

# Résumé / questions

- Pourquoi utilise-t-on des mélanges continus des granulats?
- Comment calcule-t-on les proportions de sable, de fins et gros granulats pour avoir un mélange compact?
- Quelle est l'importance du rapport eau / ciment?
- Quel processus amène le durcissement du béton?
- Qu'est-ce que la prise? Comment la mesurer?
- Si le rapport E/C diminue, comment faut-il changer le dosage en ciment?
- Quels paramètres de formulation influencent le «slump» du béton?
- Quel est le moyen le plus utilisé pour compacter le béton?

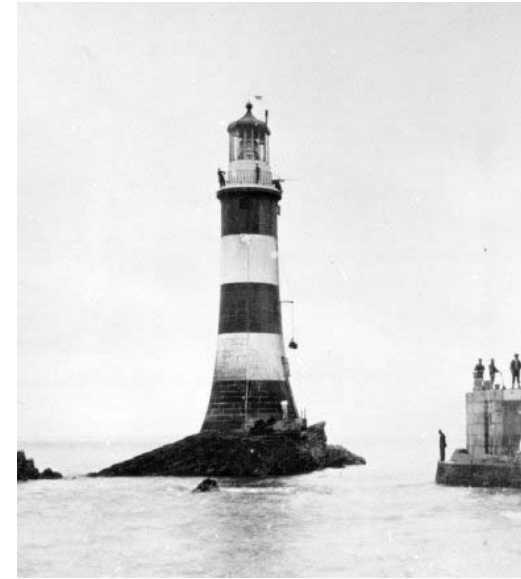
# Fabrication du ciment

# Note historique, 1

**La chaux**, connue depuis l'antiquité:



Elle ne durcit pas sous l'eau



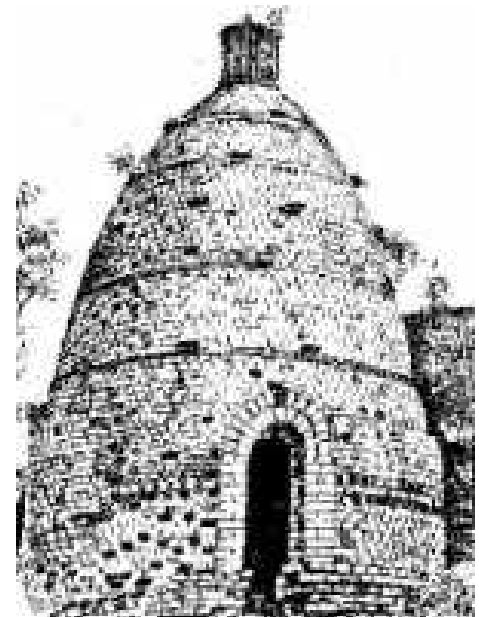
**1756 -1828**, découverte et compréhension que les calcaires qui contiennent de l'argile donnent de meilleurs ciments (plus résistants à l'eau)

**1824**, Joseph Aspdin en Angleterre, fabrique et brevete le ciment Portland, car sa couleur, après prise, ressemble à la pierre de Portland.

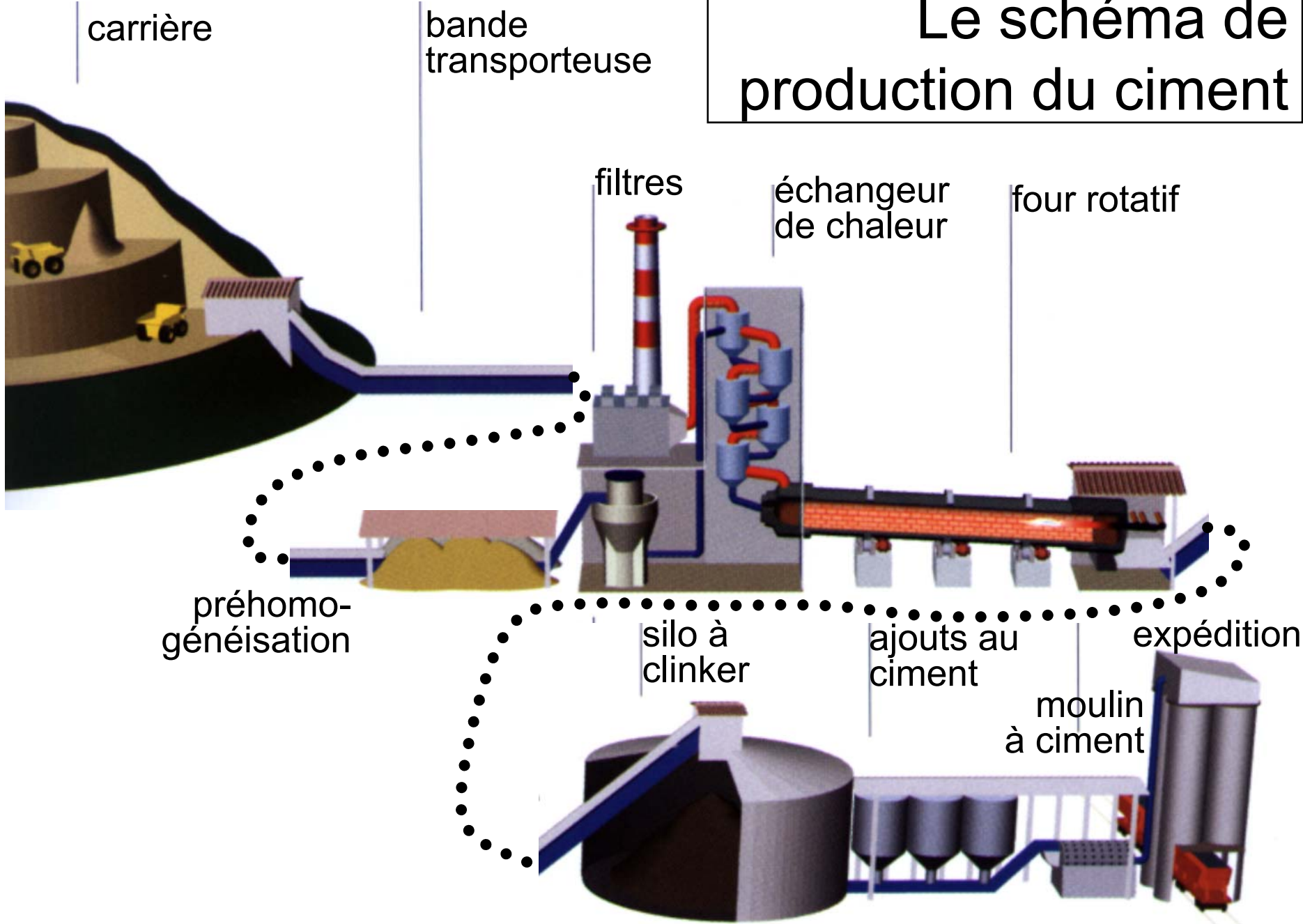


**1835**, l'augmentation de la température de cuisson donne naissance au véritable ciment Portland.

**1838**, William Aspdin (fils de Joseph) convainc Brunel de l'utiliser pour réparer son tunnel sous la Tamise –1ère utilisation du ciment Portland en génie civil.



