

---

# Fabrication du ciment

---

Prof. Karen Scrivener  
Laboratoire des Matériaux de Construction



# Sommaire

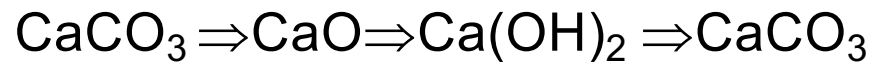
---

1. Quelques notions historiques
2. Production du ciment
  - 2.1. La carrier
  - 2.2. Le cru
  - 2.3. Manufacture du clinker
  - 2.4. Manufacture du ciment
  - 2.5. Livraison
3. Controle qualité
4. Type de ciment
5. Environment
6. L'essentiel

# 1. Notes historiques

---

**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)



# 1. Notes historiques

---

**1824**, Joseph Aspdin en Angleterre, fabrique et brevète 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.





## 2. Production du ciment en Suisse

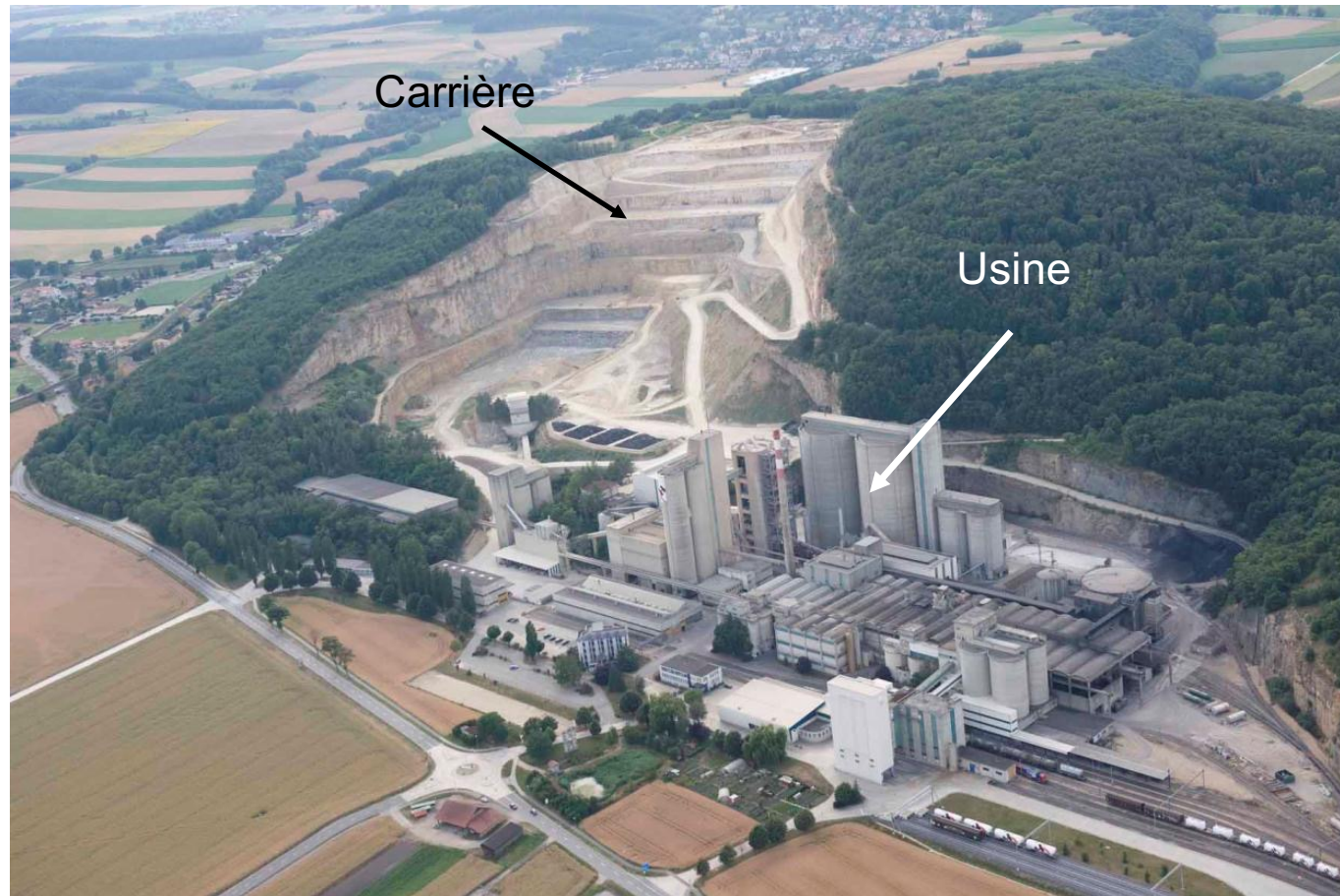
Suisse



<https://www.cemnet.com/global-cement-report/country/switzerland>

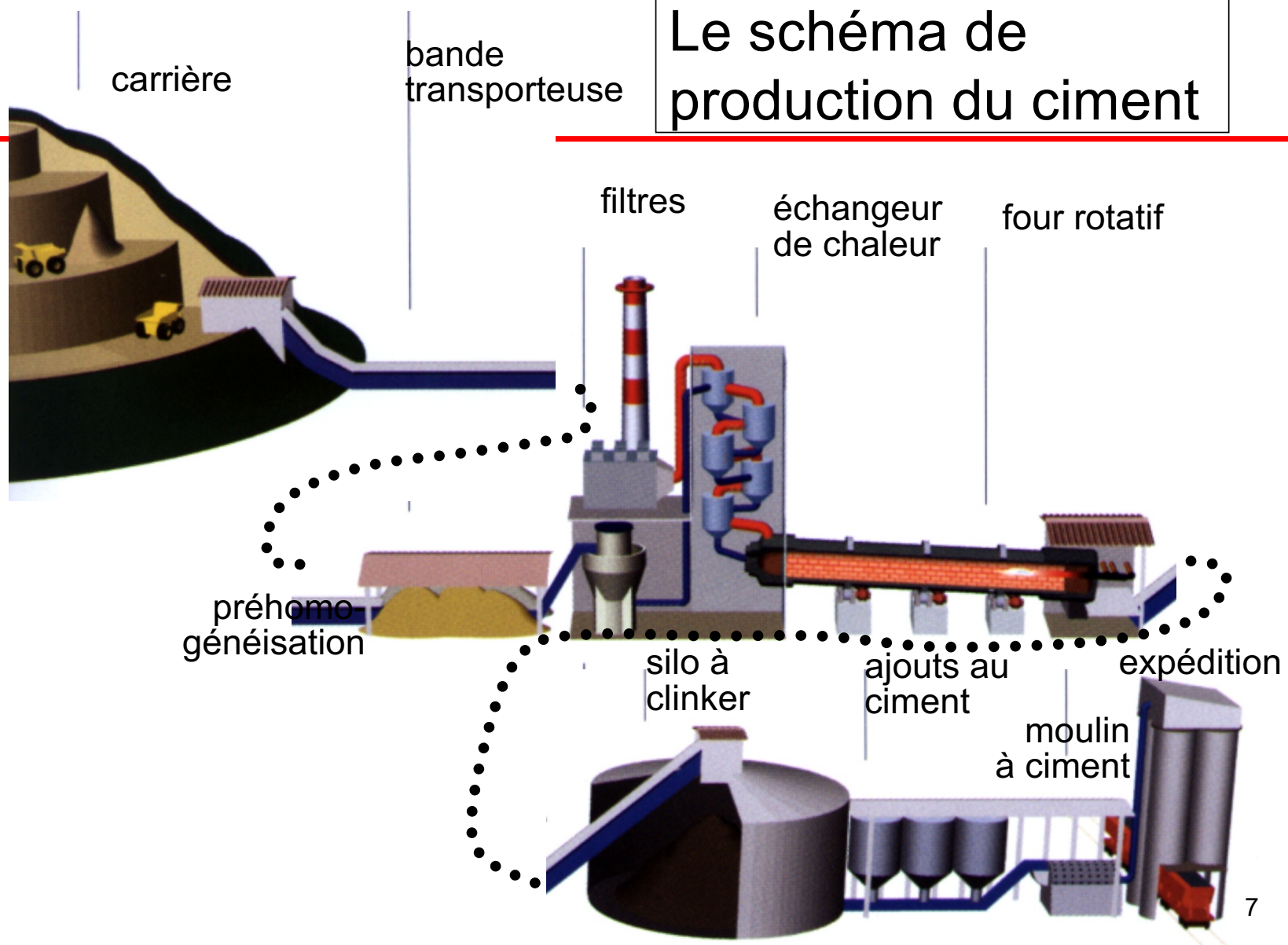
## 2. Production du ciment

---



Lafarge Holcim – Usine Eclepens

# Le schéma de production du ciment



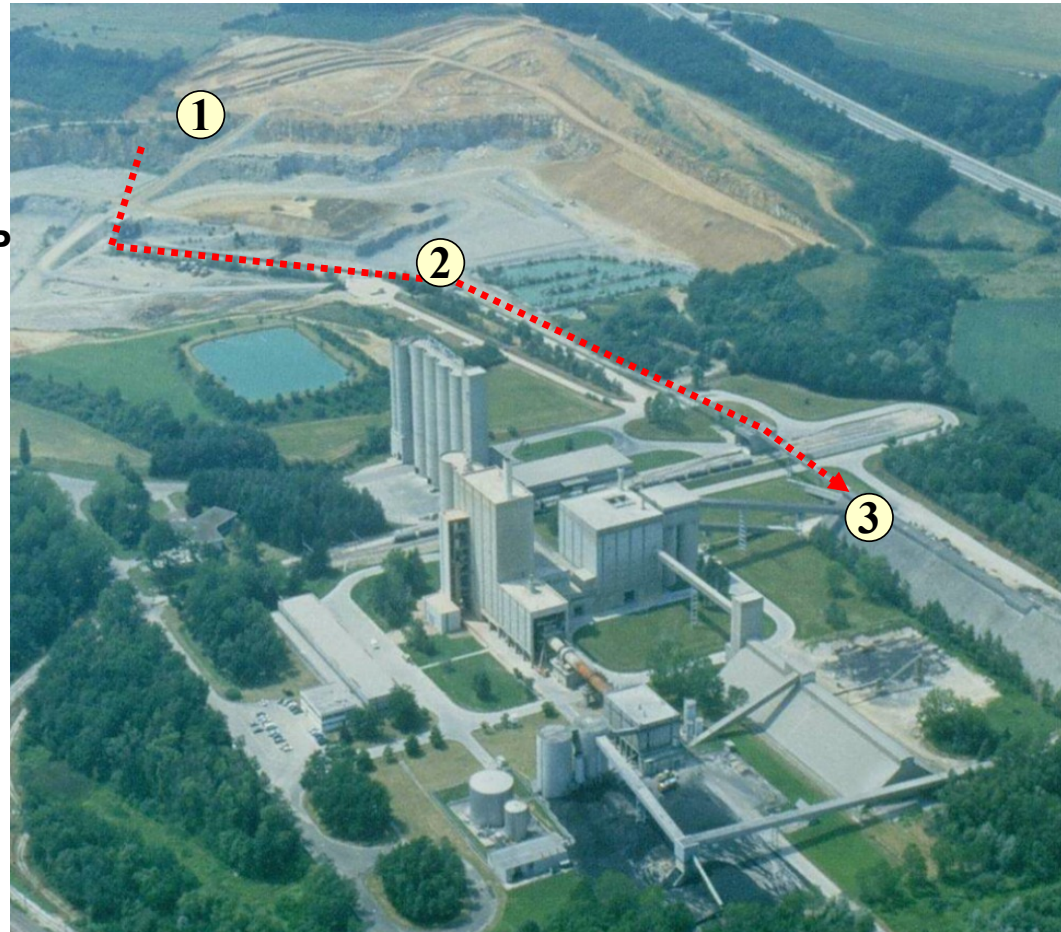


# La fabrication du ciment – le processus

---

1- Extraction

2- Transport MP

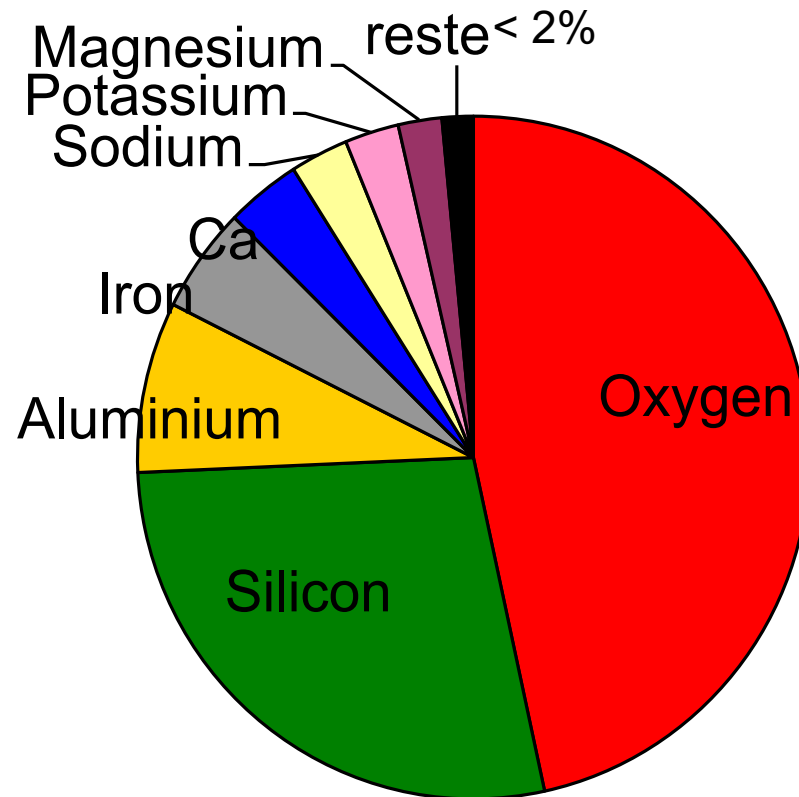


.....> cru

3-Préhomogénéisation

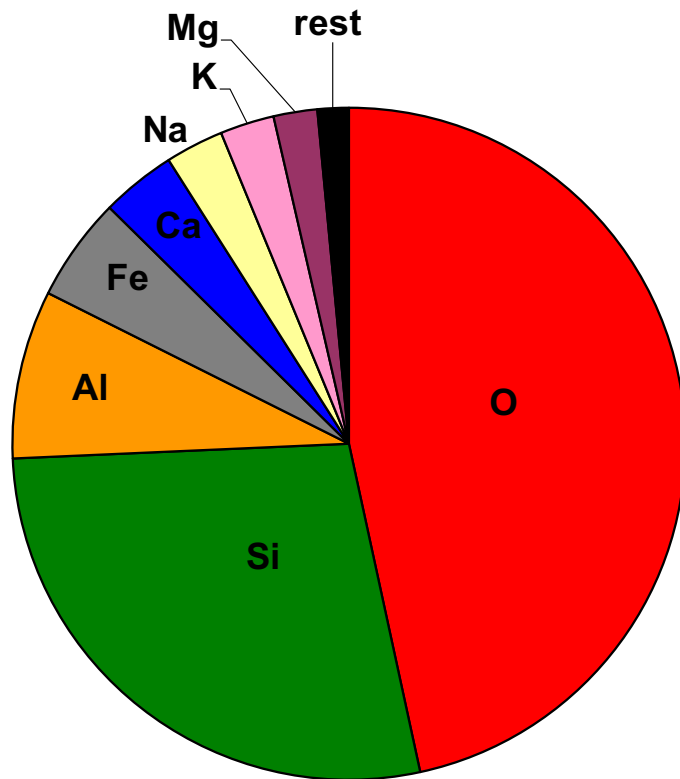
# Composition de la croûte terrestre

---

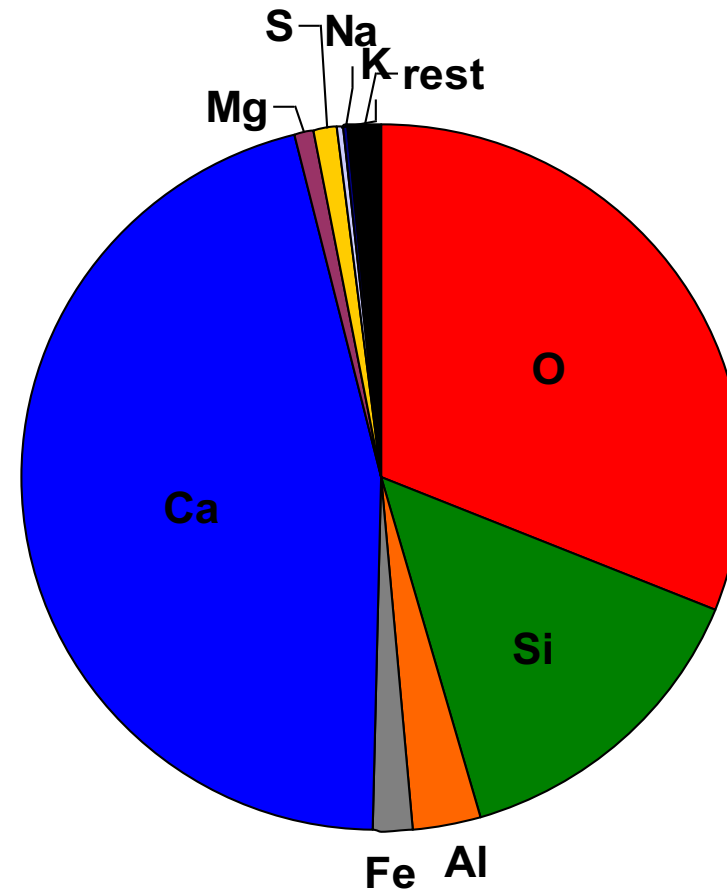


- Grande abondance des éléments nécessaires
- Malgré la quantité plus faible de calcium, cet élément est fortement concentré dans les roches calcaires, bien réparti

