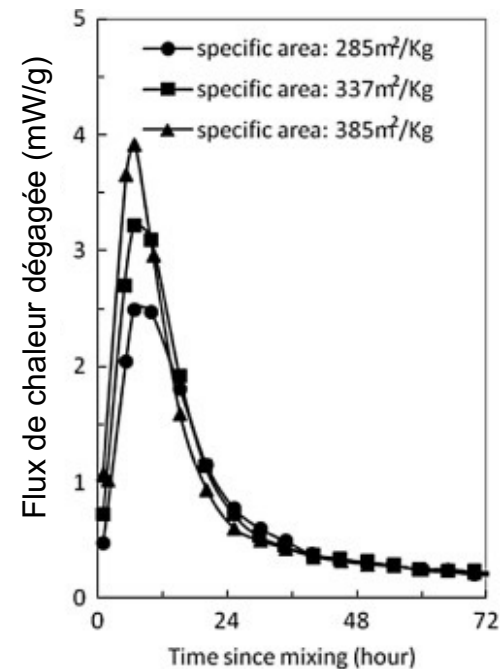
- Effet Positif ?
- Effet Négatif ?
- Ciment plus fin
- Ciment avec plus de  $C_3S$
- Température -5C
- Long et lent malaxage
- Ajouts de pouzzolanes
- Ajout d'un adjuvant

## 6.1. Caractéristiques du ciment

La finesse des particules de ciment accélère la chaleur d'hydratation et la prise du béton