# Le schéma de production du ciment



# La fabrication du ciment – le processus

1- Extraction

2- Transport MP

7- Stockage

8- Expéditions

4- Four

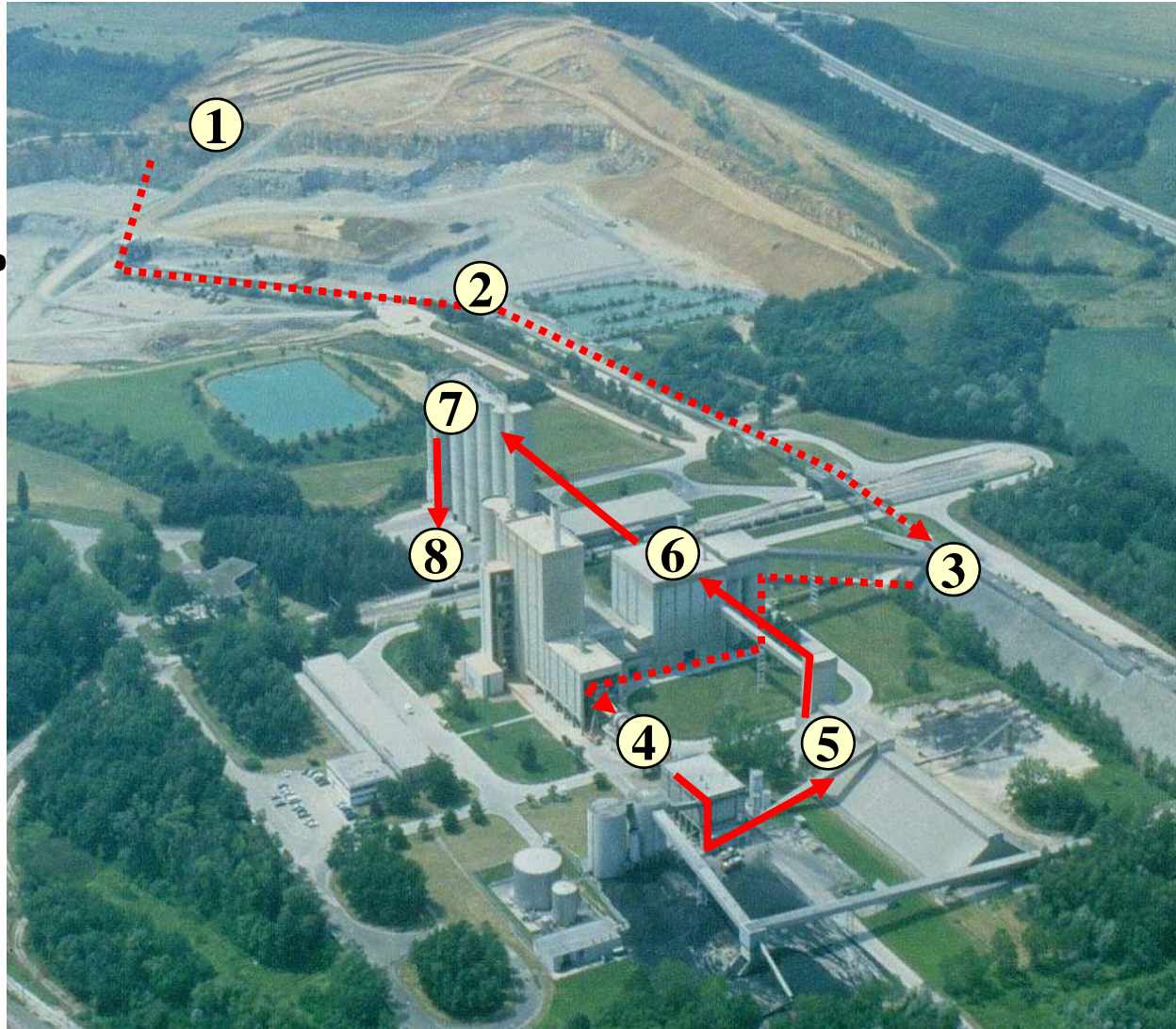
.....> cru

————> cuit

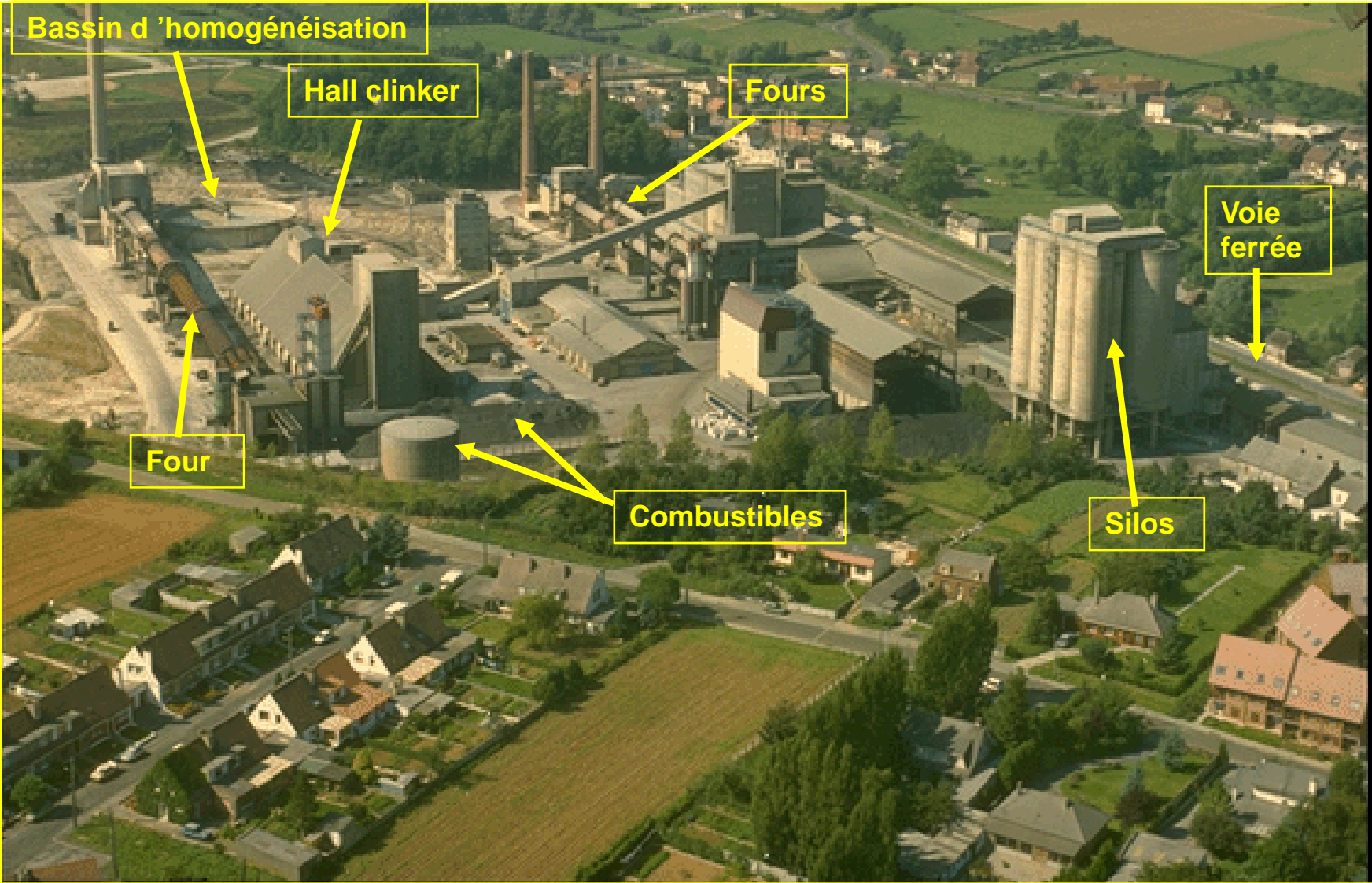
6- Broyage

3-Préhomogénéisation

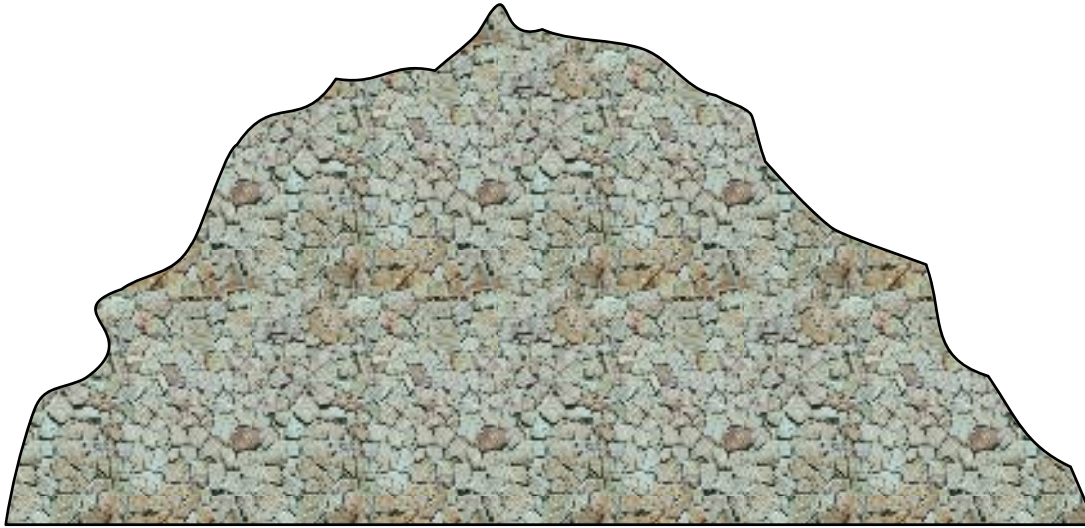
5- Hall clinker



# La fabrication du ciment – le processus



# Cru



## Calcaire

~80% roches calcaires

Jusqu'à 95%  $\text{CaCO}_3$

~55% **CaO**

impuretés majeures  $\text{MgO}$

bonne source de calcaire  
détermine emplacements  
des usines de ciment

## Argile

20% source de  **$\text{SiO}_2$**  qui amène  
aussi  **$\text{Al}_2\text{O}_3$**  et  **$\text{Fe}_2\text{O}_3$** , etc.

dans certains cas, il faut  
mélanger les sources pour  
obtenir la chimie correcte



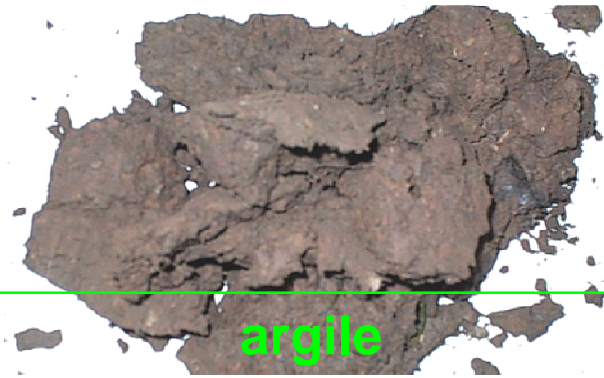


# Composition du cru (exemple)



**Calcaire**

**79%  $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$**



**argile**

**±17% + éventuellement de la bauxite**



**Ajouts**

**±3% sable + 0,7% oxyde de Fe**



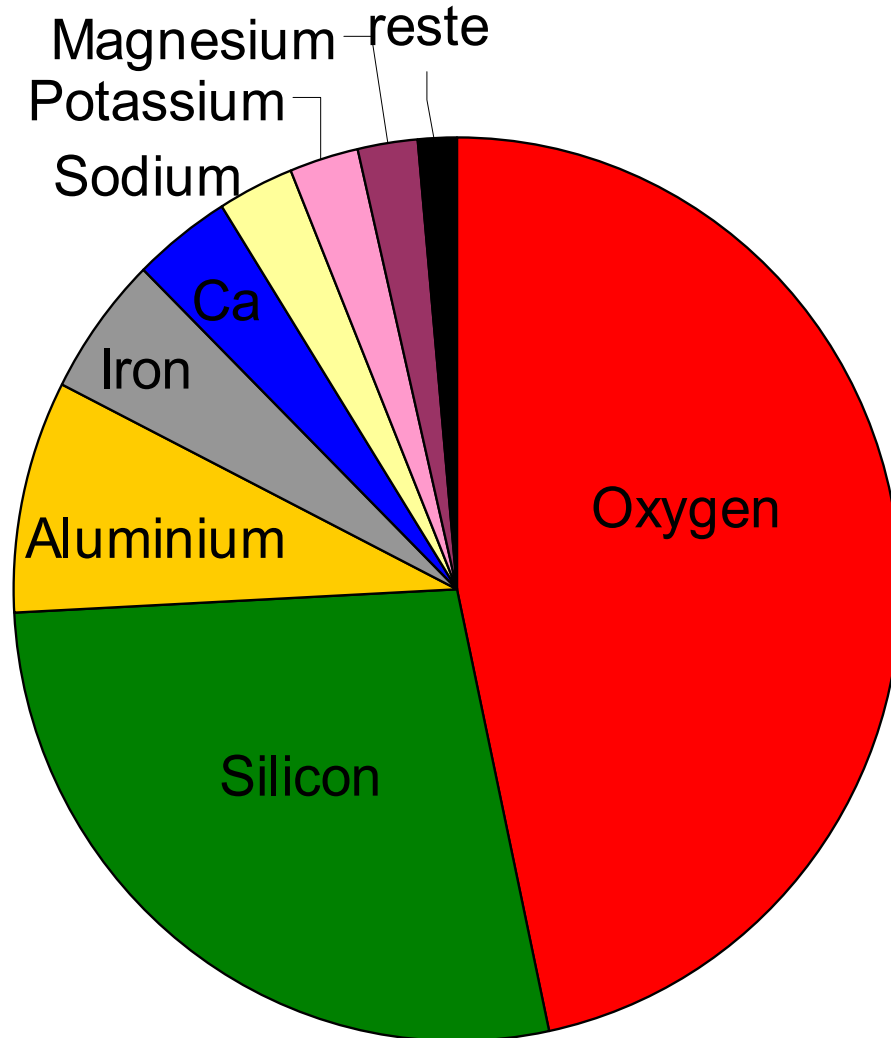
**CRU**

**chimie**

**$\text{SiO}_2$  13,5% ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  3,1% ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  2,0%**