Composition  
de la croute terrestre

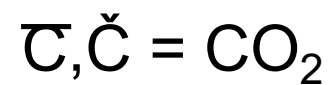
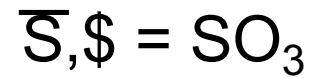
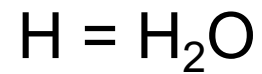
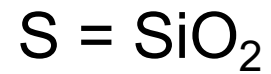


Composition  
du ciment



# Notation chimiques

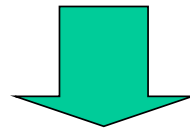
---



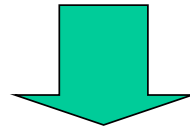
# Composition

---

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>



## 2.1. La carrière

---

**Calcaire (80%)**

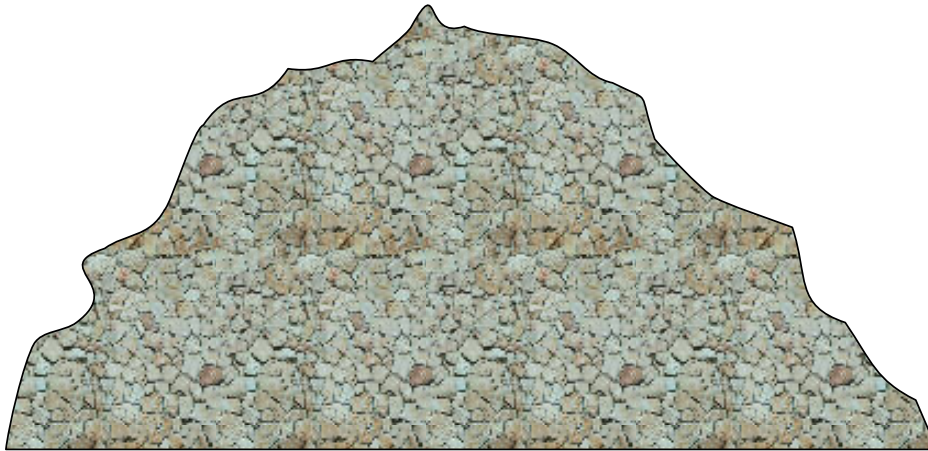


**Argiles (20%)**



## 2.2. Composition du Cru (generale)

---



### Calcaire

~80% roches calcaires

Jusqu'à 95%  $\text{CaCO}_3$

~55% **CaO**

impuretés majeures MgO

bonne source de calcaire  
détermine emplacements  
des usines de ciment

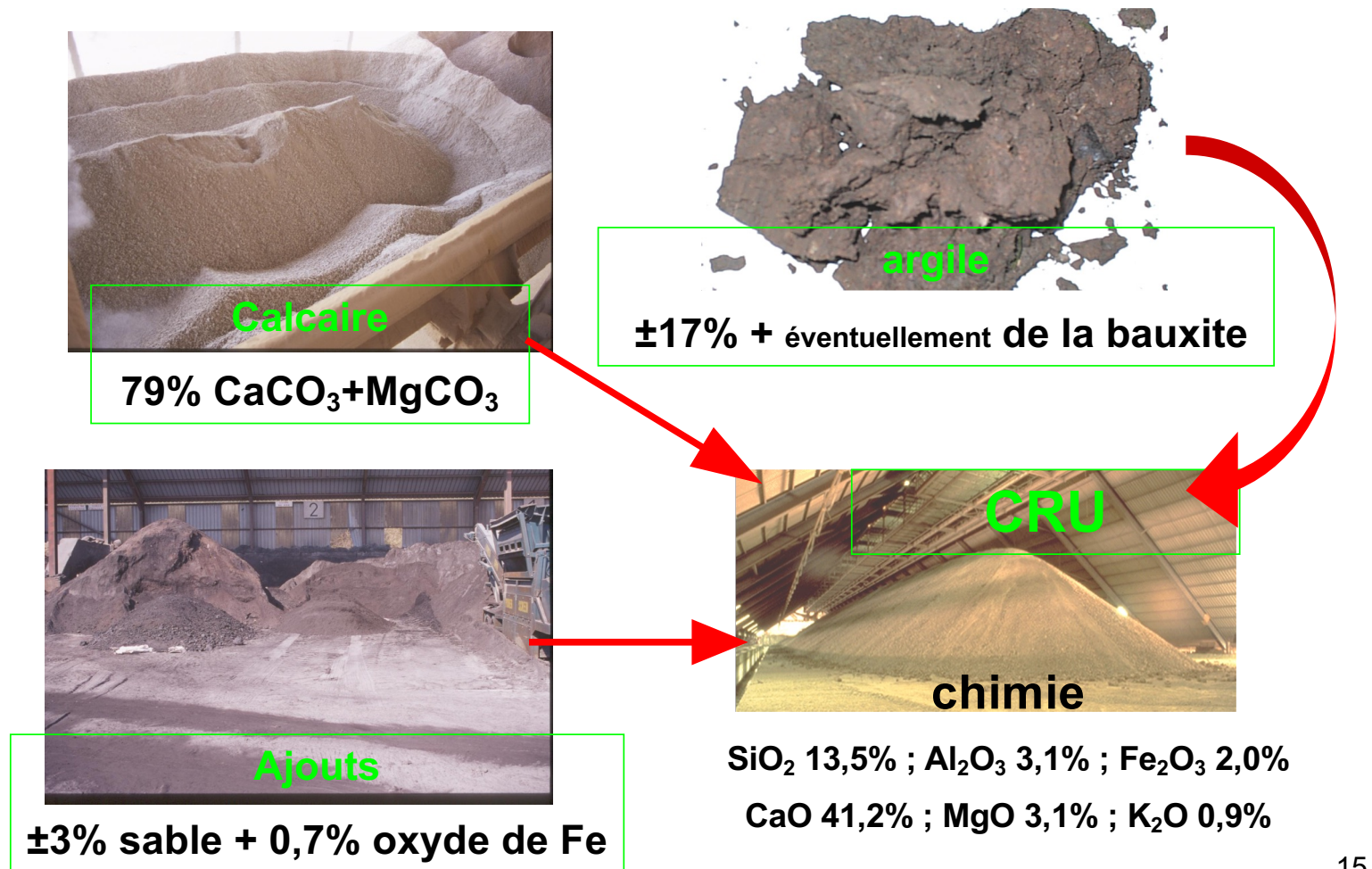


### Argile

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

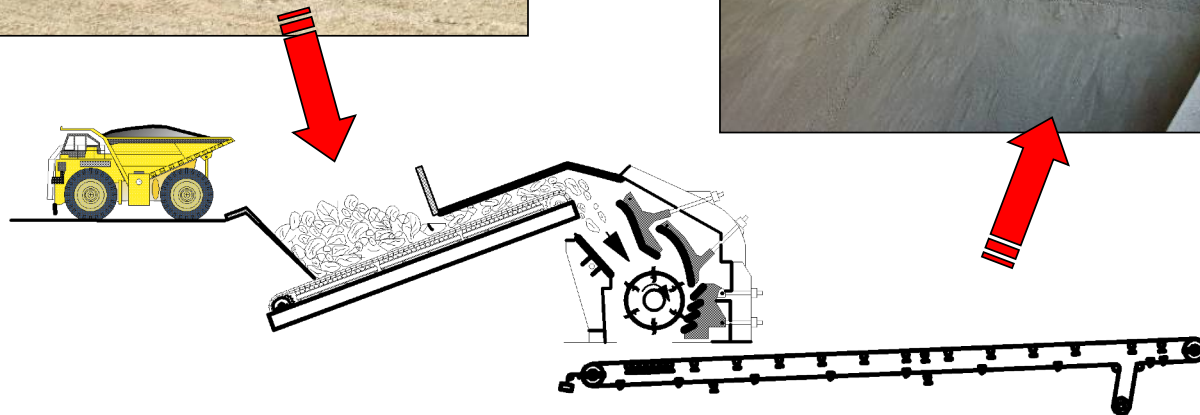
dans certains cas, il faut  
mélanger les sources pour  
obtenir la chimie correcte

## 2.2. Composition de Cru (exemple)



## 2.2. Formation du cru

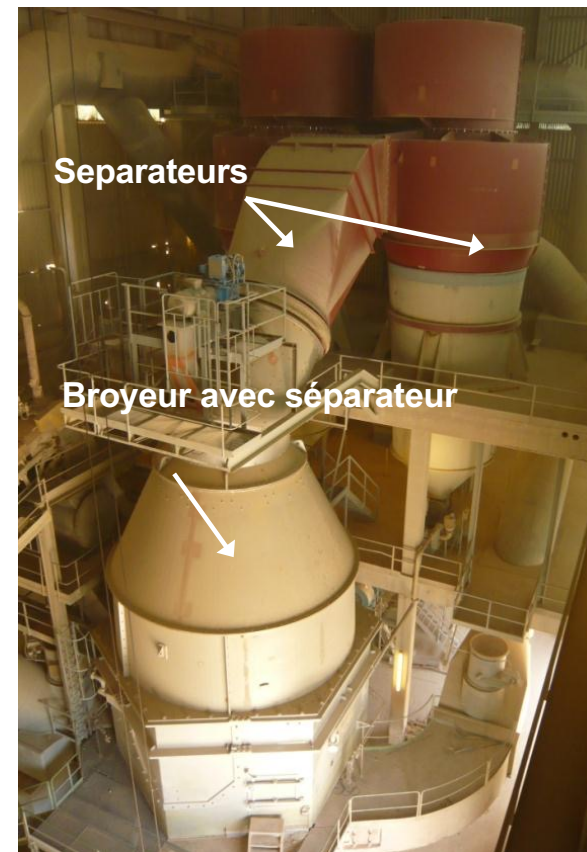
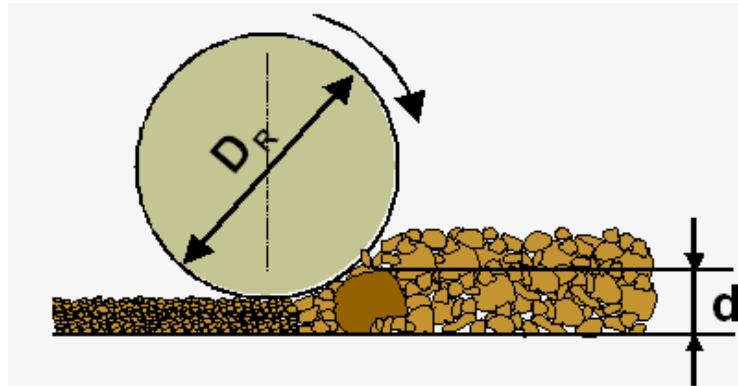
---





## 2.2. Formation du Cru

20-100  $\mu\text{m}$  finesse



Cement Plant Eclépens, 2018

# A l'intérieur d'un moulin à farine

6 Farine crue + gaz de combustion (en direction du filtre)

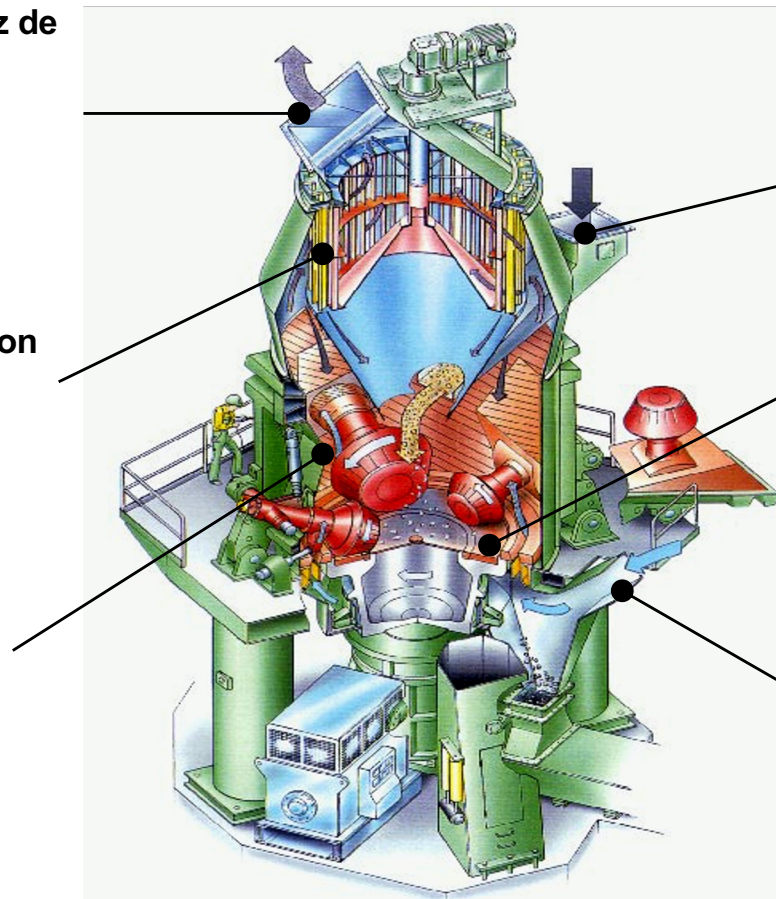
5 Séparateur = tri des grains en fonction de leur dimension