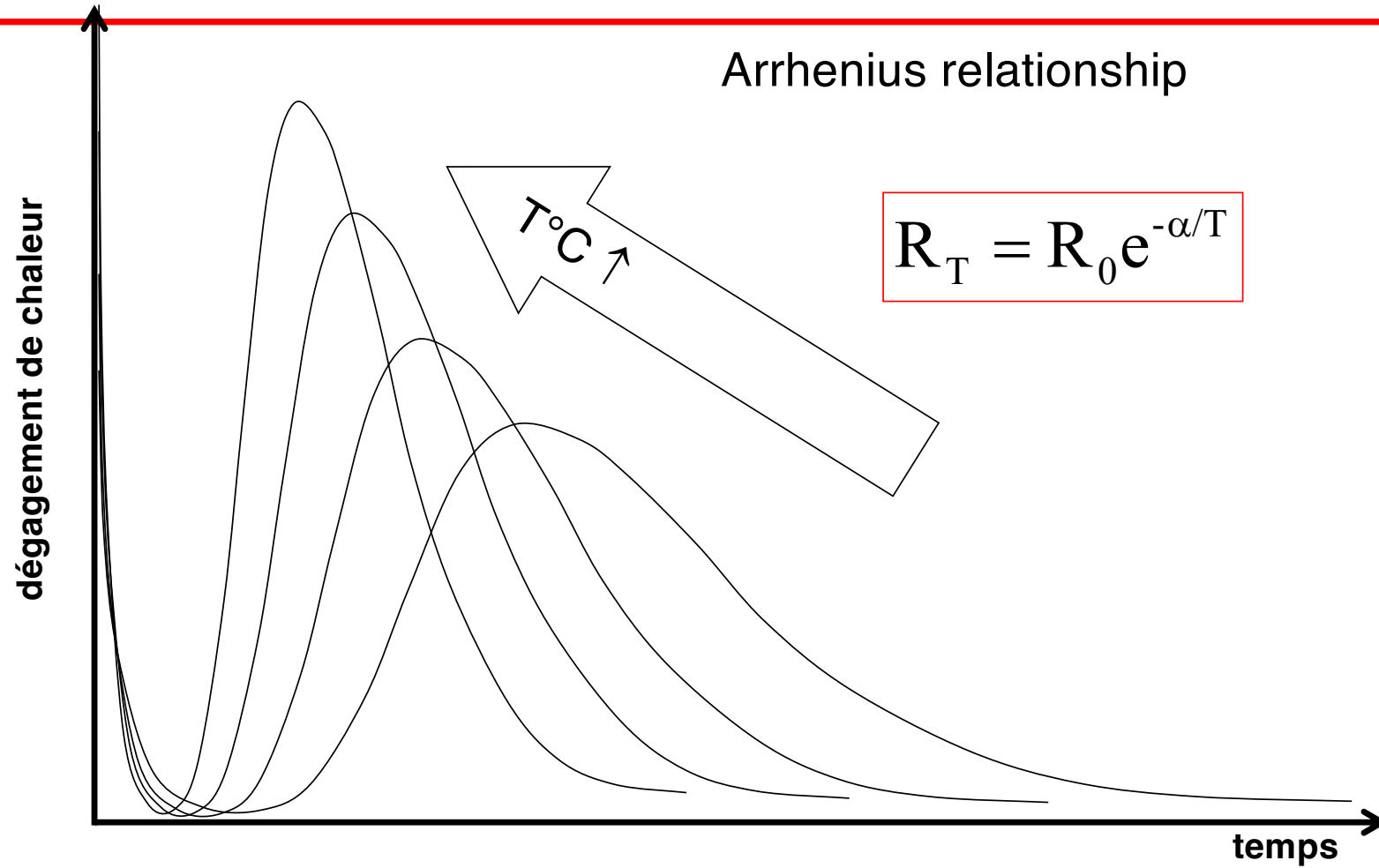


(a) Relation between fineness and heat of cement hydration



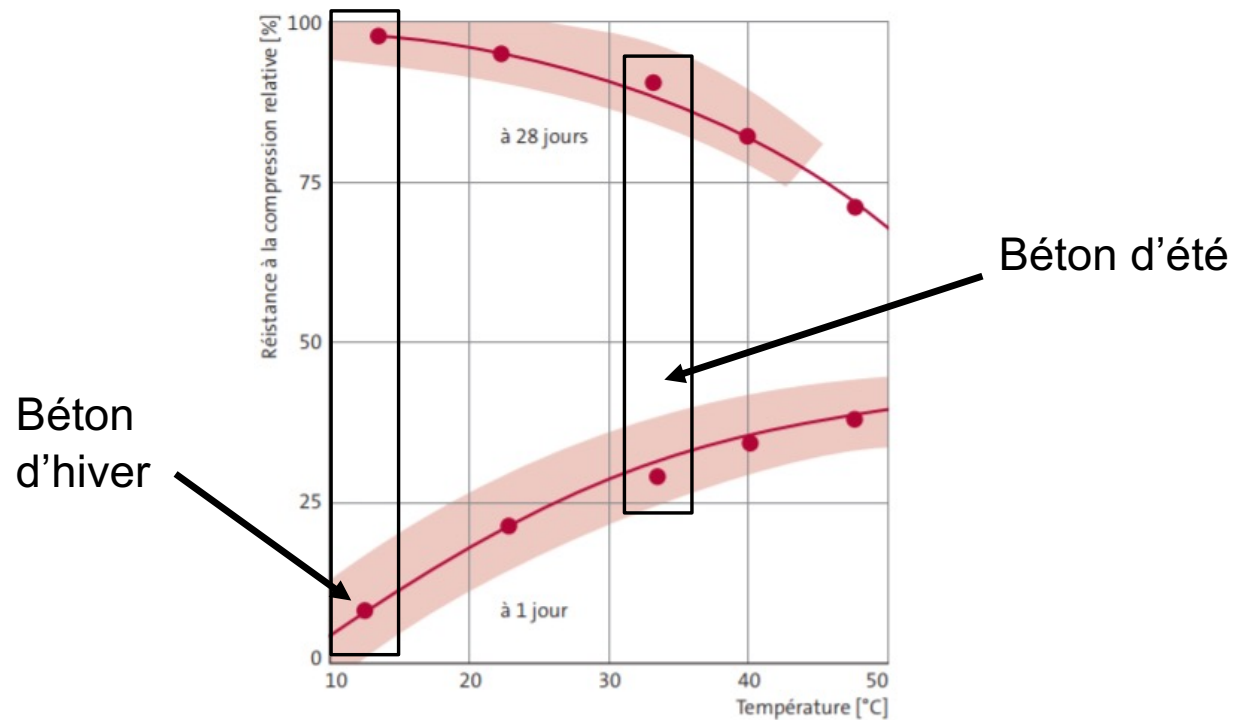
(b) Relation between fineness and rate of cement hydration