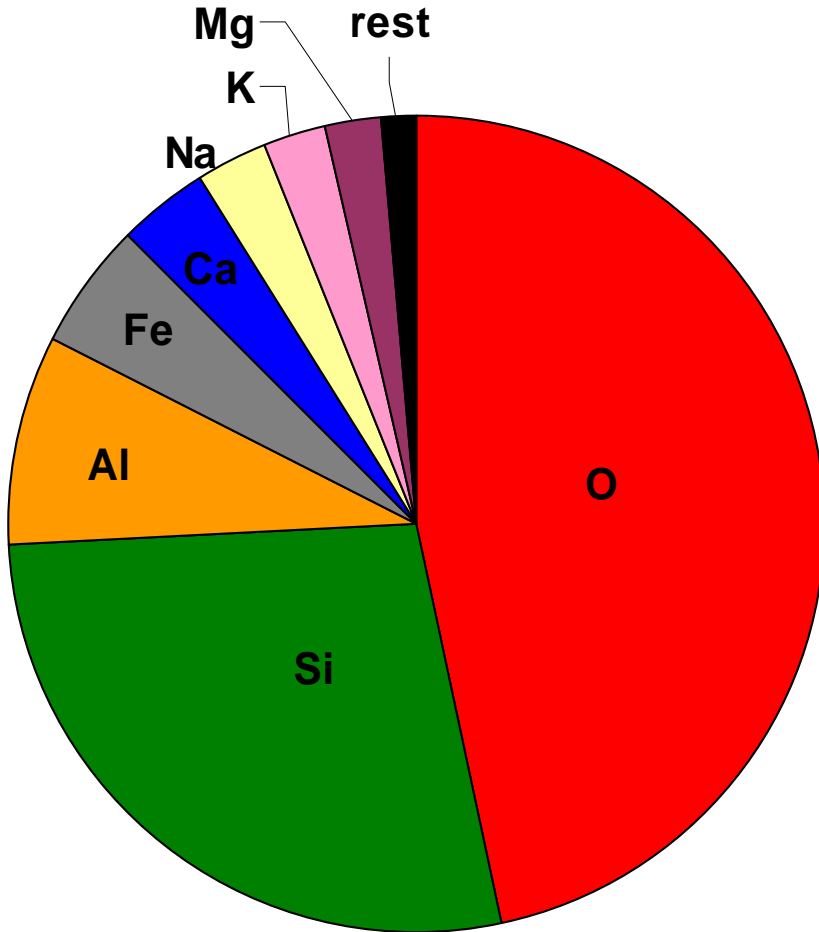
**$\text{CaO}$  41,2% ;  $\text{MgO}$  3,1% ;  $\text{K}_2\text{O}$  0,9%**

# Composition de la croûte terrestre

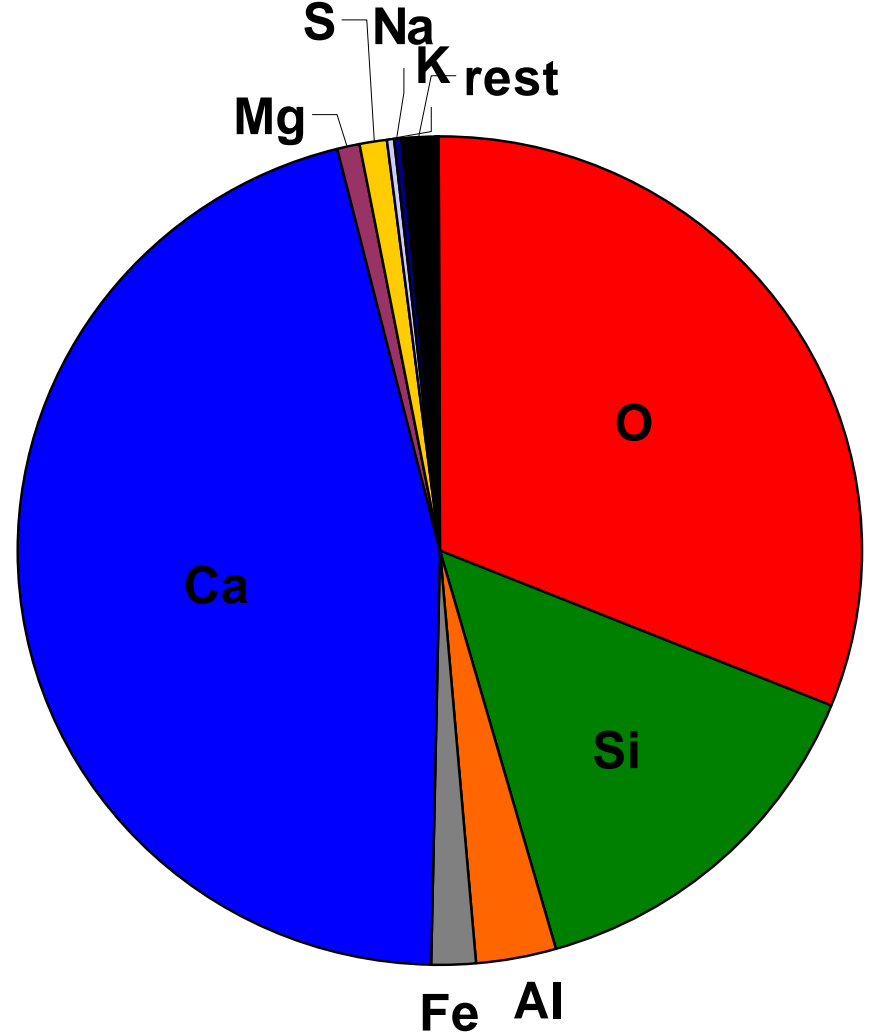


- **Grande abondance des éléments nécessaires**
- **Malgré la quantité plus faible de calcium, cet élément est fortement concentré dans les roches calcaires, bien réparti**

# Composition of the earth's crust



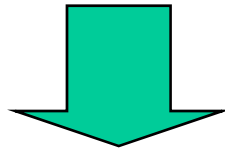
# Composition of cement



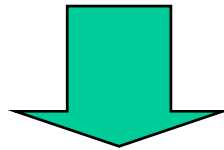
CaO readily available from limestone

# Composition

Les **éléments** constituants : O, Si, Ca, Al, Fe

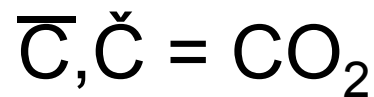
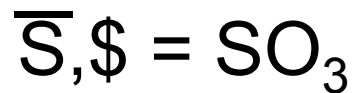
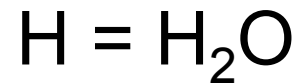
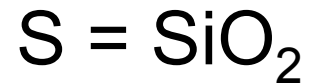


Les **oxydes** constituants : CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
Abréviations **C** **S** **A** **F**



Les **phases** constituantes : **C<sub>3</sub>S**, **C<sub>2</sub>S**, **C<sub>3</sub>A**, **C<sub>4</sub>AF** (ferrite ss)  
Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>, Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, Ca<sub>2</sub>(Al,Fe)O<sub>5</sub>