4 Transport de la mat. en cours de broyage

1. Introduction de la matière première

2 Mouture sur l'assiette rotative

3 Gaz de combustion (300 °C) issus du four, assurant le séchage et le transport



Lafarge Holcim

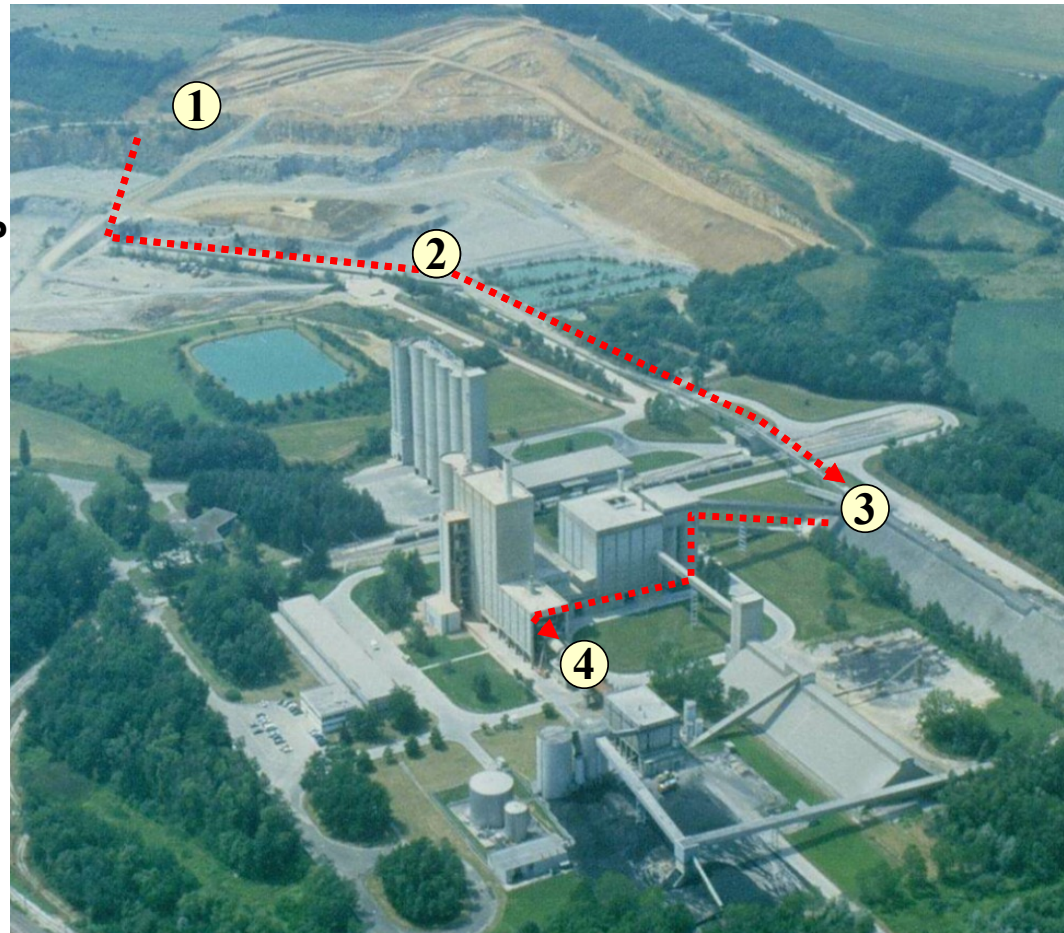
## 2.2. Formation du cru

---

1- Extraction

2- Transport MP

4- Four

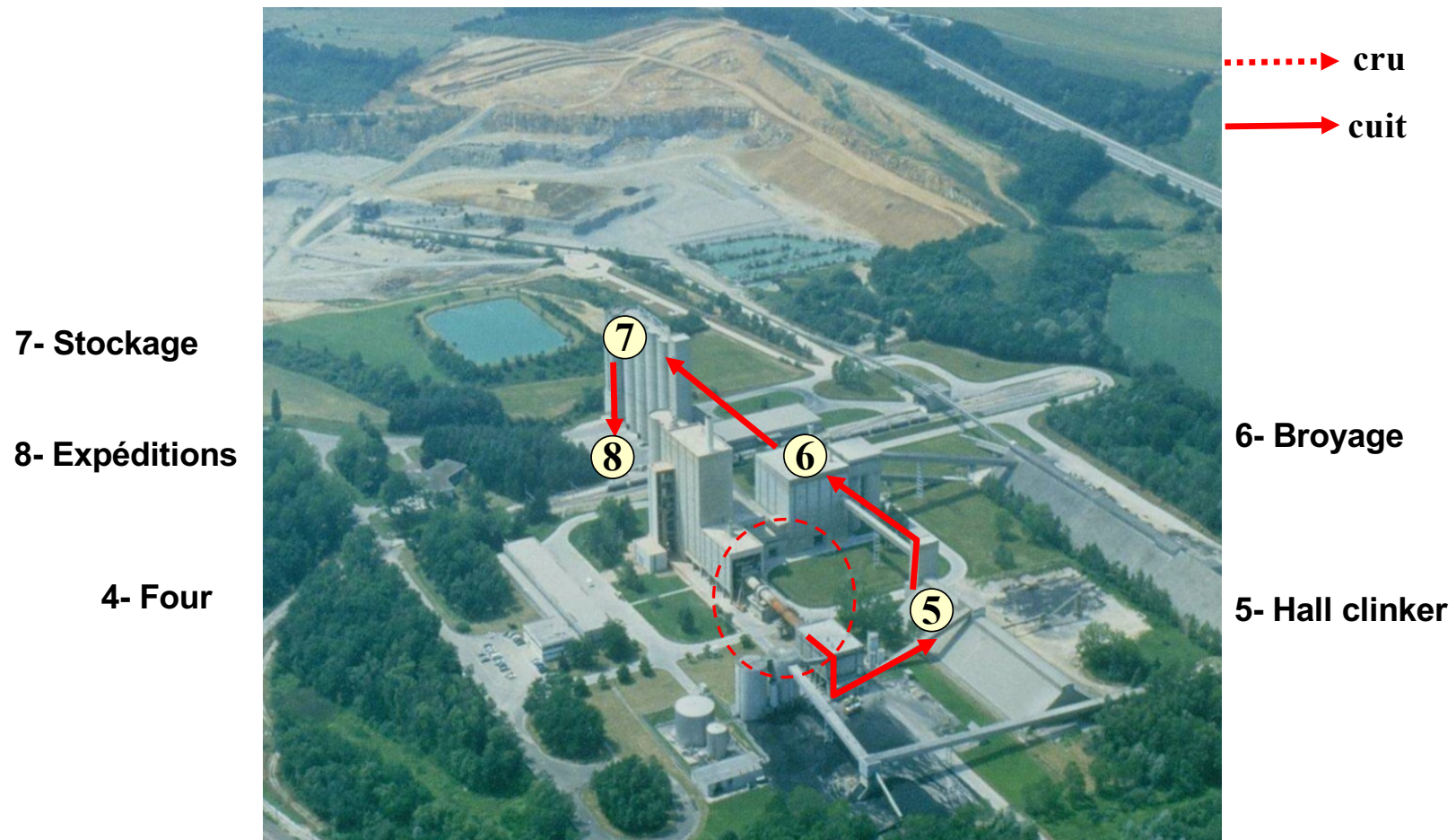


.....> cru

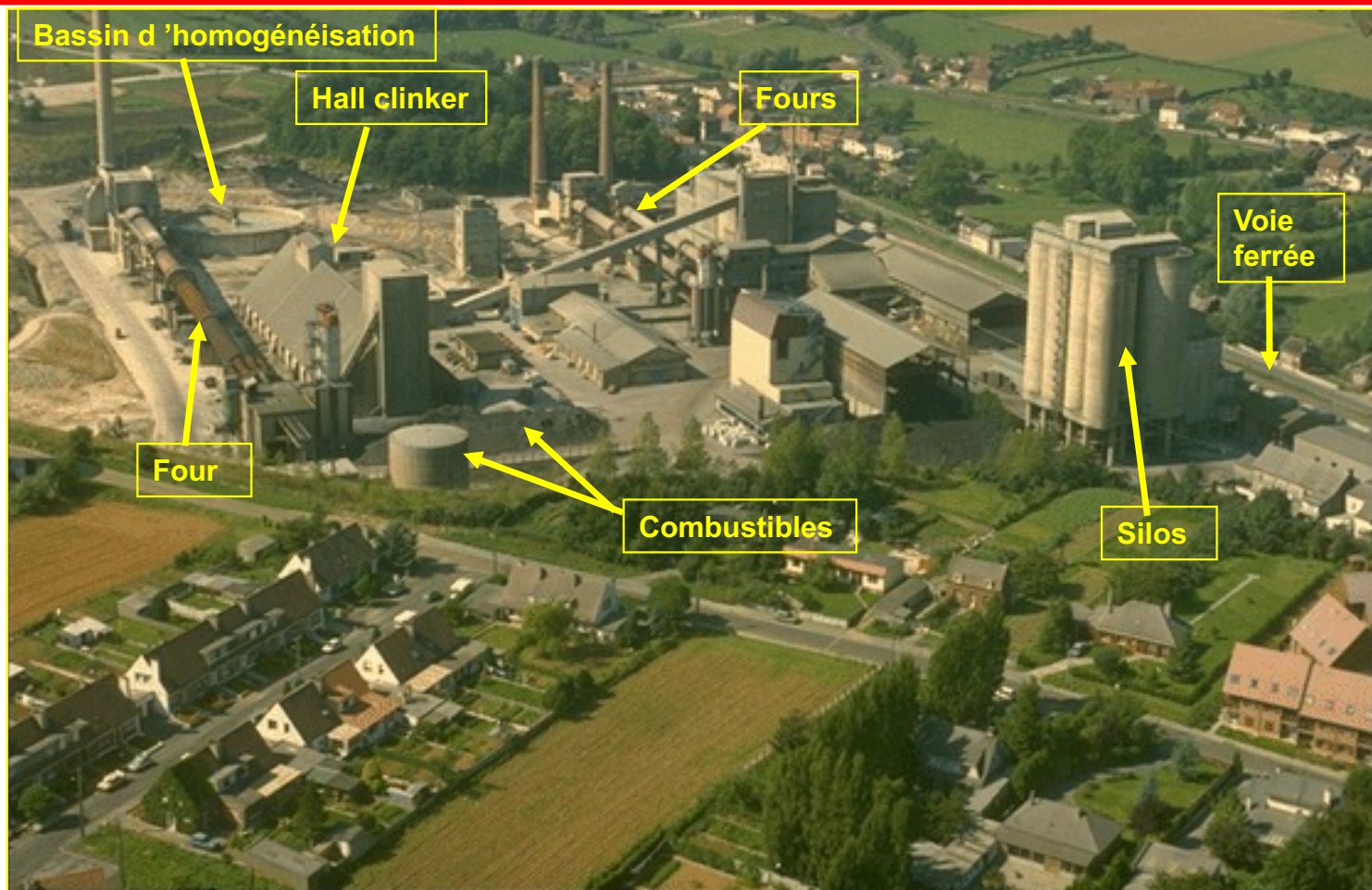
3-Préhomogénéisation



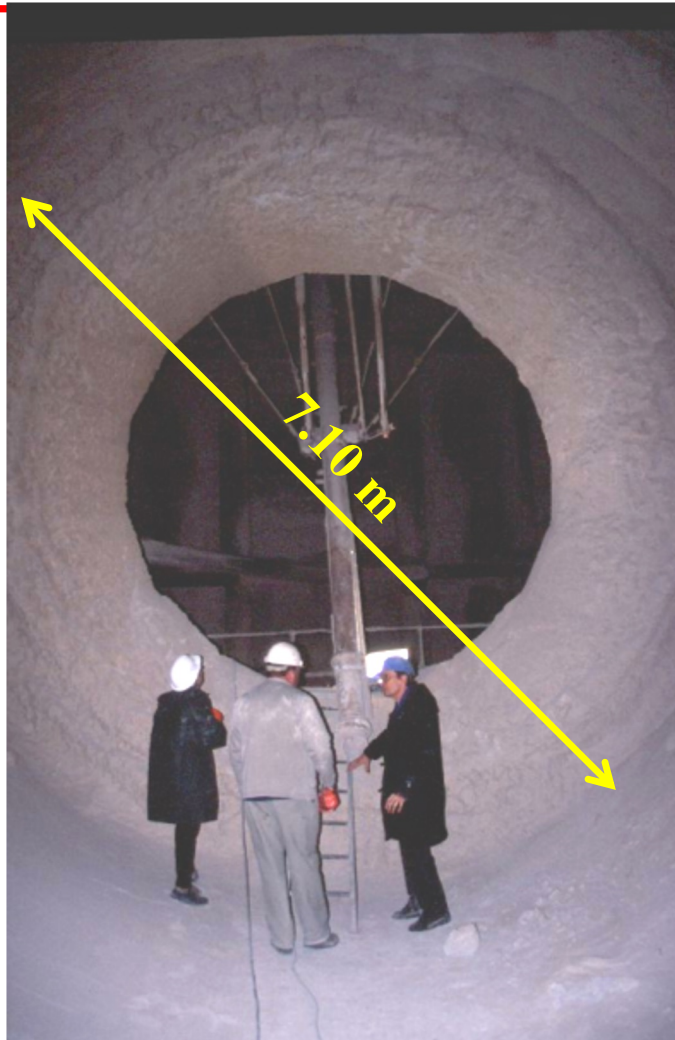
## 2.3. Formation du clinker: four















## 2.3. Formation du clinker: four



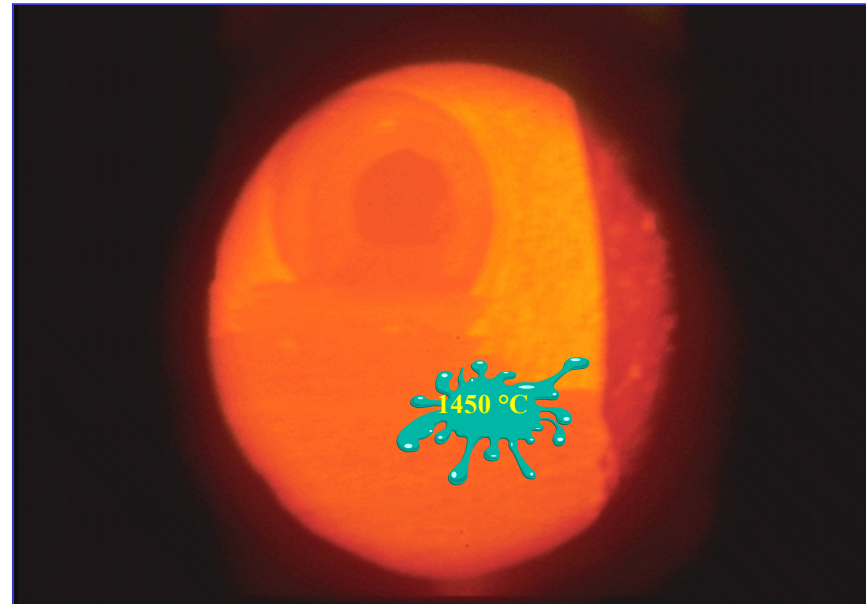
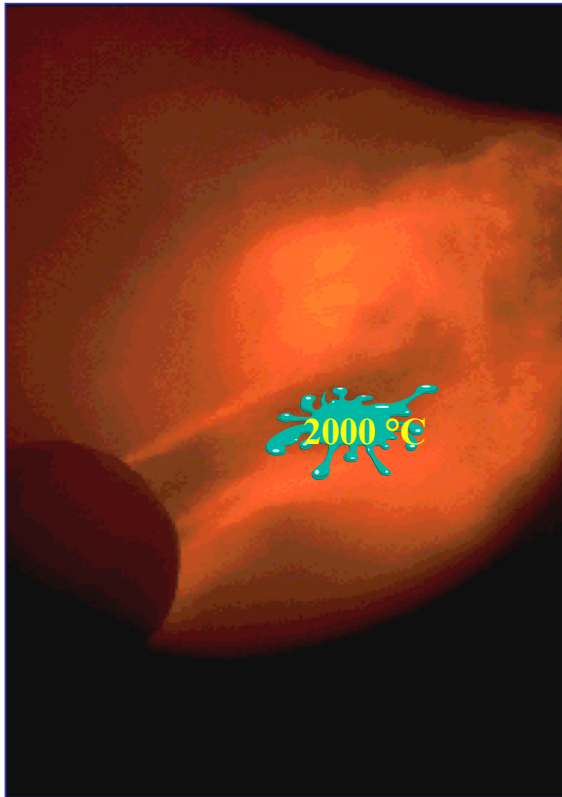
**Tourne 24/24h !**

### **Données du Four d'Eclepens**

- Capacité: 2'300 t/j
- Longueur: 65m
- Diamètre: 4.35m
- 2.8 revs/ min.