## 6.2. Température





## 6.2. Température

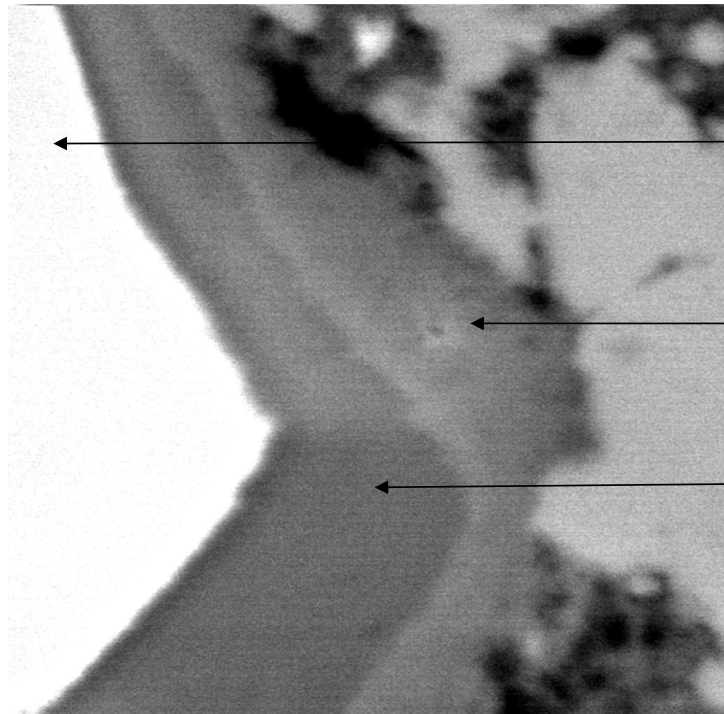


La température augmente la résistance à la compression à jeune âge mais limite le développement à long terme

## 6.2. Température

---

$T < 100^{\circ}\text{C}$      $T \uparrow$ , C-S-H plus dense



Ciment non hydraté

Hydratation 90°C

Hydratation 20°C

$T > \sim 70^{\circ}\text{C}$ , modification majeur de la réaction des aluminates

## 7. L'essentiel

---

- Dissolution puis précipitation
- Hydrates pour les silicates ( $C_3S$  et  $C_2S$ ): C-S-H se situe autour des grains et le CH entre les grains
- Ajout du gypse pour contrôler la réaction du  $C_3A$  – il favorise la formation de l'ettringite
- Ettringite et AFM (ou monosulfate) sont les produits issus de la réaction du  $C_3A$  et qui va jouer un rôle important dans résistance aux eaux sulfatées

## 7. L'essentiel

---

- Quelle phase anhydre contribue le plus au développement de la résistance du béton de ciment de Portland?
- Quels sont les hydrates principaux d'hydratation de cette phase?
- Le gypse est ajouté pendant le broyage du clinker pour contrôler l'hydratation de quelle phase?
- Quels sont les produits d'hydratation les plus importants résultant de l'hydratation de la phase  $C_3A$ ?
- Pendant l'hydratation, le volume global augmente-t-il ou diminue-t-il?

## 8. Pour aller plus loin

---

- **Hydratation:** Comparaison de prise des liants minéraux sous l'eau

<https://www.youtube.com/watch?v= 8tcKxqtjpg>

- **3 min vidéo - Macro à microstructure du béton**

[https://www.lemonde.fr/sciences/video/2016/08/10/au-microscope-plongee-au-c-ur-du-beton\\_4980898\\_1650684.html](https://www.lemonde.fr/sciences/video/2016/08/10/au-microscope-plongee-au-c-ur-du-beton_4980898_1650684.html)

- **Minute cement:**

<https://www.youtube.com/watch?v=Ast3dpdLBR8>

## 7. L'essentiel