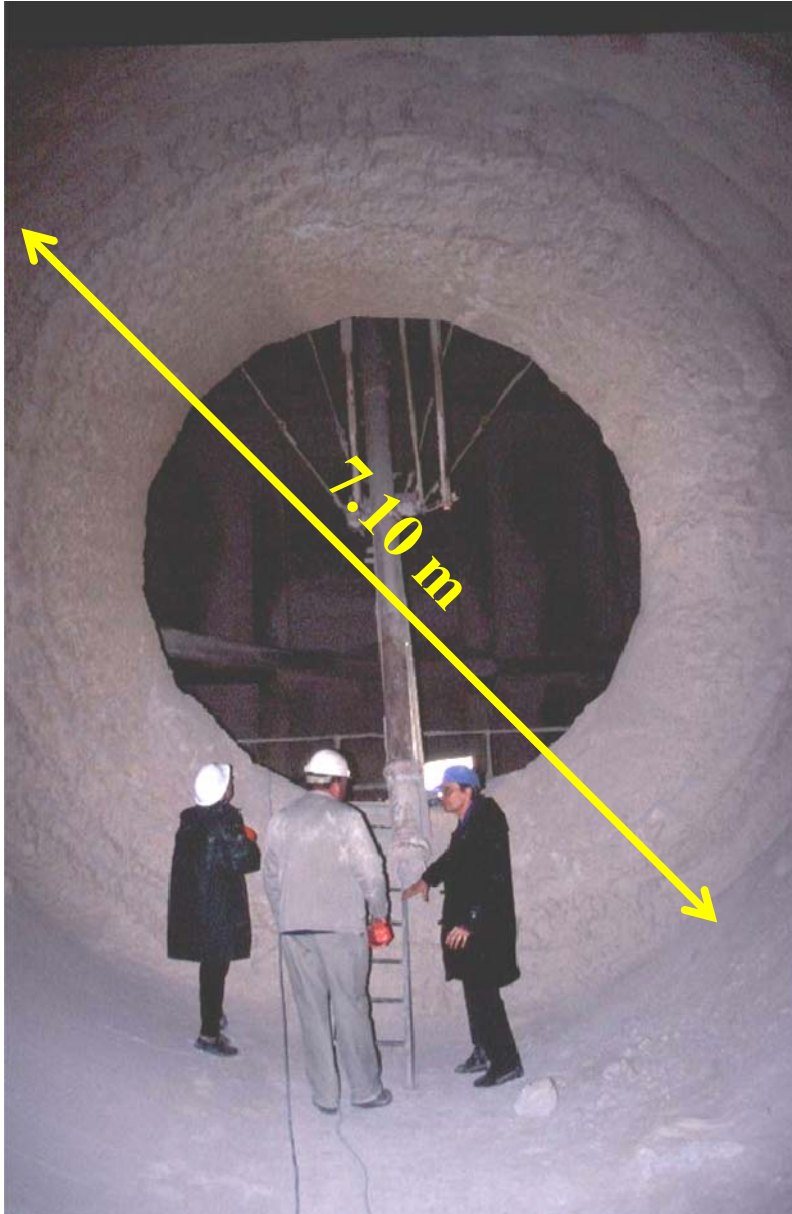
# Cement chemistry notation



# La Carrière







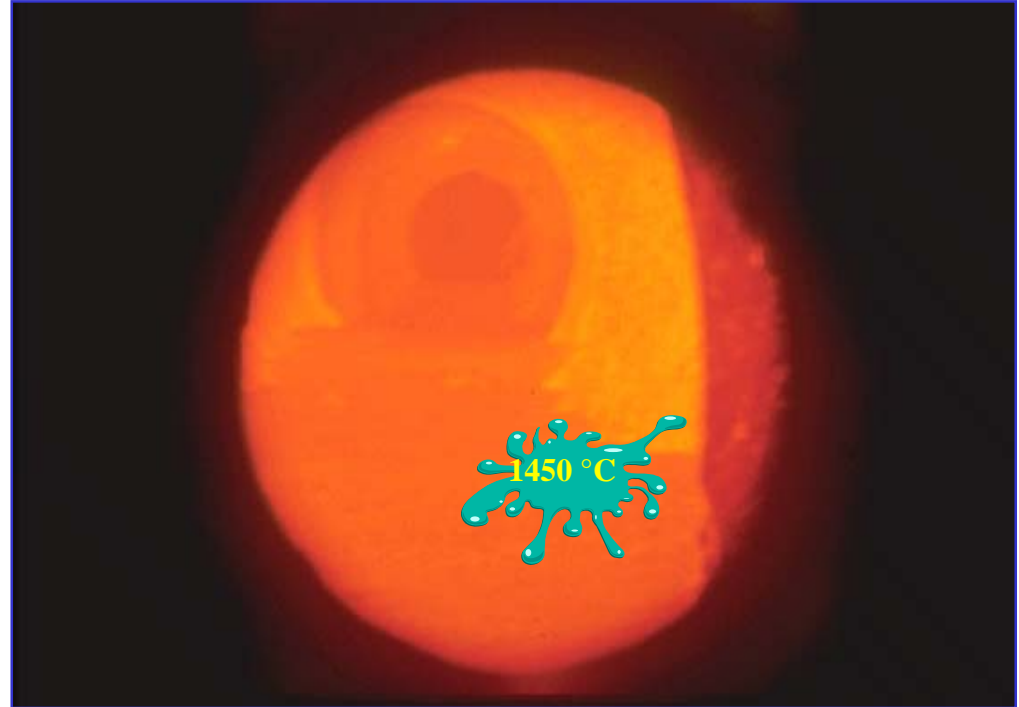
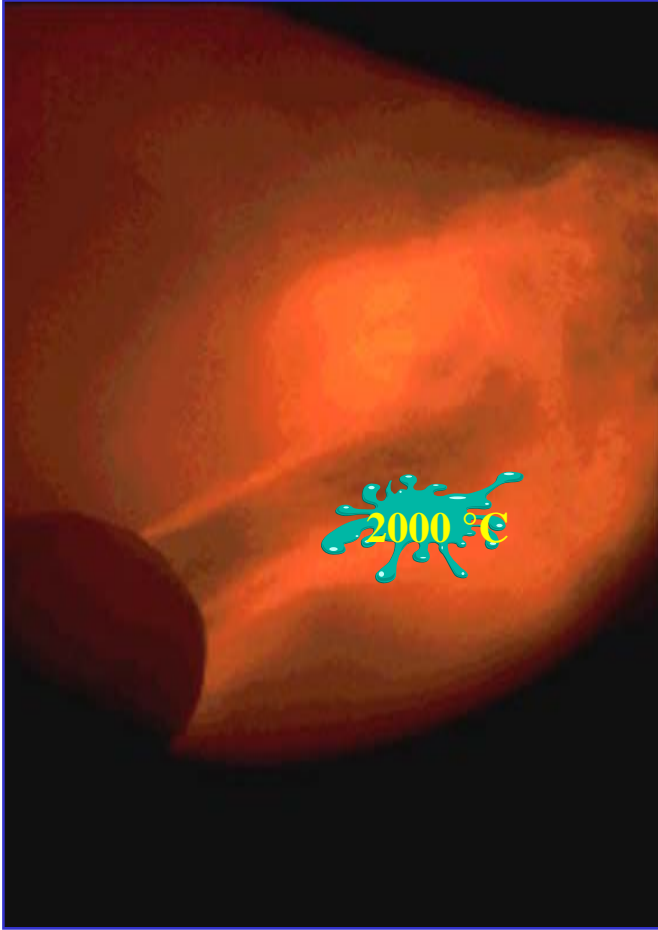