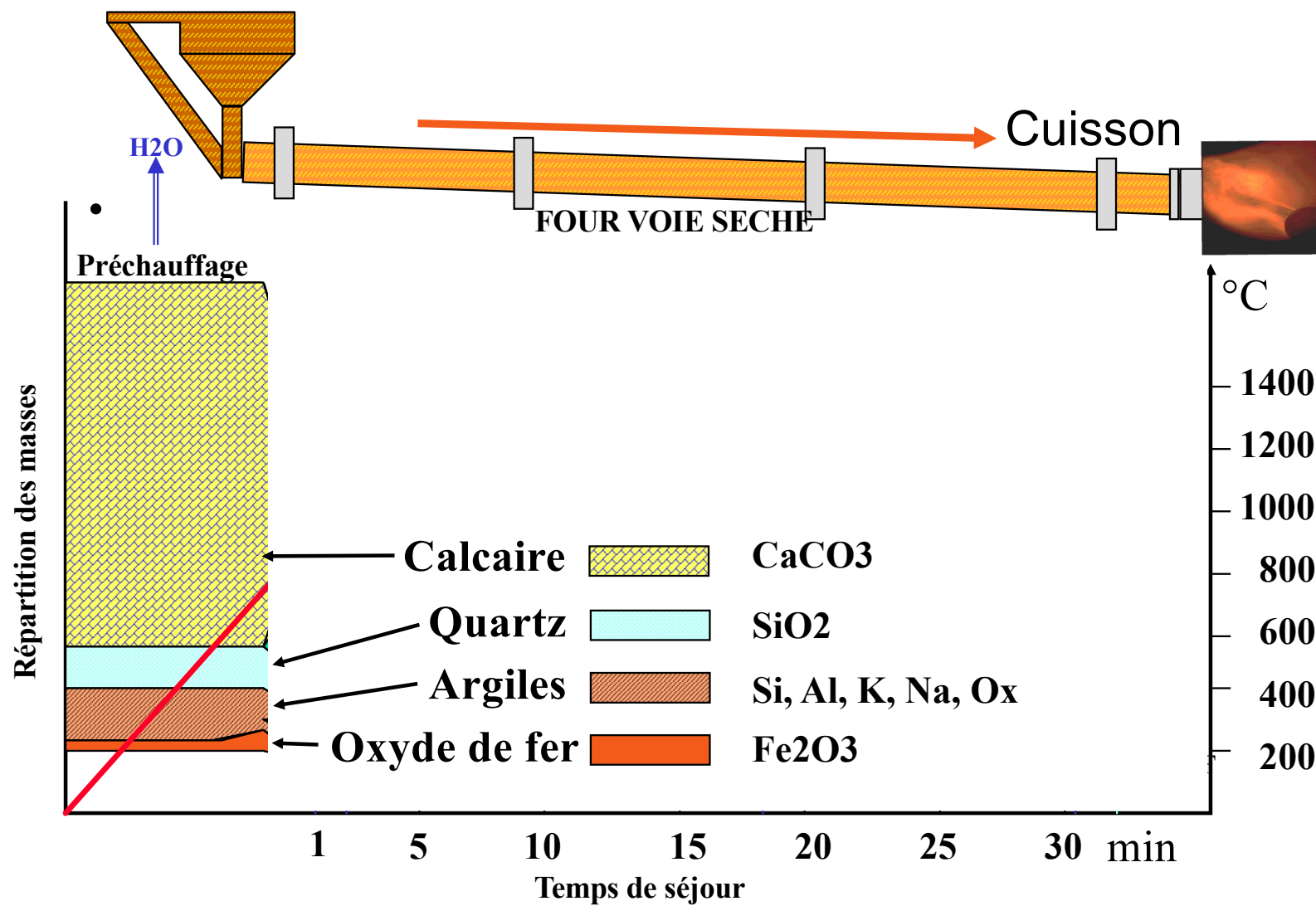
## 2.3. Formation du clinker: cuisson

---

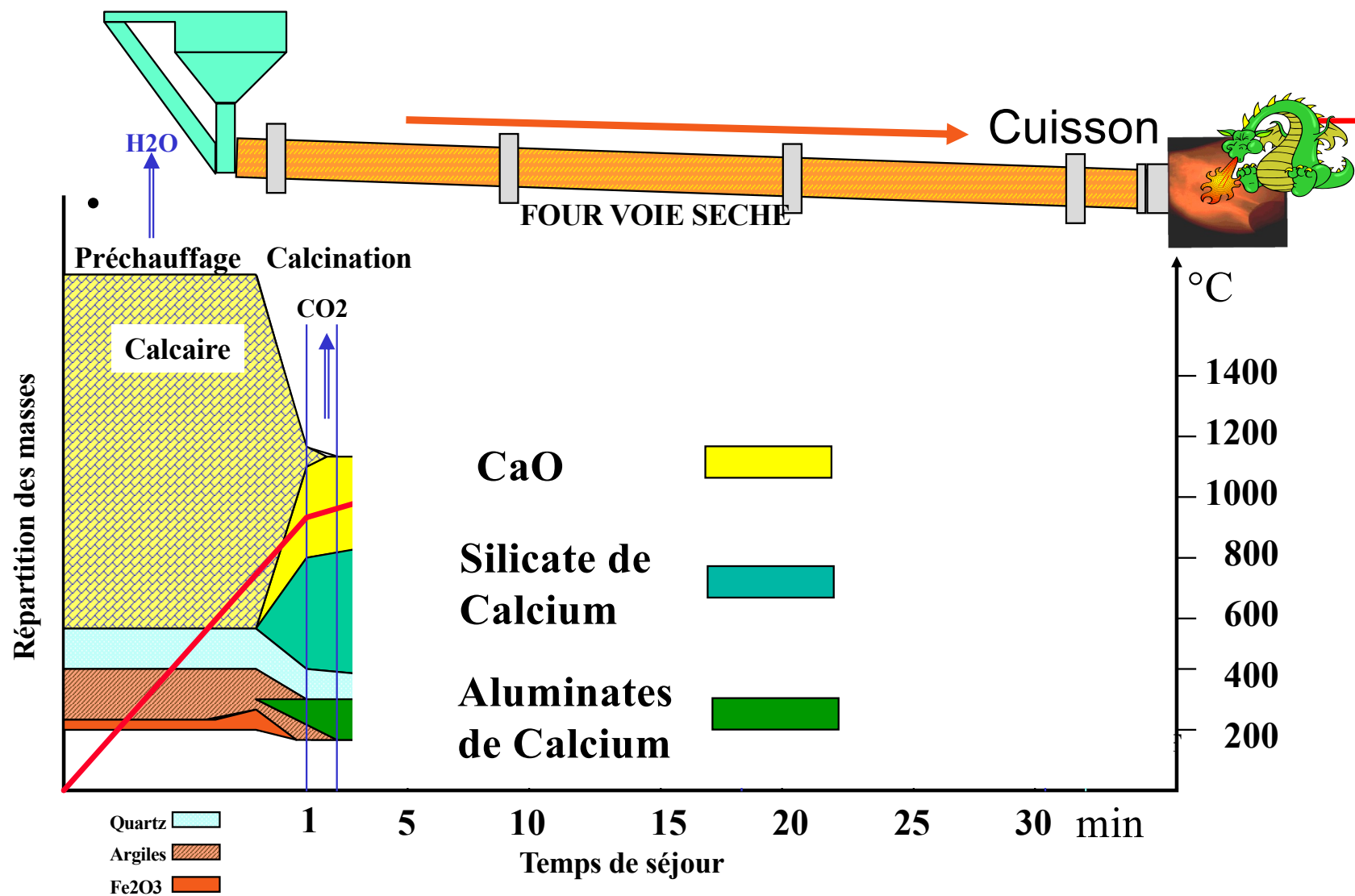


**Flamme = 2'000 °C**

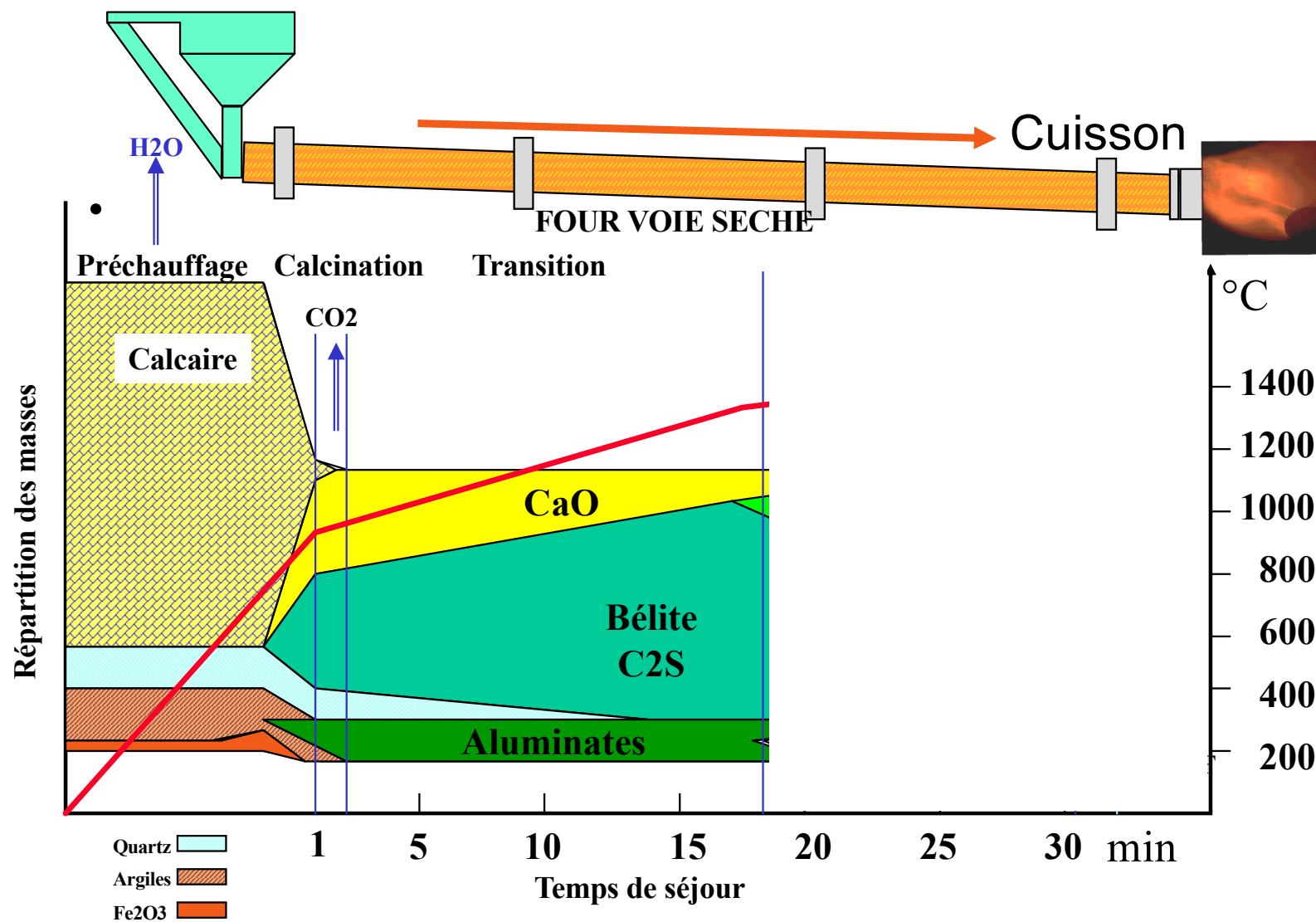
**Matériau = 1'450°C**

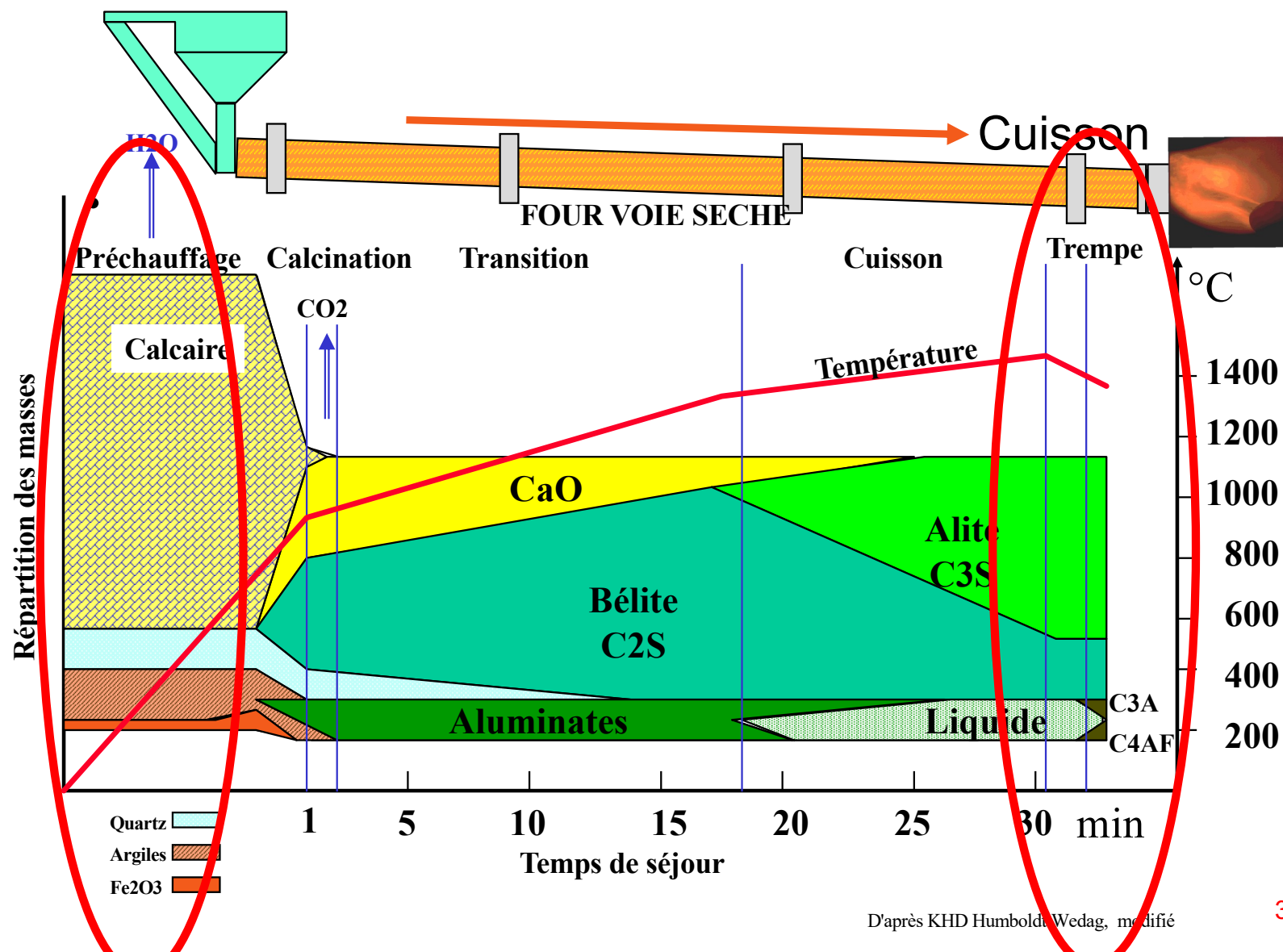






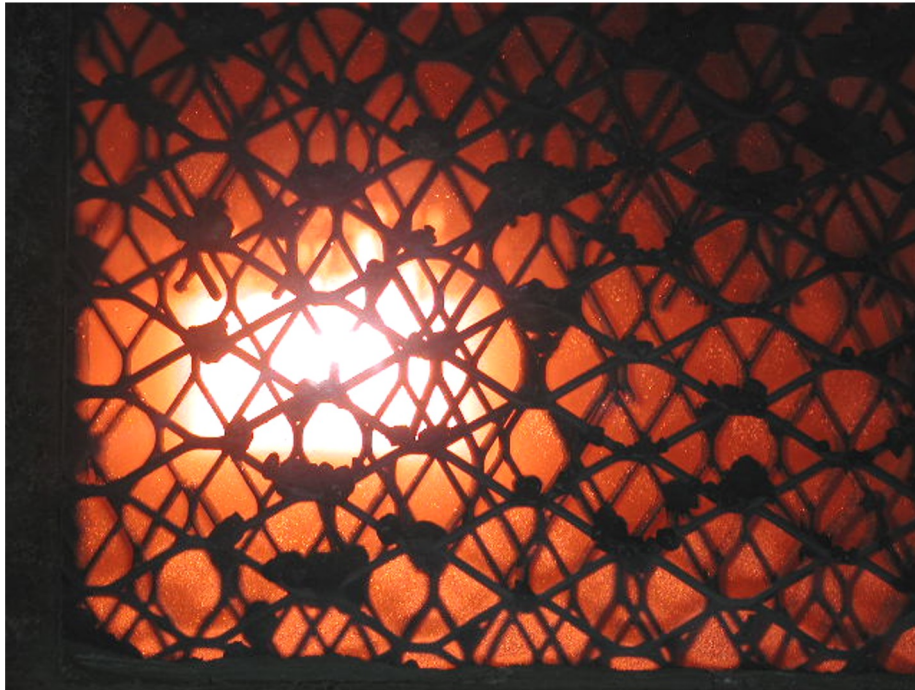






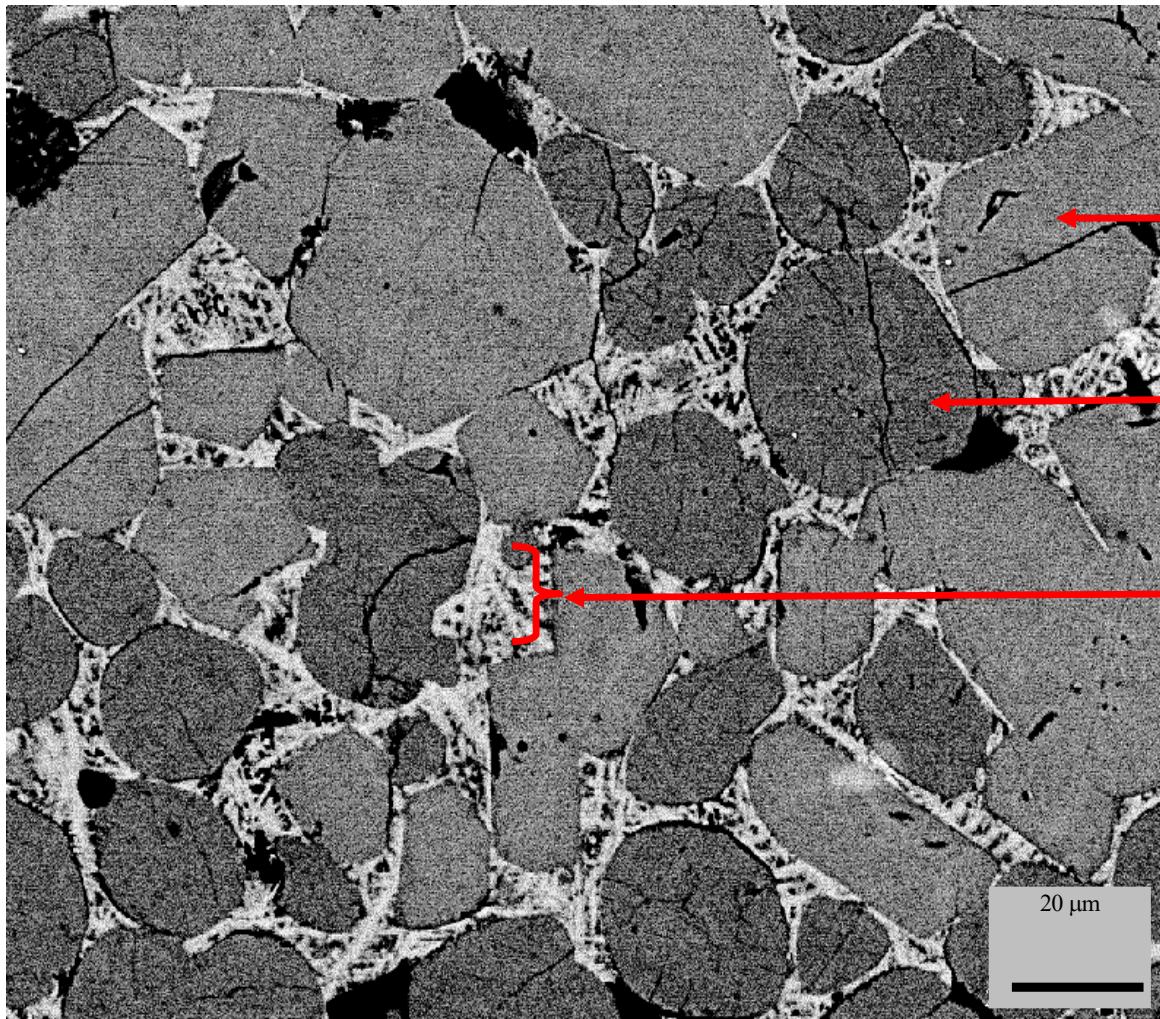
## 2.3. Formation du clinker: la trempe

---





# Microstructure « idéale » du clinker



« alite »  
 $C_3S$ , impure

« belite »  
 $C_2S$ , impure

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

### 3. Contrôle Qualité

Salle de contrôle: composition du cru, clinker, ciment, finesse, resistance