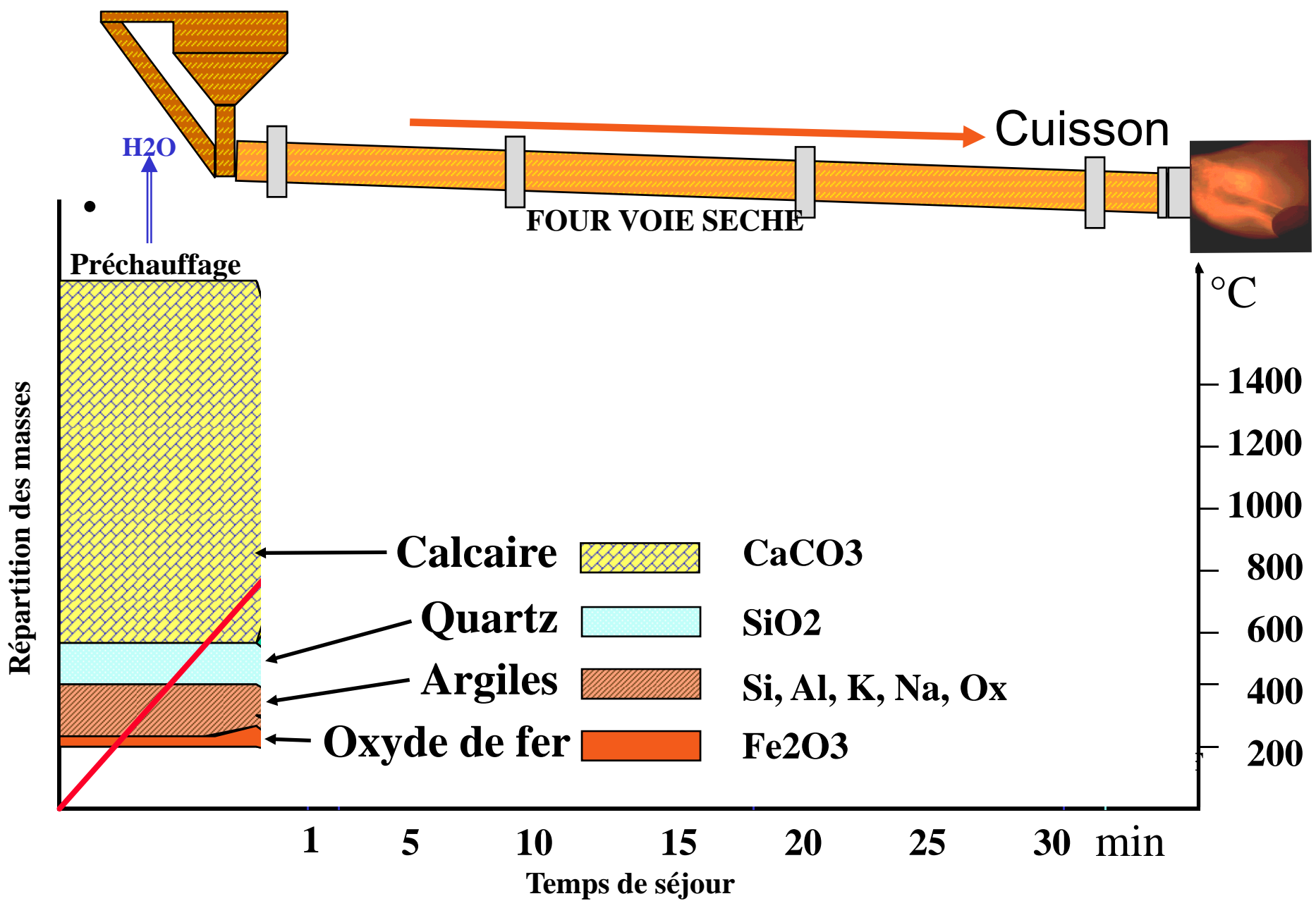


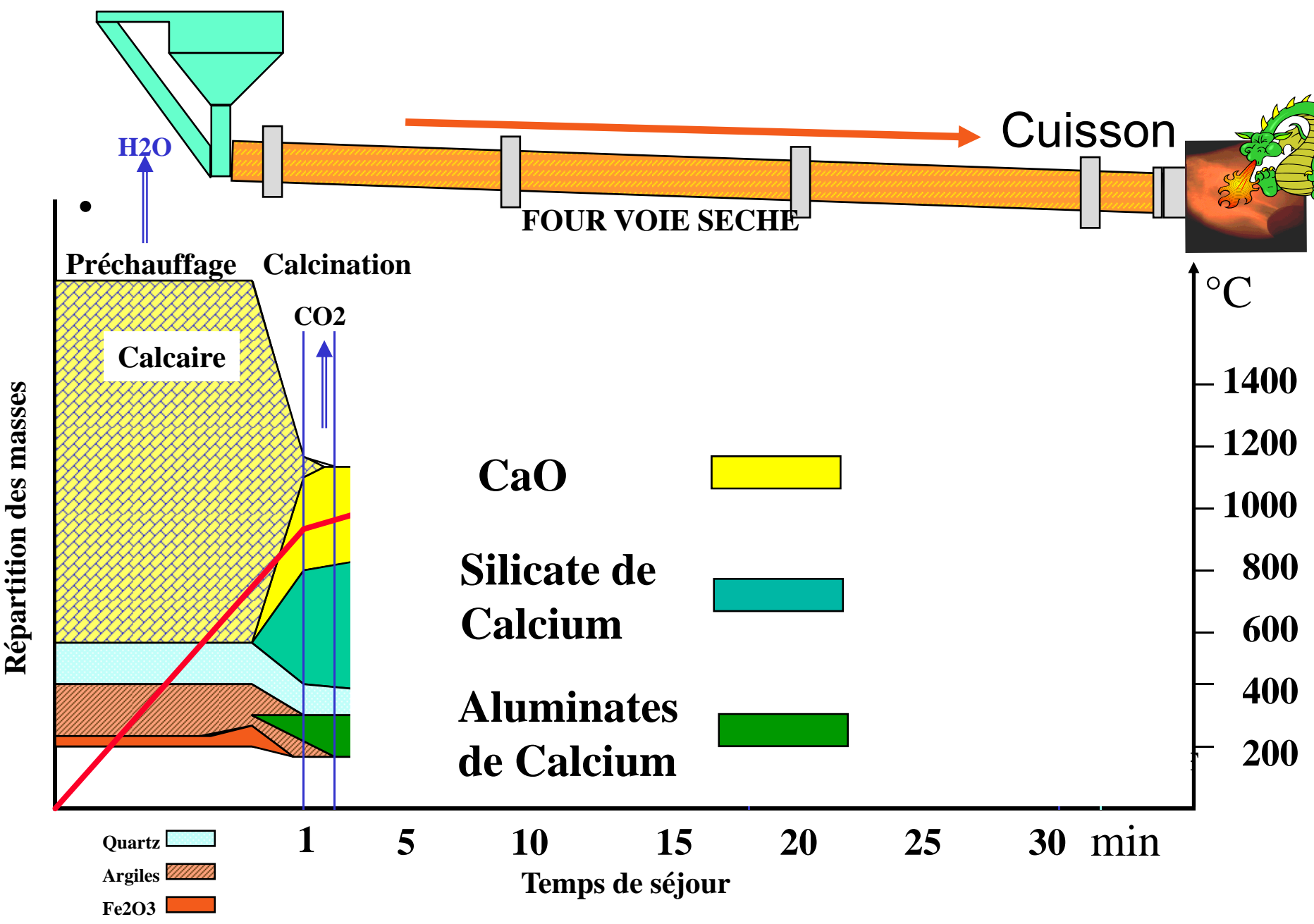
# La cuisson



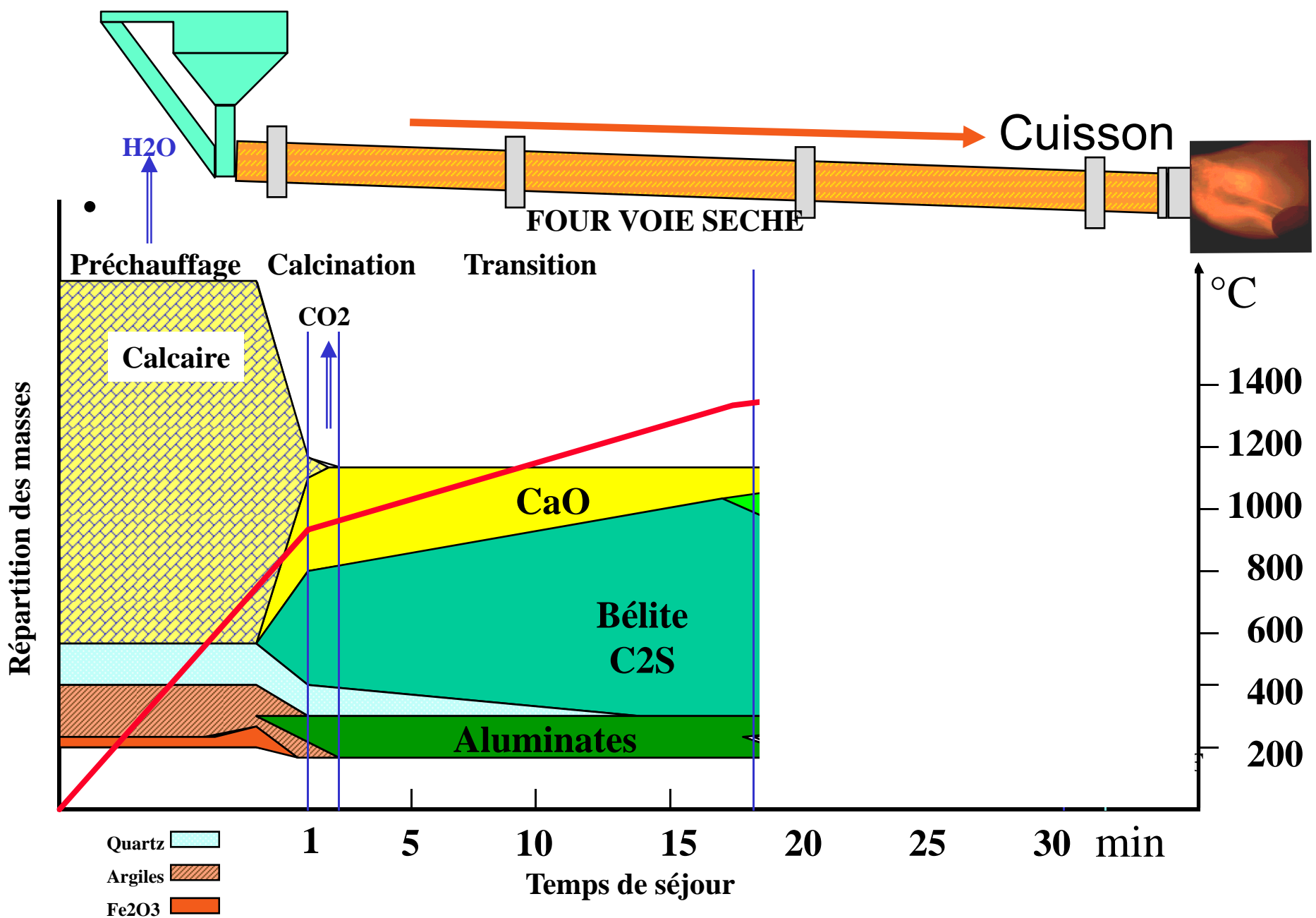
# La cuisson

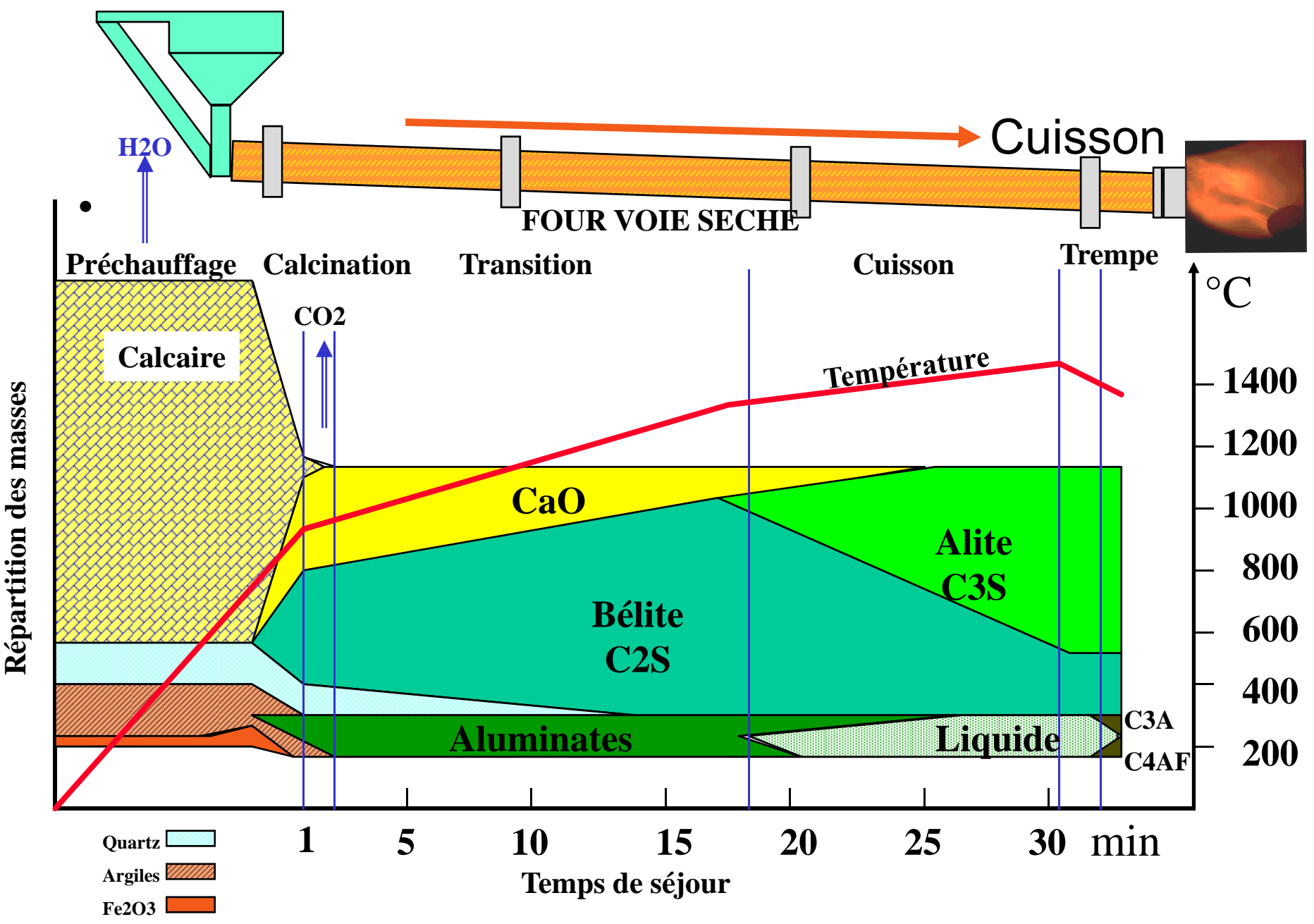






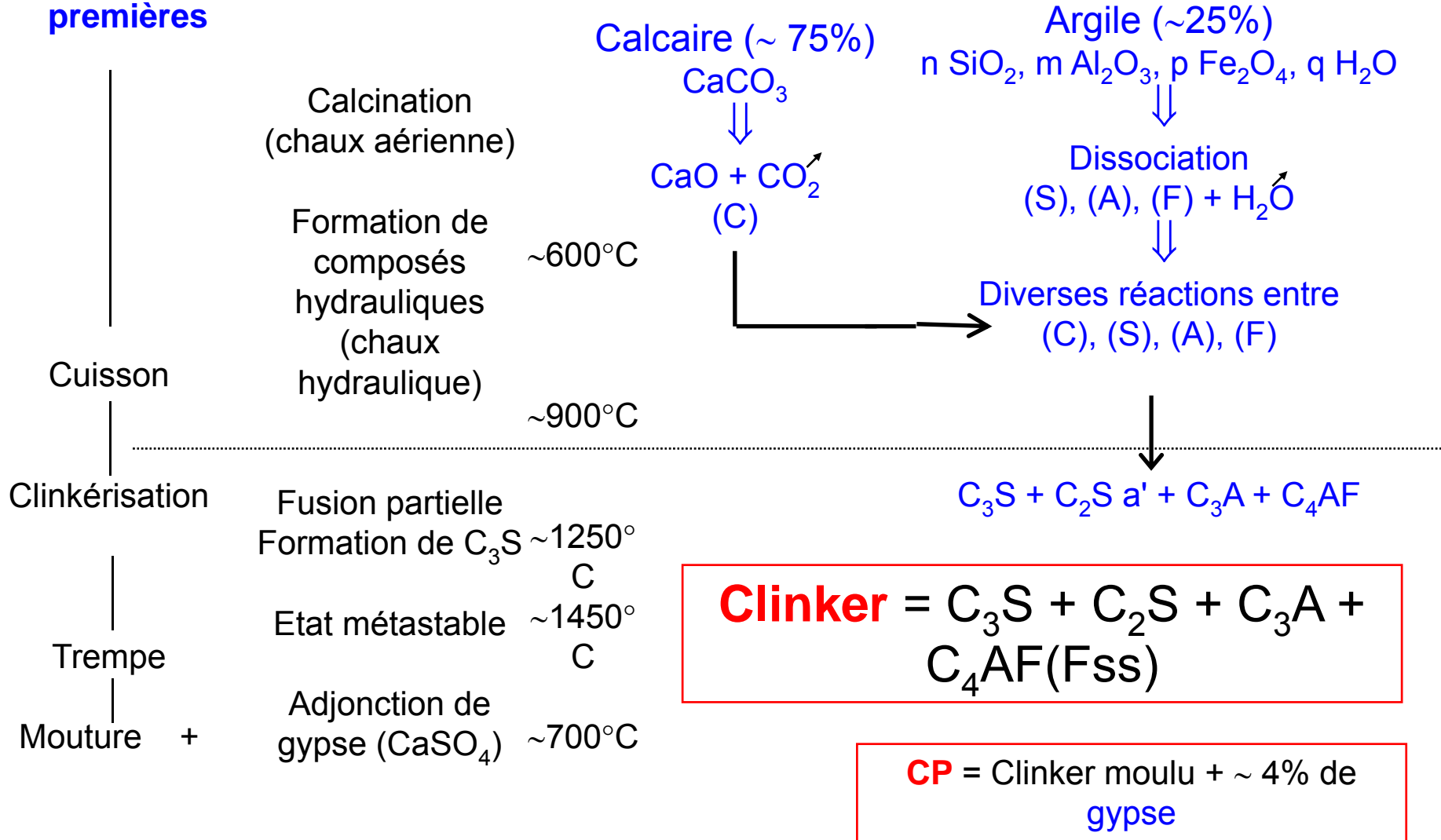
D'après KHD Humboldt Wedag, modifié





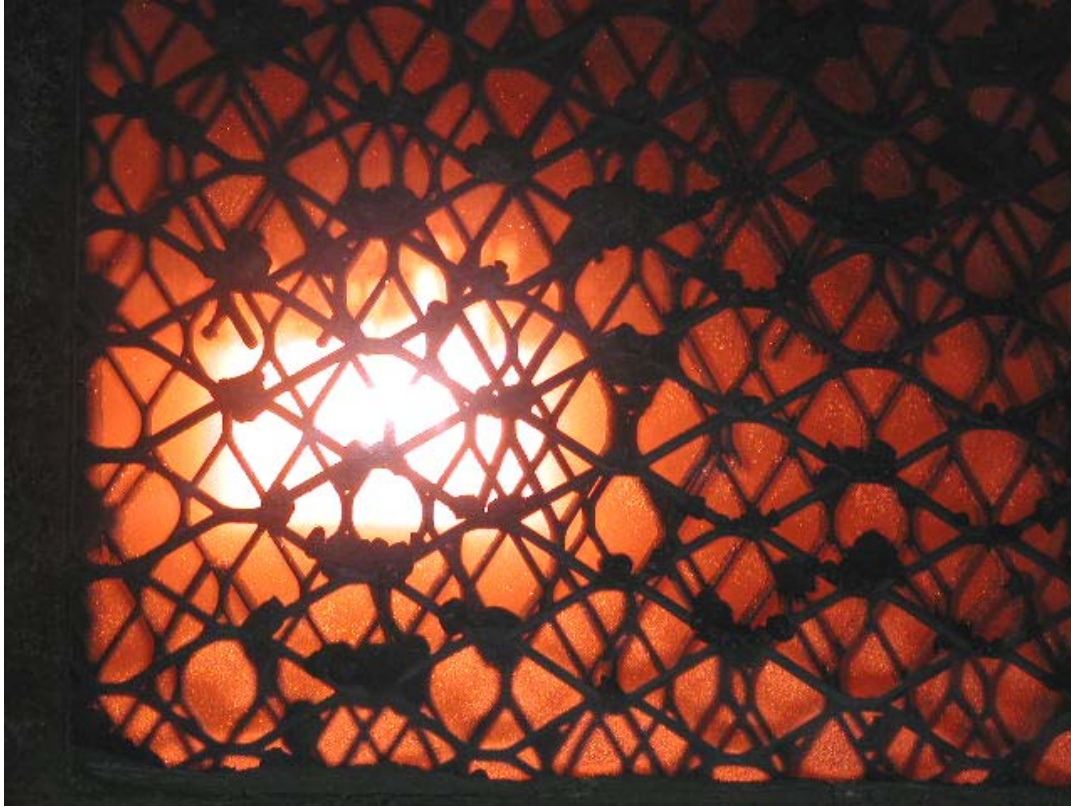
D'après KHD Humboldt Wedag, modifié

# Matières premières

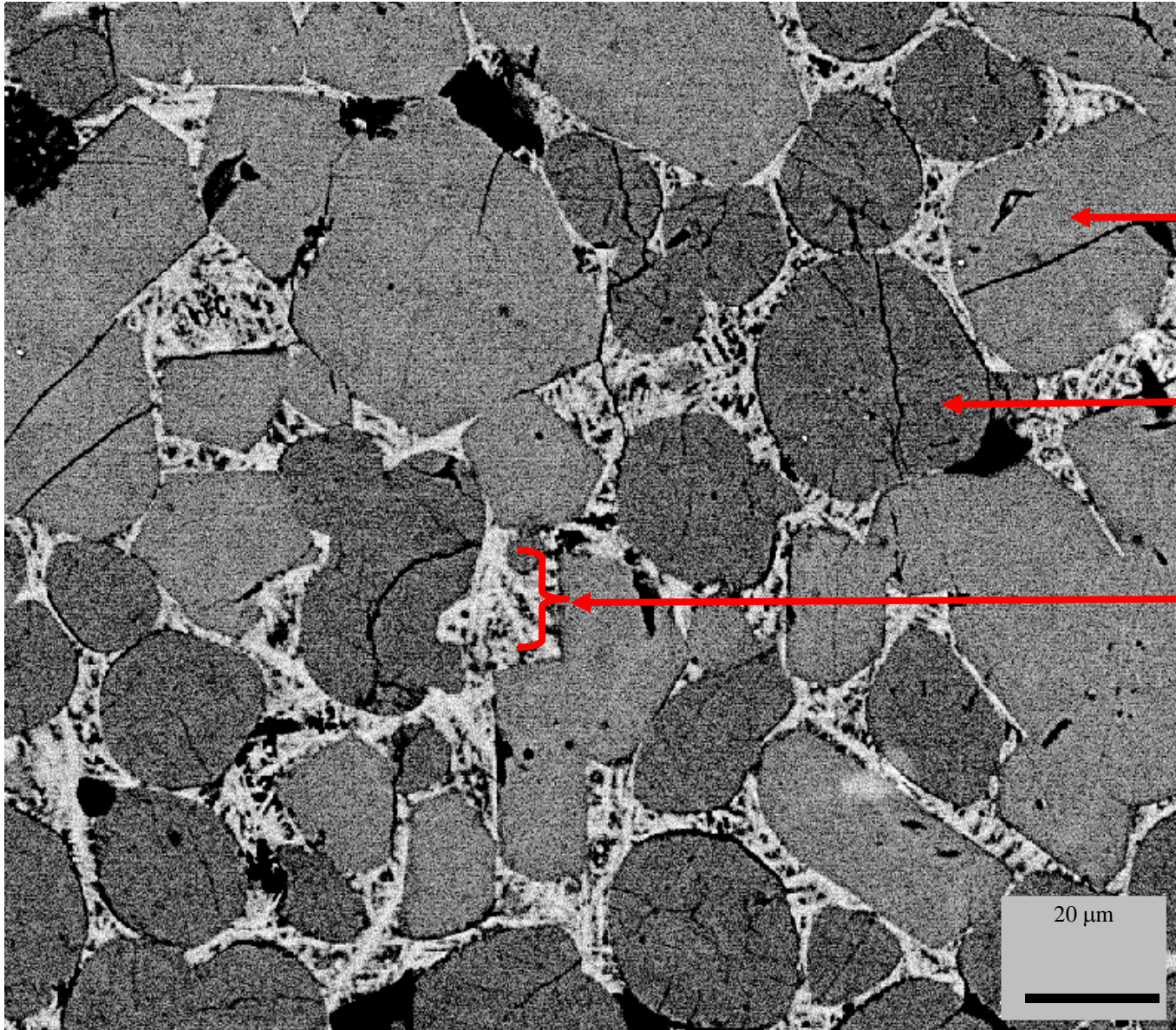