### 3. Controle Qualite

---



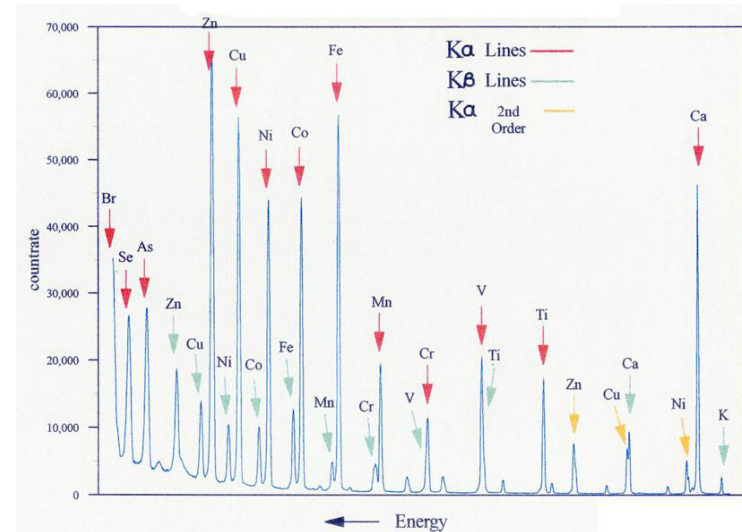
### 3. Contrôle de la composition du ciment



Techniques: XRF, FRX  
Florescence des rayons X

Plus en plus: XRD  
Diffraction de rayons X

Echantillonnage automatique



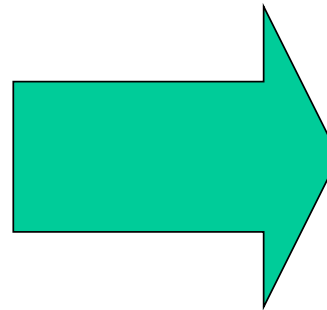
### 3. Contrôle de la composition du ciment

---

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>C4AF</b>	<b>?</b>

☀ Contrôle strict pour éviter le gonflement



### 3. Contrôle de la composition du ciment

---

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  $\text{C}_2\text{S}$

Technique: Calcul  
« Bogue »