# La trempe



# Microstructure du clinker « idéale »

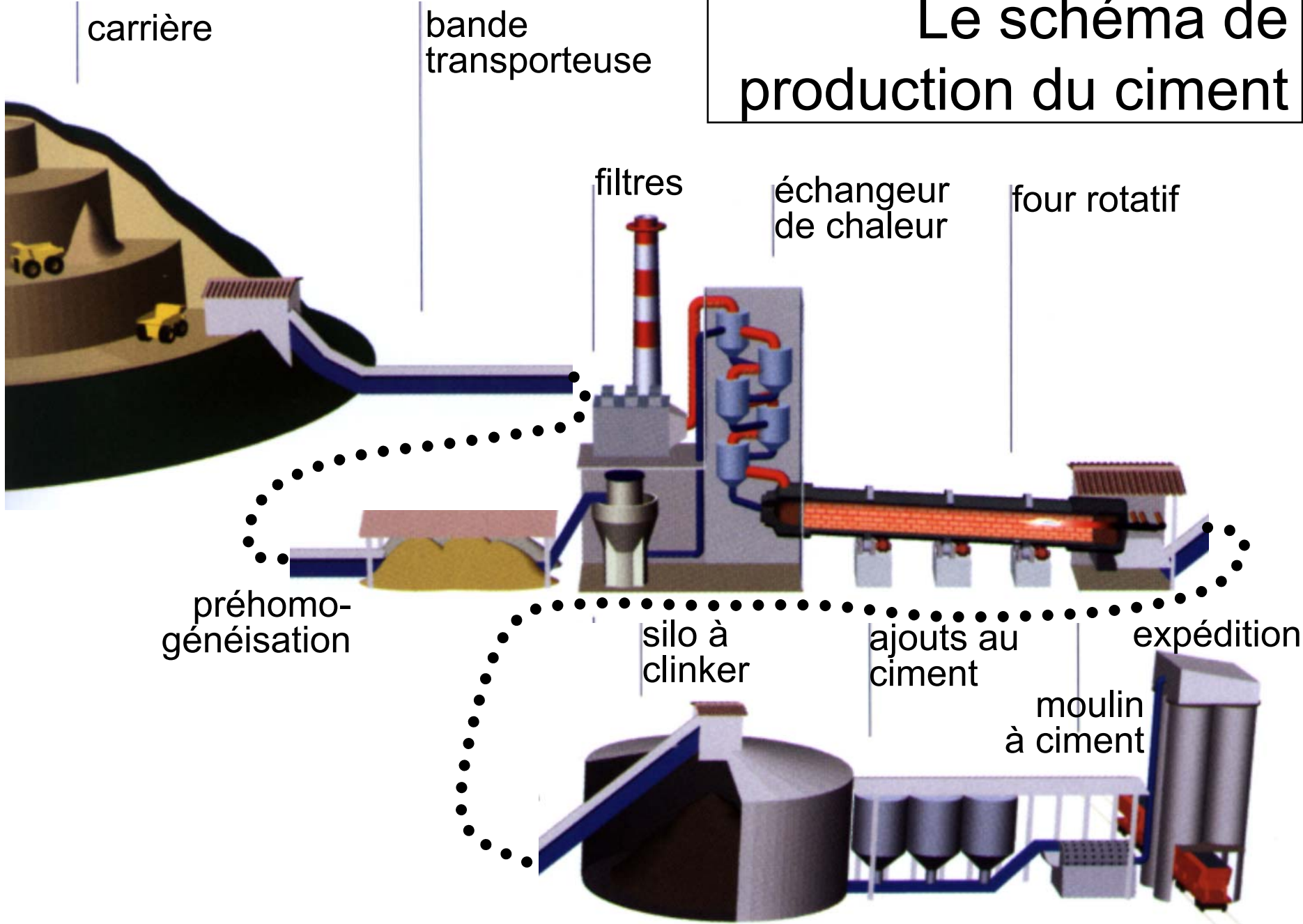


« alite »  
 $C_3S$ , impure

« belite »  
 $C_2S$ , impure

phases  
« interstitielles »  
« celite »  
 $C_3A$ , impure  
+ solution  
solide de ferrite  
«  $C_4AF$  »,  
liquide pendant  
la cuisson

# Le schéma de production du ciment



# Le ciment

Pour fabriquer un ciment, on utilise :



Clinker

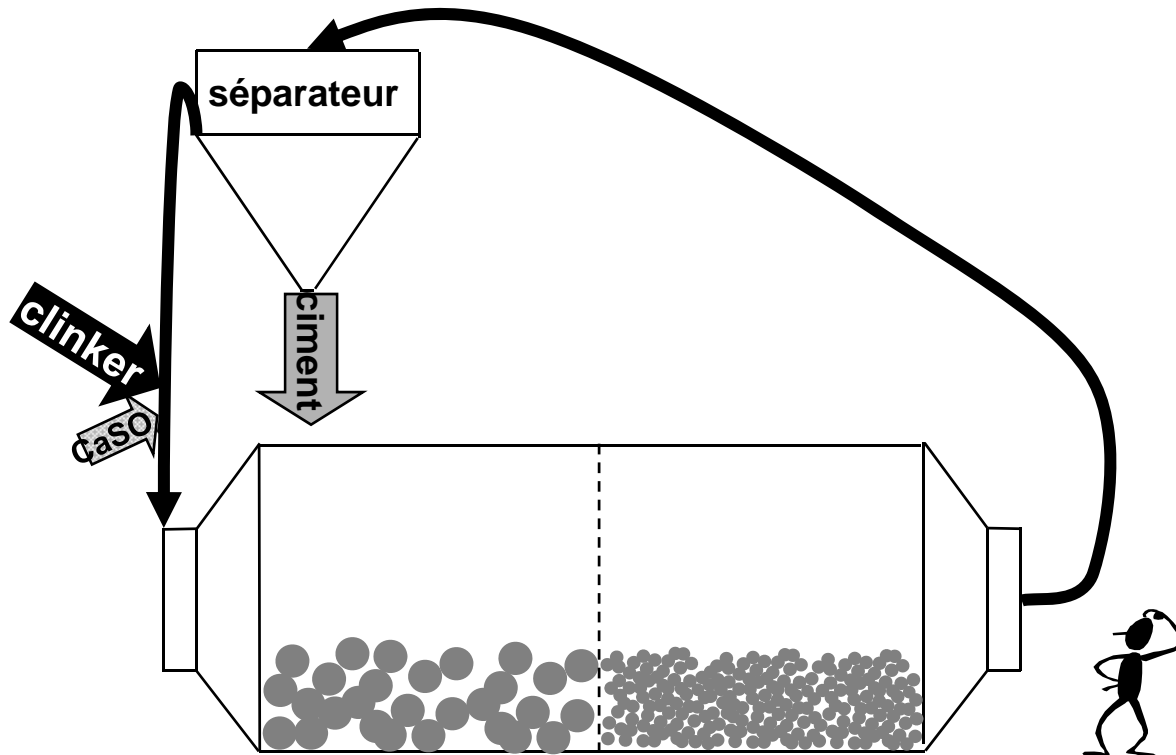
+

Régulateur  
de prise

+

Autres  