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

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

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

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

### 3. Contrôle de la composition du ciment

---

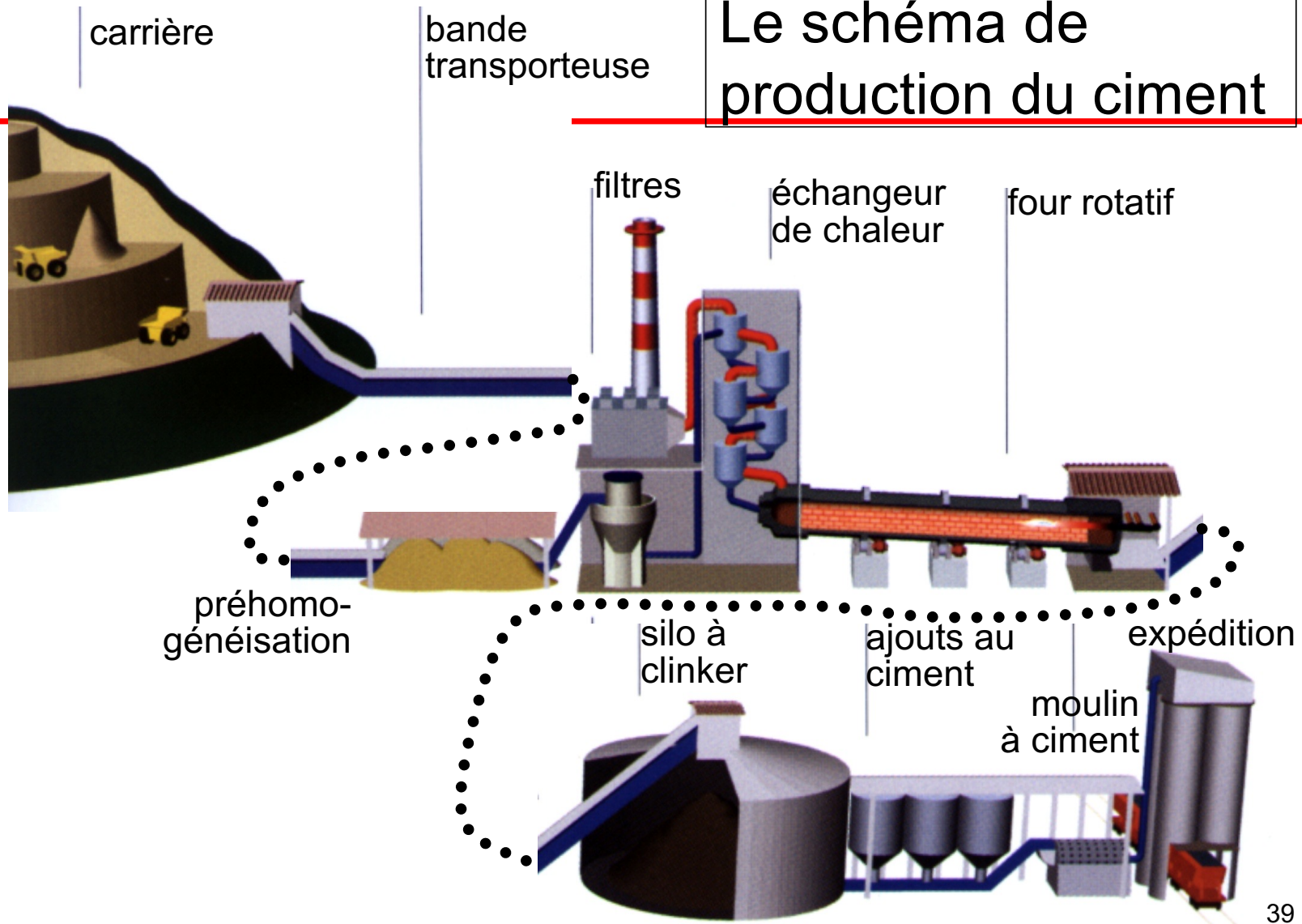
À cause des solutions solides

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

	BOGUE	QXDA
$C_3S$	59	67
$C_2S$	13	15
$C_3A$	9	5
« $C_4AF$ »	9	6

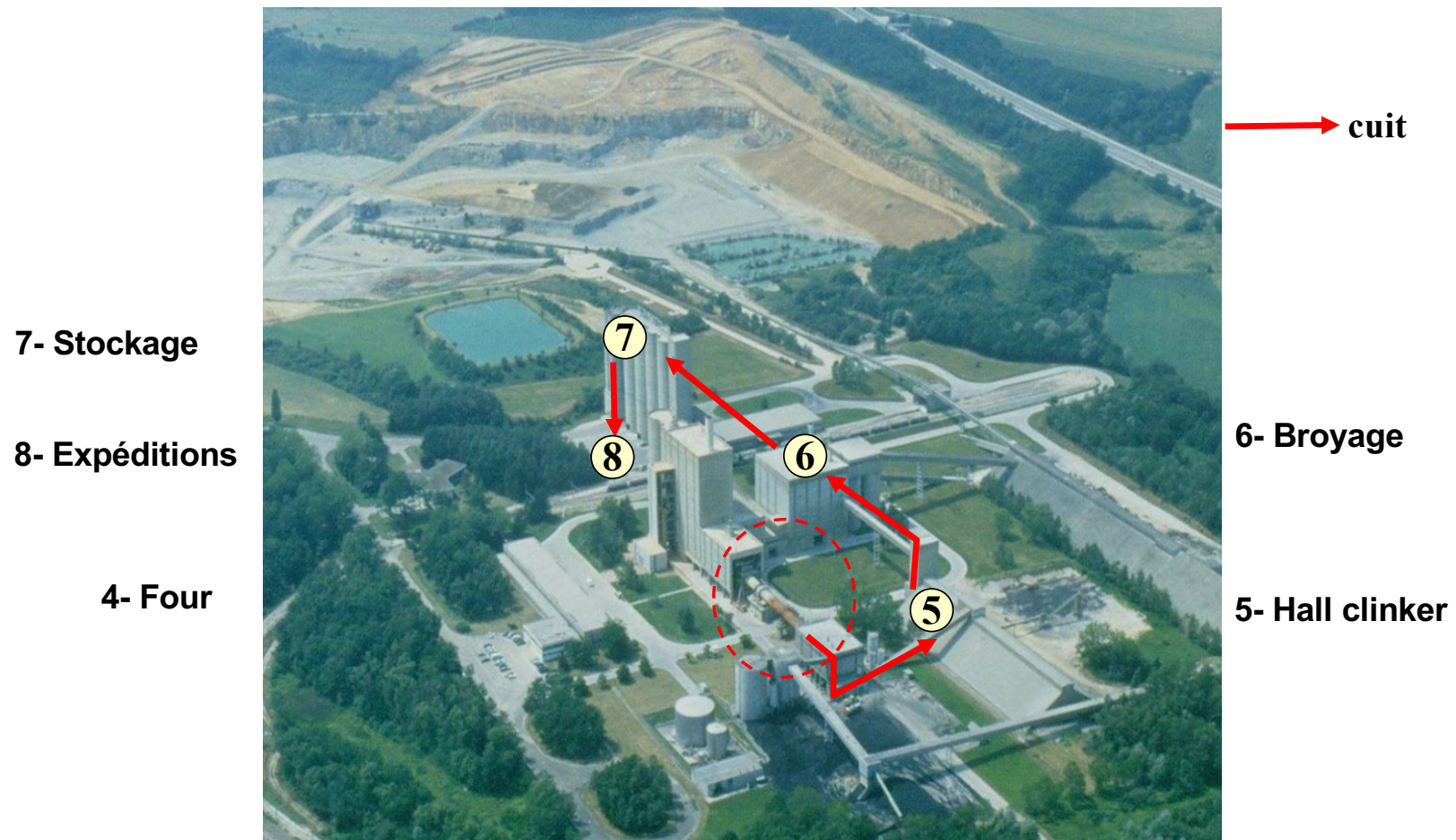
Écarts typiques

# Le schéma de production du ciment



## 2.3. Formation du clinker: broyage

---





## 2.4. Manufacture du ciment

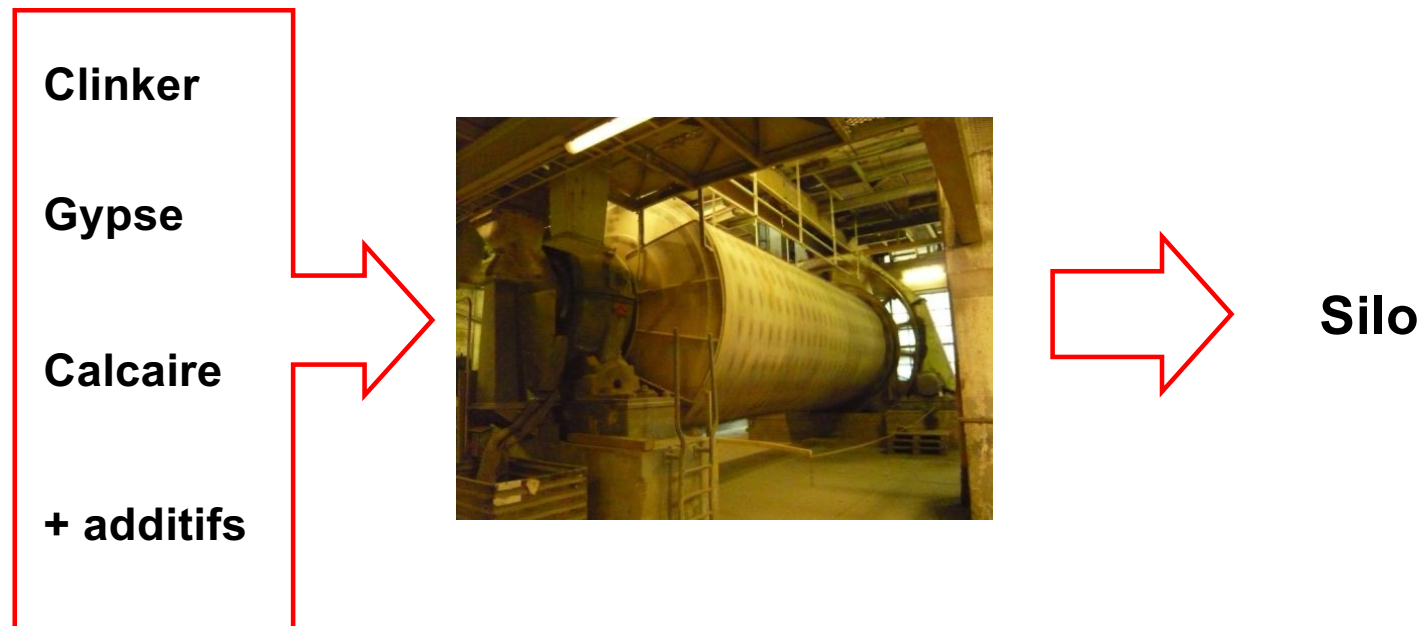
---



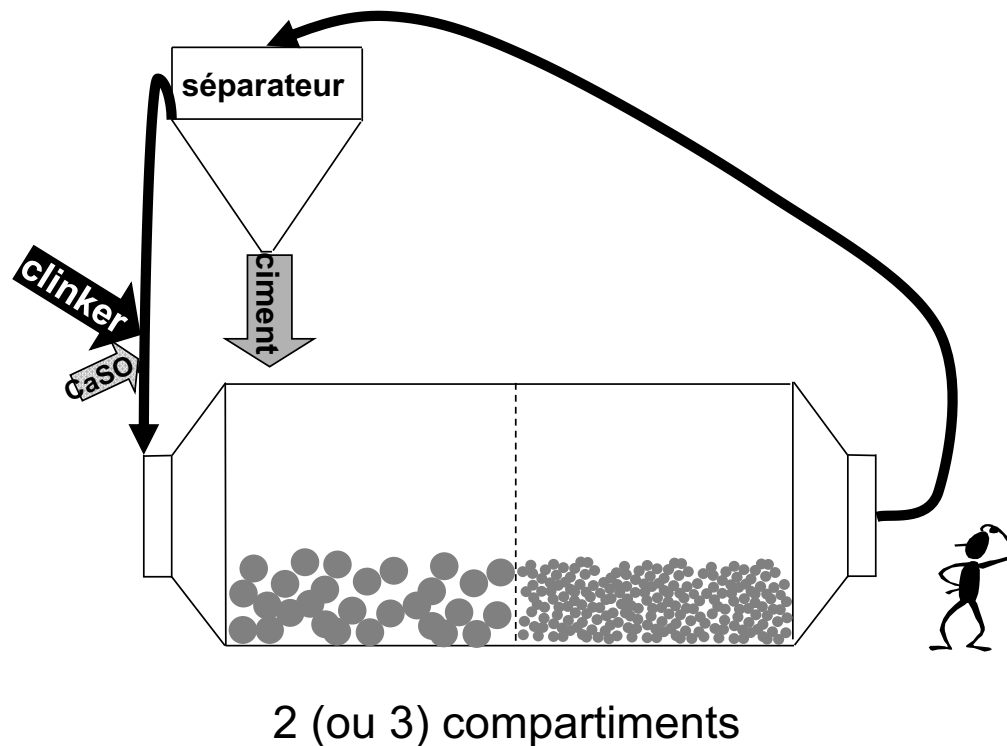
Clinker + Régulateur de prise + Autres constituants (éventuellement)

## 2.4. Manufacture du ciment: broyage du clinker et autres ajouts

---



## 2.4. Manufacture du ciment: broyage du clinker et autres ajouts



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

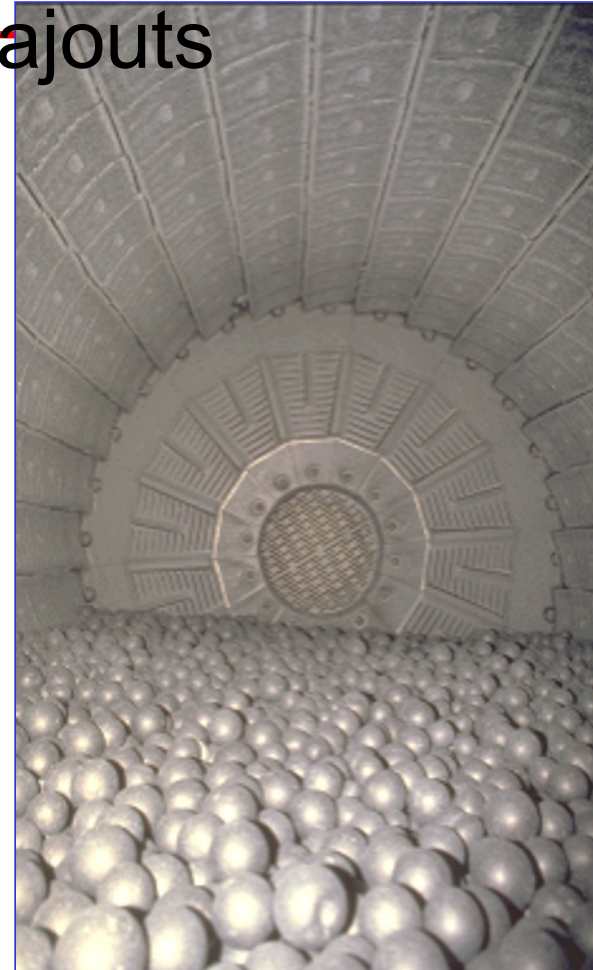
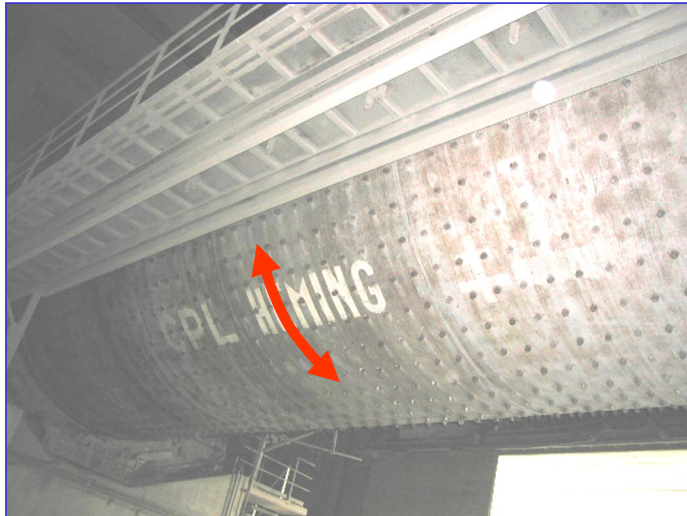
- gypse ( $x=2$ )
- anhydrite ( $x=0$ )

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)

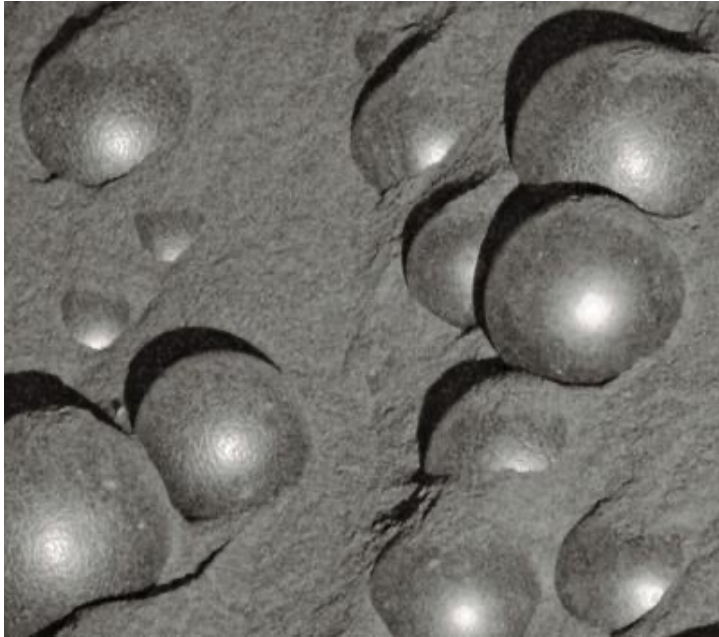
## 2.4. Manufacture du ciment: broyage du clinker et autres ajouts





## 2.4. Manufacture du ciment: broyage du clinker et autres ajouts

---

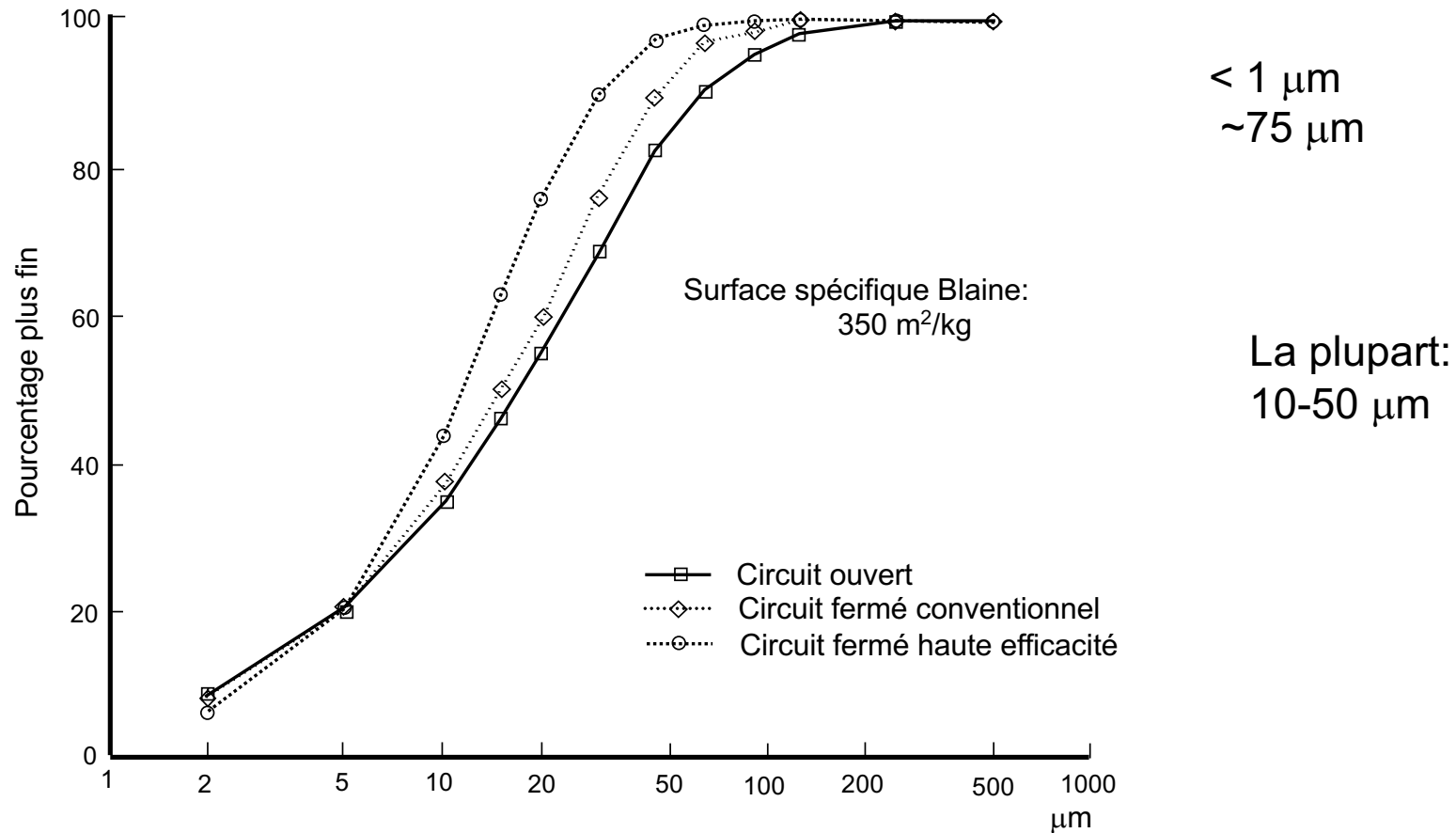


Agents de broyage



Pas d'agents de broyage

## 2.4. Manufacture du ciment: granulométrie



Source: Bye « Portland Cement », Thomas Telford 1999

## 2.4. Manufacture du ciment: broyage du clinker et autres ajouts

---

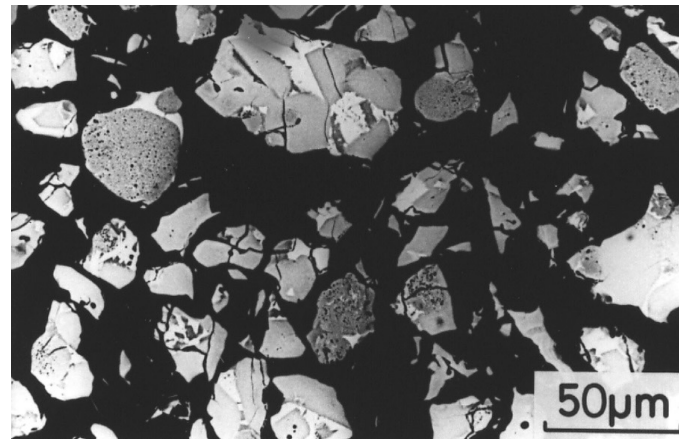
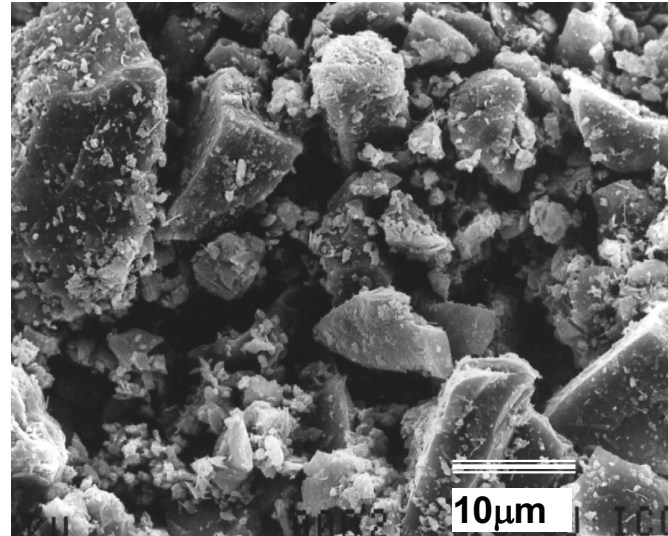
Contrôle par surface spécifique « Blaine »  
Perméabilité à l'air

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

## 2.4. Manufacture du ciment

---

Grains de ciment





## 2.5. Livraisons

Sac  
~<10%



Big bag  
~2-3%



Vrac  
~80-90%



# 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

# 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>III / B</b> <b>III / C</b>	<b>35-64</b> <b>20-34</b> <b>5-19</b>	36-65 66-80 81-95	0-5 0-5 0-5
<b>IV</b>	Ciment pouzzolaniqu e	<b>IV / A</b> <b>IV / B</b>	<b>65-89</b> <b>45-64</b>	11-35 36-55	0-5 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

## 2.5. Livraisons: Lire un sac de ciment

---



Nom du  
producteur



## 2.5. Livraisons: Lire un sac de ciment

---



Nom du  
producteur

Type et Resistance a 28  
jours

Norme  
EN pour l'Europe  
ASTM pour les USA

## 2.5. Livraisons: Lire un sac de ciment

---



Nom du  
producteur

Type et Resistance a 28  
jours

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

**Tableau 2 - Exigences mécaniques et physiques définies en termes de valeurs caractéristiques**

Classe de résistance	Résistance à la compression				Temps de début de prise	Stabilité (expansion)
	MPa					
	Résistance à court terme		Résistance courante			
	2 jours	7 jours	28 jours		min	mm
32,5 N	-	≥ 16,0				≤ 10
32,5 R	≥ 10,0	-	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	
42,5 N	≥ 10,0	-				
42,5 R	≥ 20,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
52,5 N	≥ 20,0	-				
52,5 R	≥ 30,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45	

- **N**: Classe de résistance à court terme ordinaire
- **R**: Classe de résistance à court terme élevée

### 3. Contrôle de la résistance

---

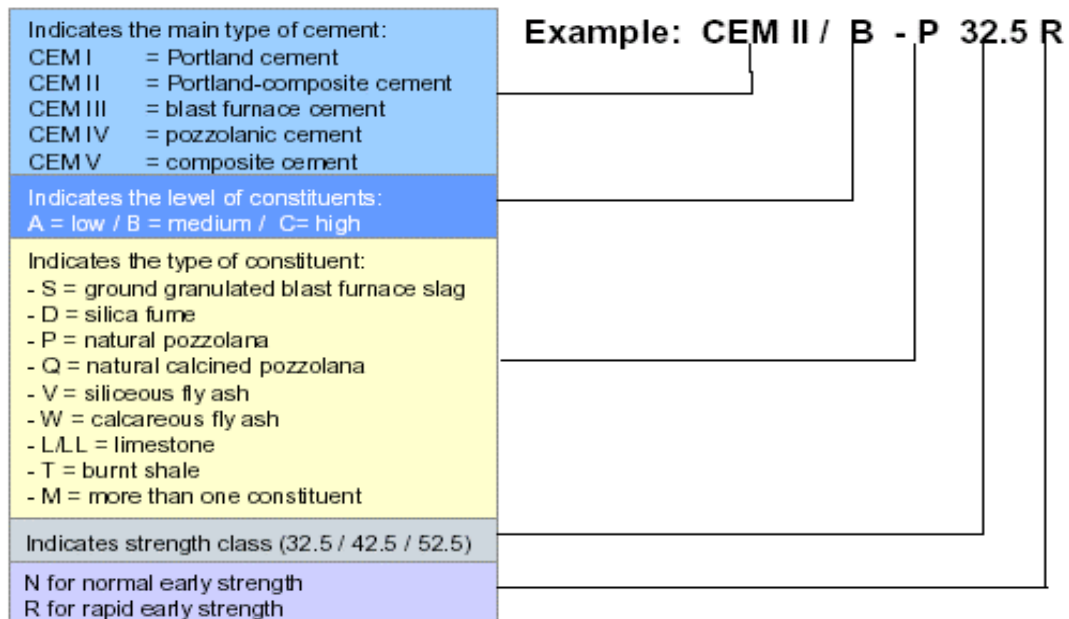


1 jour, 28 jours



# 1 Melanges fait en usine

---



## Classification des principaux types de ciments selon ENV 197

---

**CEM I** : Ciment Portland

**CEM II** : Ciment Portland composé

**CEM III** : Ciment de haut fourneau

**CEM IV** : Ciment pouzzolanique

**CEM V** : Ciment composé

Constituants principaux et secondaires:

- **K**: Clinker
- **S**: Laitier
- **D**: Fumée de silice
- **P ou Q**: Pouzzolanes
- **V ou W**: cendres volantes
- **T**: Schistes calcinées
- **L ou LL**: Calcaire

la teneur totale en carbone organique (TOC)

LL : inférieure à 0,20 % en masse.

De plus:

L : inférieure à 0,50 % en masse.

- **M (X-Y)**: ciment composés

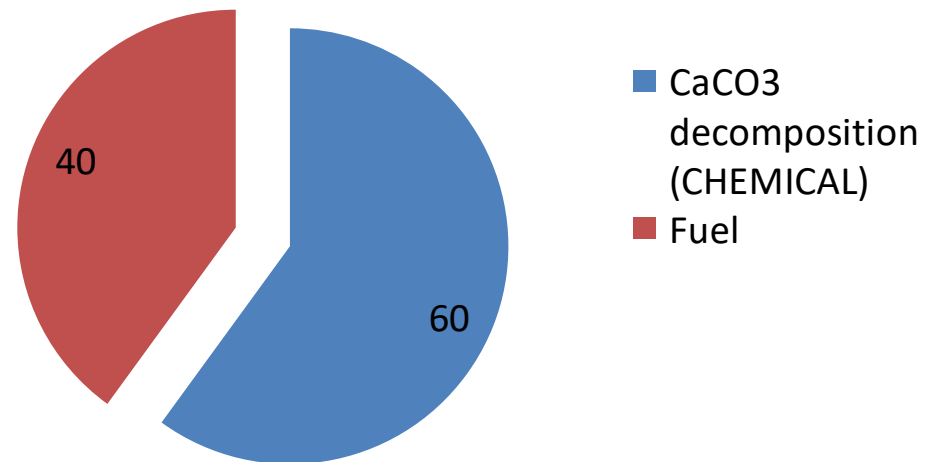
- **SR**: ciments à résistance élevée aux sulfates: extension  
(CEM I et CEM III/B)

Ou si ce n'est que valable en Suisse: « -HS-CH » (CEM II/B-M(S-T)) 58

## 5. Impact sur l'environnement : CO<sub>2</sub>



**1 tonne of cement leads to the emission of 650 – 900 kg CO<sub>2</sub>**



The production process is highly optimised it is estimated that < 2% further savings can be made here

Use of waste fuels, which can be > 80% reduces the demand for fossil fuels

## 5. Impact de la production sur l'environnement

---

► Filtre a Poussiere



<20 mg/Nm<sup>3</sup>

► DeSO<sub>x</sub>



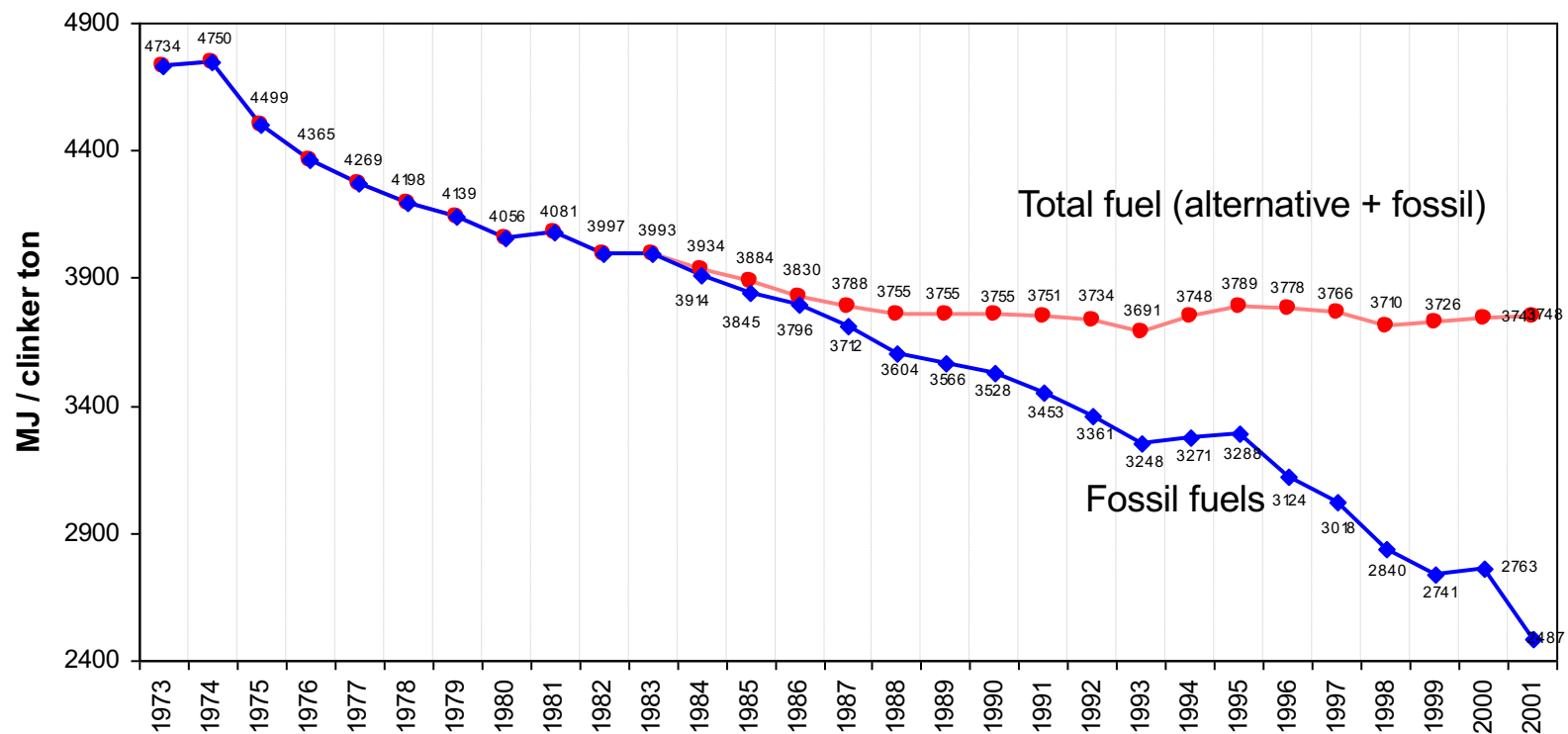
< 500 mg/Nm<sup>3</sup>

► AFR hall



## 5. Impact sur l'environnement : combustible

Evolution of the use of alternative fuels (France)