constituants  
(éventuellement)

# Broyage



2 ou 3 compartiments

Toujours

Ajout de  $\text{CaSO}_4\text{H}_x$ :  
(4 – 8%)

- gypse ( $x=2$ )
- anhydrite ( $x=0$ )

déshydratation  
à plâtre ( $x=0,5$ )  
possible

Souvent

Ajout de  $\text{CaCO}_3$  fin:  
(10-20%)

Filler fin

Aussi possible

Laitier (slag)

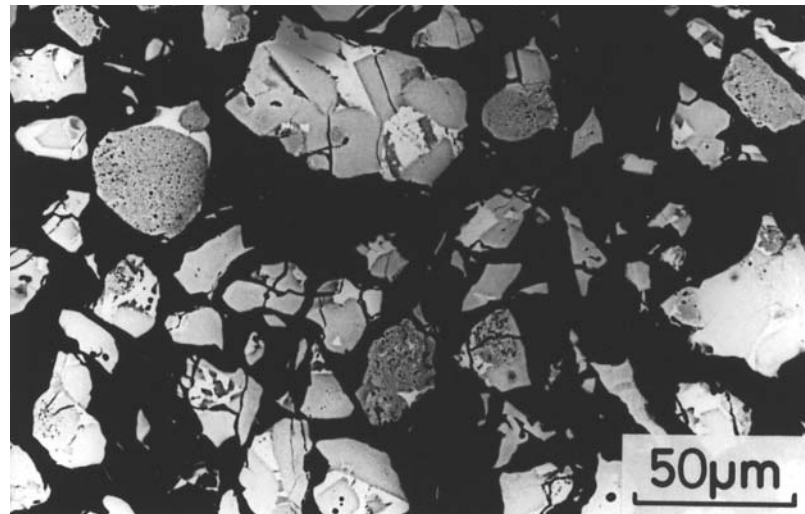
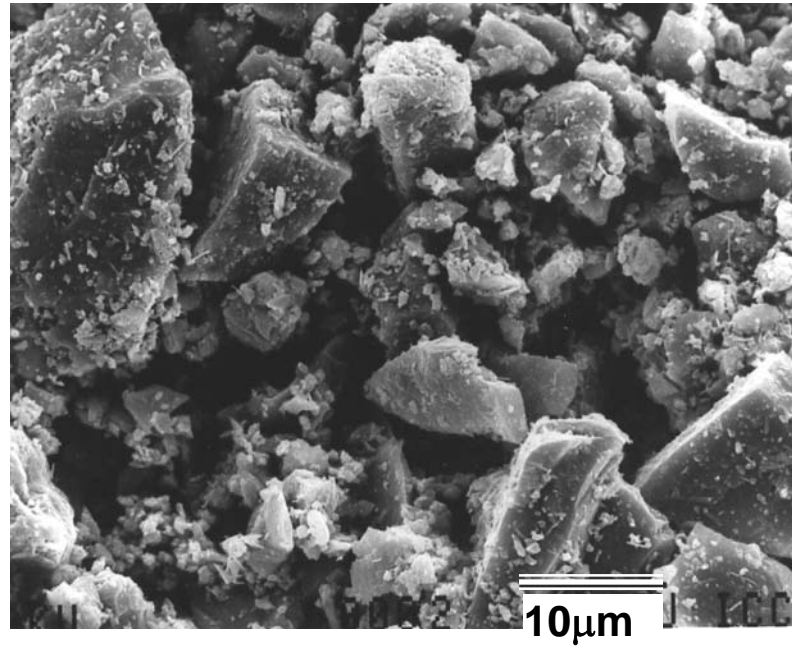
Cendres volantes (fly ash)

Fumée de silice (silica fume)

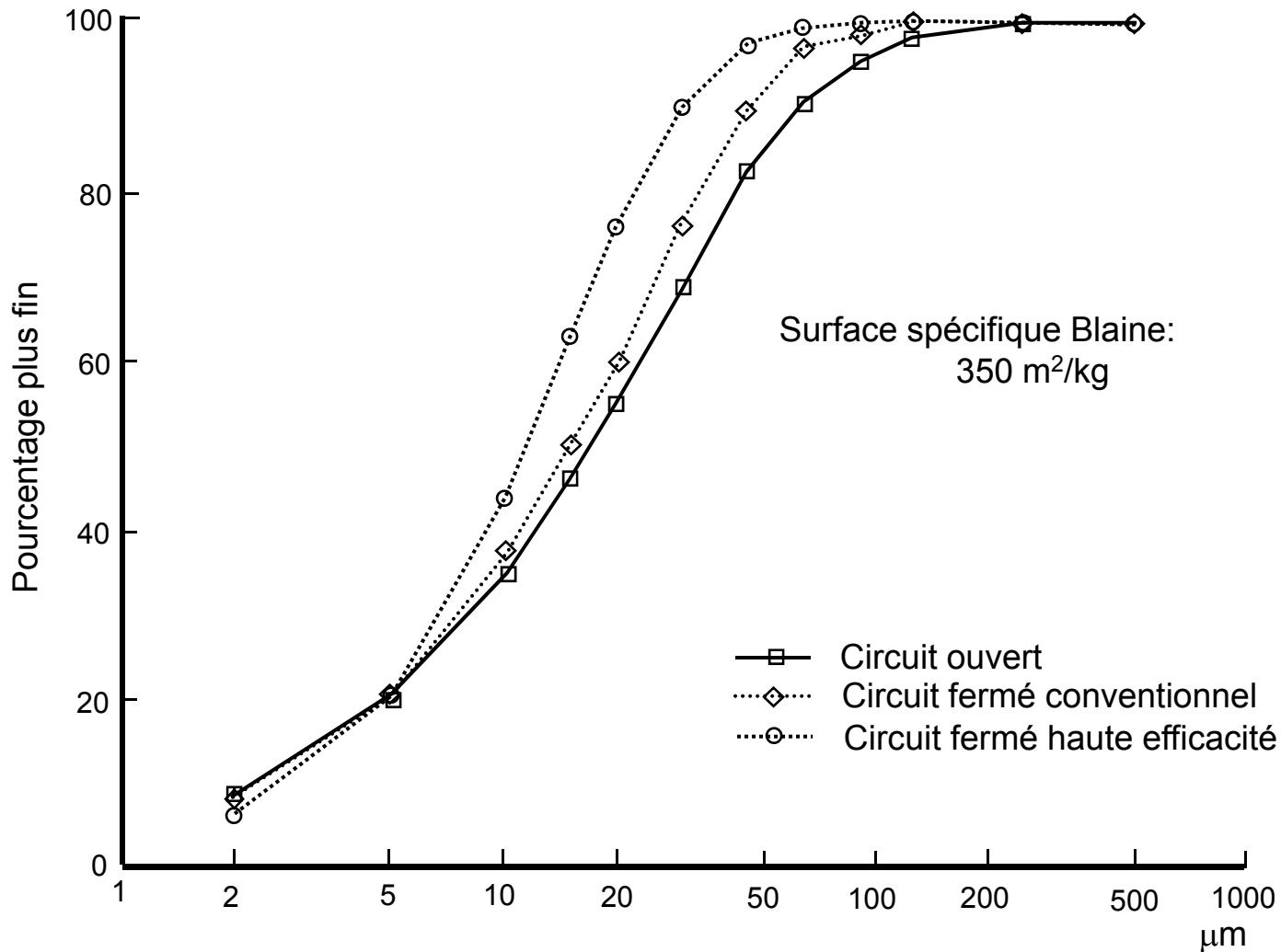
# Le broyage



# Grains du ciment



# Granulométrie – psd (particle size distribution)



< 1 μm  
~75 μm

La plupart:  
10-50 μm



# Broyage

Contrôle par surface spécifique « Blaine »  
Perméabilité à l'air

Gamme normale	320-370 m <sup>2</sup> /kg
Ciment résistance rapide	400 – 500
Ciment pétrolier	220 - 300

# Livraison (en sac ou en vrac)

Vrac  
~80-90%

Sac  
~<10%

Big bag  
~<10%

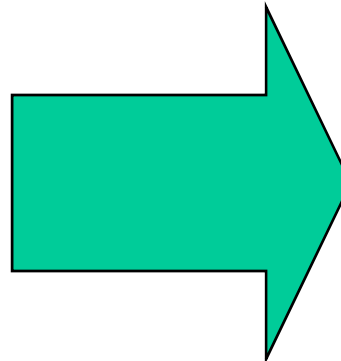


# Caractérisation du ciment

Analyse oxyde (XRF)

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>20,5</b>	<b>(19 – 21)</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>6</b>	<b>(4-7)</b>
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>2,5</b>	<b>(2-3)</b>
<b>CaO</b>	<b>64</b>	<b>(62-65)</b>
☀ <b>MgO</b>	<b>1,2</b>	<b>(1-4)</b>
<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>2,8</b>	<b>(2,5-3,2)</b>
<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>0,5</b>	<b>(0,3-1)</b>
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>0,2</b>	<b>(0,2-0.5)</b>
<b>PaF(LOI)</b>	<b>1</b>	<b>(1-2)</b>
☀ <b>CaO libre</b>	<b>1</b>	<b>(0,5-1,5)</b>
<b>resid insol</b>	<b>0,3</b>	<b>(0,2-0,4)</b>

+Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, CO<sub>2</sub>



<b>C3S</b>	<b>?</b>
<b>C2S</b>	<b>?</b>
<b>C3A</b>	<b>?</b>
<b>C4A</b>	<b>?</b>
<b>F</b>	

☀ Contrôle strict pour éviter le gonflement

# Calcul « Bogue » composition des phases «potentielles»

Tous  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sous la forme  $\text{C}_4\text{AF}$ :  
Avec  $\text{CaO}$  et  $\text{Al}_2\text{O}_3$



$\text{Al}_2\text{O}_3$  qui reste sous la forme  $\text{C}_3\text{A}$ :  
Avec  $\text{CaO}$



$\text{CaO}$  qui reste –  $\text{CaO}$  libre



Solution de deux  
équations simultanées  
pour  $\text{C}_3\text{S}$  et  $\text{C}_2\text{S}$

$$\text{C}_4\text{AF} = 3,04\text{Fe}_2\text{O}_3$$

$$\text{C}_3\text{A} = 2,65\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_2\text{O}_3$$

$$\text{C}_3\text{S} = 8,60\text{SiO}_2 + 1,08\text{Fe}_2\text{O}_3 + 5,07\text{Al}_2\text{O}_3 - 3,07\text{CaO}$$

$$\text{C}_2\text{S} = 4,07\text{CaO} + 7,60\text{SiO}_2 - 1,43\text{Fe}_2\text{O}_3 - 6,72\text{Al}_2\text{O}_3$$

À cause des solutions solides

Le calcul « Bogue » n'est qu'une estimation

**BOGUE QXDA**

<b>C<sub>3</sub>S</b>	<b>59</b>	<b>67</b>
<b>C<sub>2</sub>S</b>	<b>13</b>	<b>15</b>
<b>C<sub>3</sub>A</b>	<b>9</b>	<b>5</b>
<b>« C<sub>4</sub>AF »</b>	<b>9</b>	<b>6</b>

Écartis typiques

# CEM I (>95% clinker)

Résistance précoce High early strength	<b>Finesse</b> ↑, $C_3S$ ↑, $C_3A$ ↑, (alk↑)	R1j ~2x
Basse chaleur Low heat	<b>Finesse</b> ↓, $C_3S$ ↓, $C_2S$ ↑, $C_3A$ , alk↓)	R1j ~0.5x
Résistance au sulfate (eau de mer) Sulfate resisting	$C_3A < 4\%$ (bogue)	R1j ~0.7x
Ciment blanc White cement	$Fe_2O_3 \sim 0$	

ajustement du cru, choix de carrière

# Le ciment

Pour fabriquer un ciment, on utilise :



Clinker +



Calcaire



Laitier



Régulateur  
de prise  
(gypse)



Cendres  
volantes

**Autres constituants**

# Classification des principaux types de ciments selon ENV 197-1

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 pouzzolanique	<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>40-64</b>	36-60	0-5
		<b>V / B</b>	<b>20-39</b>	61-80	0-5

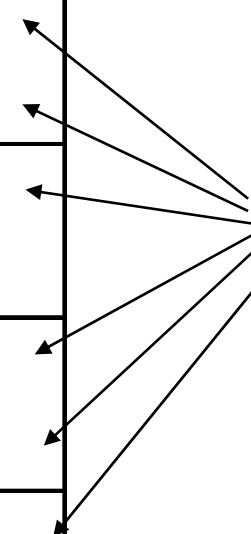


# Gamme de ciments en Suisse romande

Usine Eclepens

Désignation	
Commerciale	Selon ENV 197-1
<b>NORMO 3</b>	CEM I 32.5
<b>NORMO 4</b>	CEM I 42.5
<b>NORMO 5 R</b>	CEM I 52.5 R
<b>ALBARO 5</b>	Ciment blanc CEM I 52.5
<b>FLUVIO 3 R</b>	CEM II / A-L 32.5 R
<b>FLUVIO 4 R</b>	CEM II / A-L 42.5 R
<b>PROTEGO 3 L HS</b>	CEM II / A-L 32.5 HS
<b>PROTEGO 4 HS</b>	CEM I 42.5 HS
<b>FORTICO 5 R</b>	CEM II / A-D 52.5 R
<b>FORTICO 5 HS</b>	CEM II / A-D 52.5 HS
<b>MODERO 3</b>	CEM III / C 32.5

Avec ajouts  
calcaire broyé  
laitier



# Ce qu'il faut retenir

- **C=CaO, S=SiO<sub>2</sub>, A=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, F=Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**
- **4 phases dans clinker – C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF**
- **Dominance de C<sub>3</sub>S ~ deux tiers**
- **Pendant le broyage ajout de ~4-5% CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O**
- **Contrôle de réactivité par la finesse**
- **Aujourd'hui beaucoup de ciments mélangés – ajouts de calcaire, laitier, etc.**
- **Présence de < 1% des alkalis (K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O) qui sont des impuretés, mais jouent un rôle important**