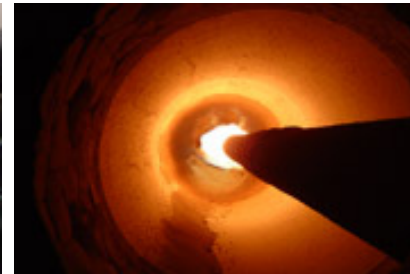
Source ATILH



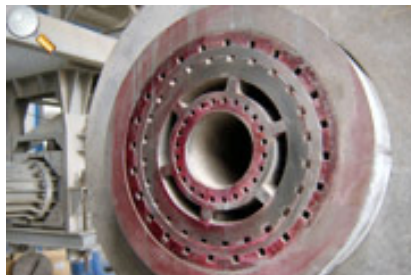
## 5. Impact sur l'environnement : combustible

### Calorific value

Heavy fuel oil	40 000 MJ/t	Animal fat	39 000 MJ/t
Petroleum coke	33 000	Waste oils	35 000
		tyres	27 000
		Polymers	23 000
		Animal meal	18 500
		Wood and paper wastes	16 000



A burner for petcoke, solid wastes (two channels), liquid wastes/heavy fuel oil (<http://www.dynamis-ma.com/>).



Burner for petcoke, solid wastes, natural gas / diesel oil lance. (<http://www.dynamis-ma.com/>)





# Alternative fuels

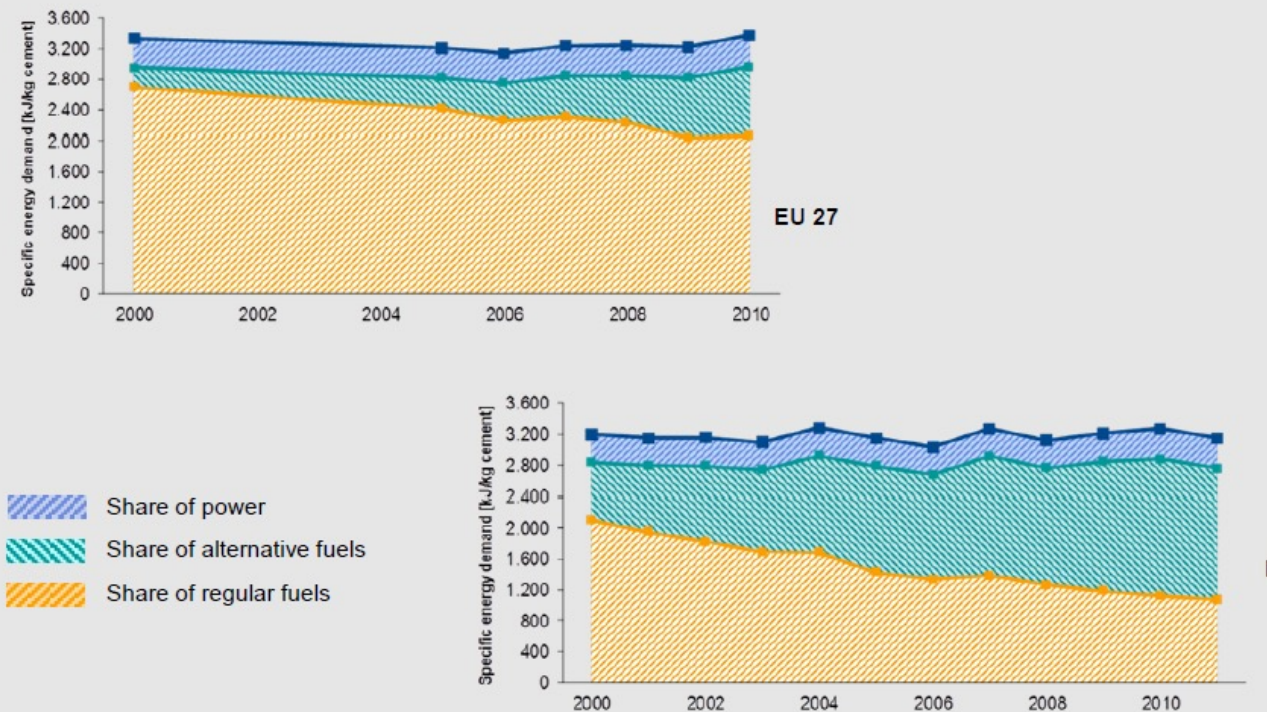
---

- Used tires
- Plastics
- Animal meal
- Sewage sludge
- RDF
- Agricultural and organic wastes (biomass)
- Packaging waste
- Paper, wood, sawdust
- Waste treatment sludge
- Solvents
- Used oils and lubricants



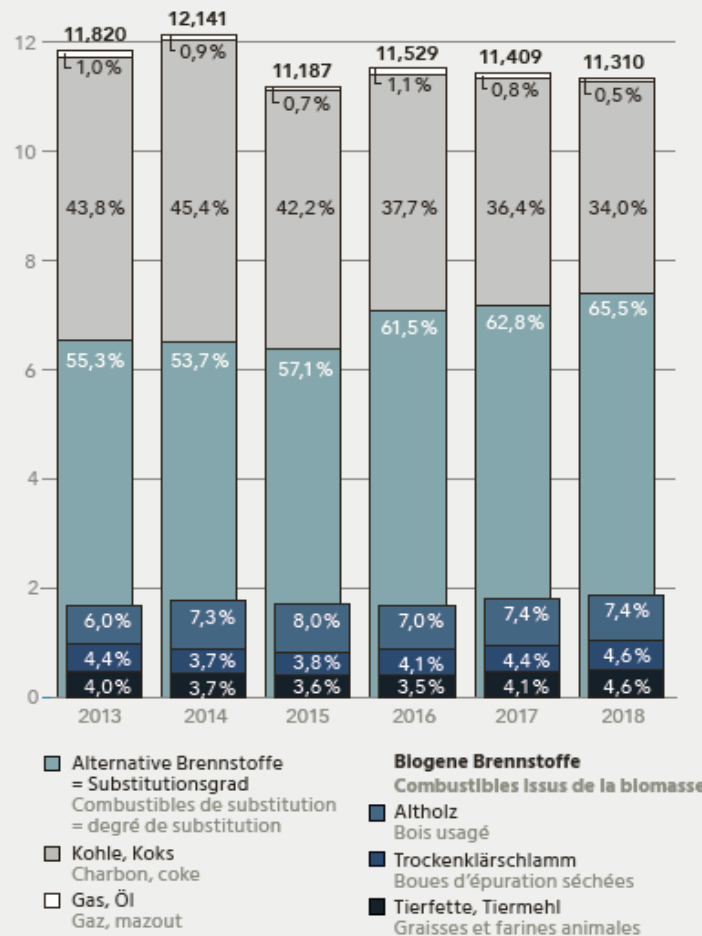
## 5. Impact sur l'environnement : combustible

**Fig.1: Development of cement related energy demand of the European (EU27) and German cement industry**

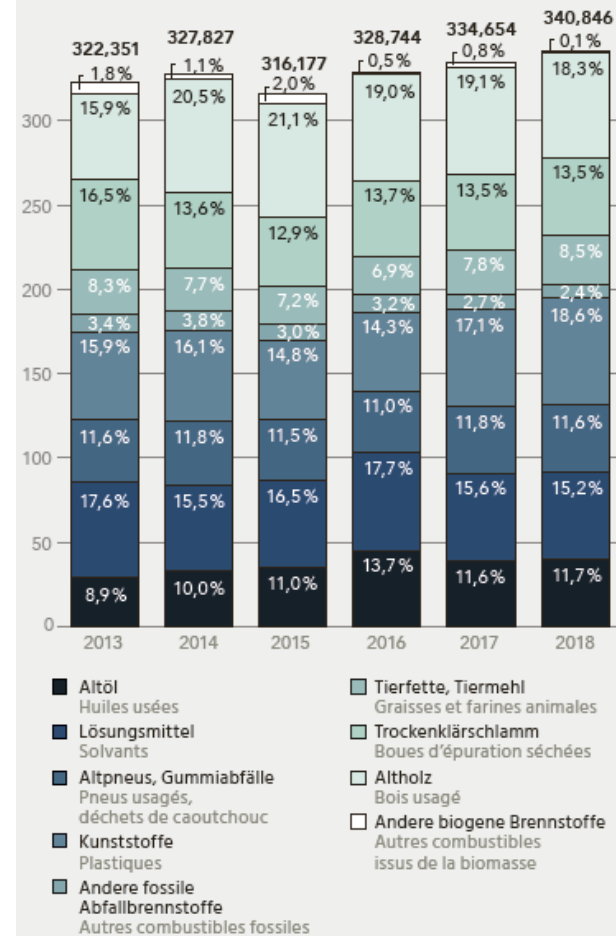


# Breakdown of fuels in Switzerland

in Petajoules  
en pétajoules



in 1000 Tonnen  
en milliers de tonnes

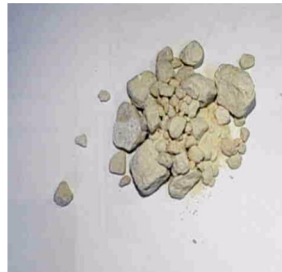




## 5. Impact sur l'environnement : eco-cement



Clinker +



Régulateur  
de prise  
(gypse)



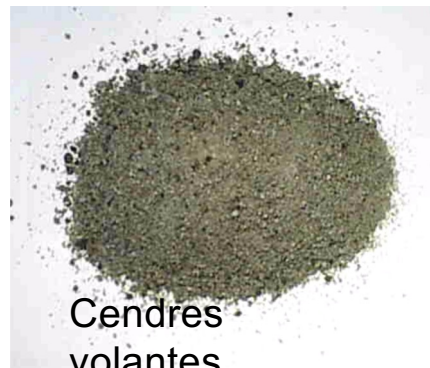
Calcaire



Laitier



Pozzolan naturel



Cendres  
volantes

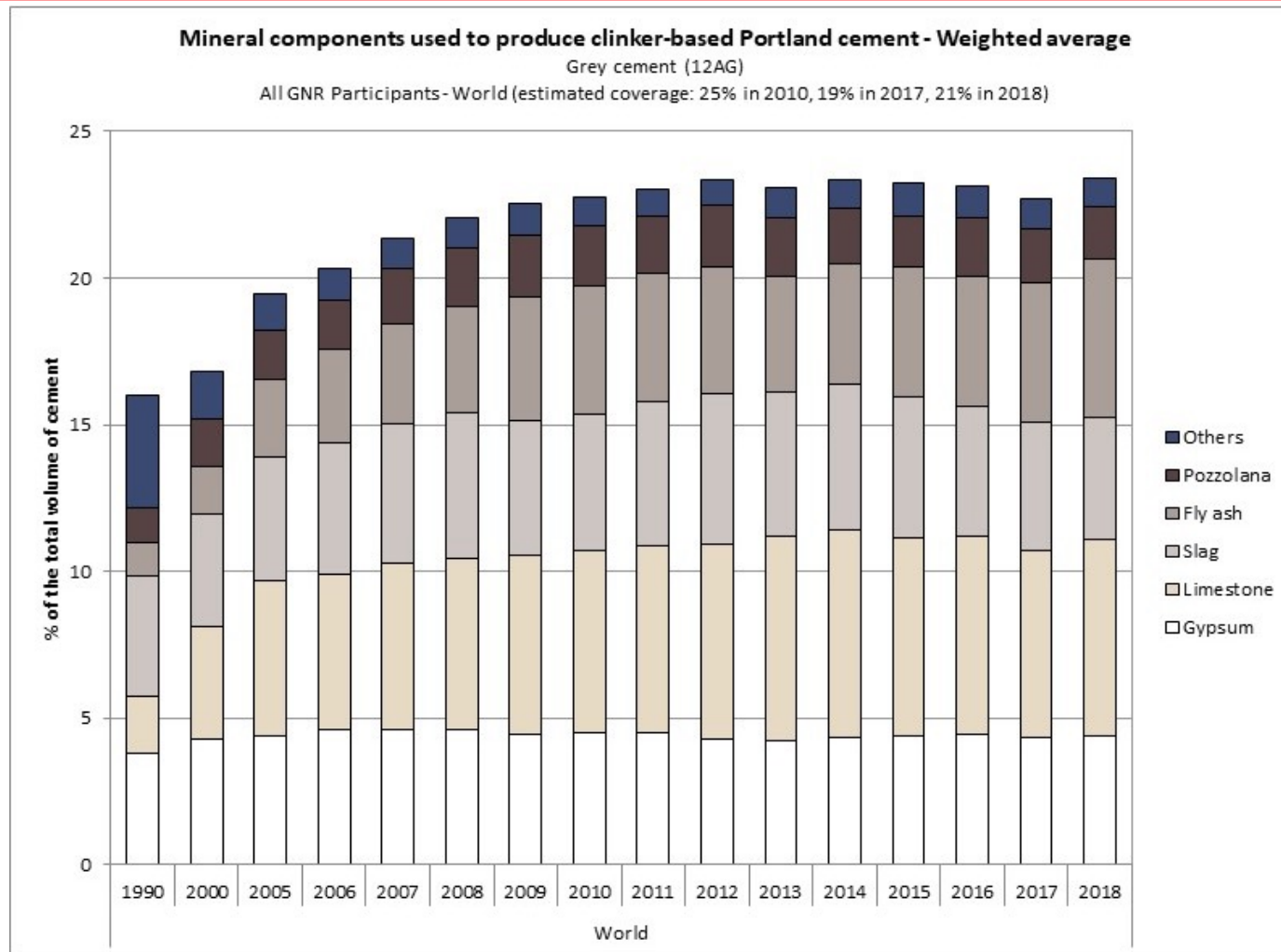


Argilles calcinée

Nouveaux constituants

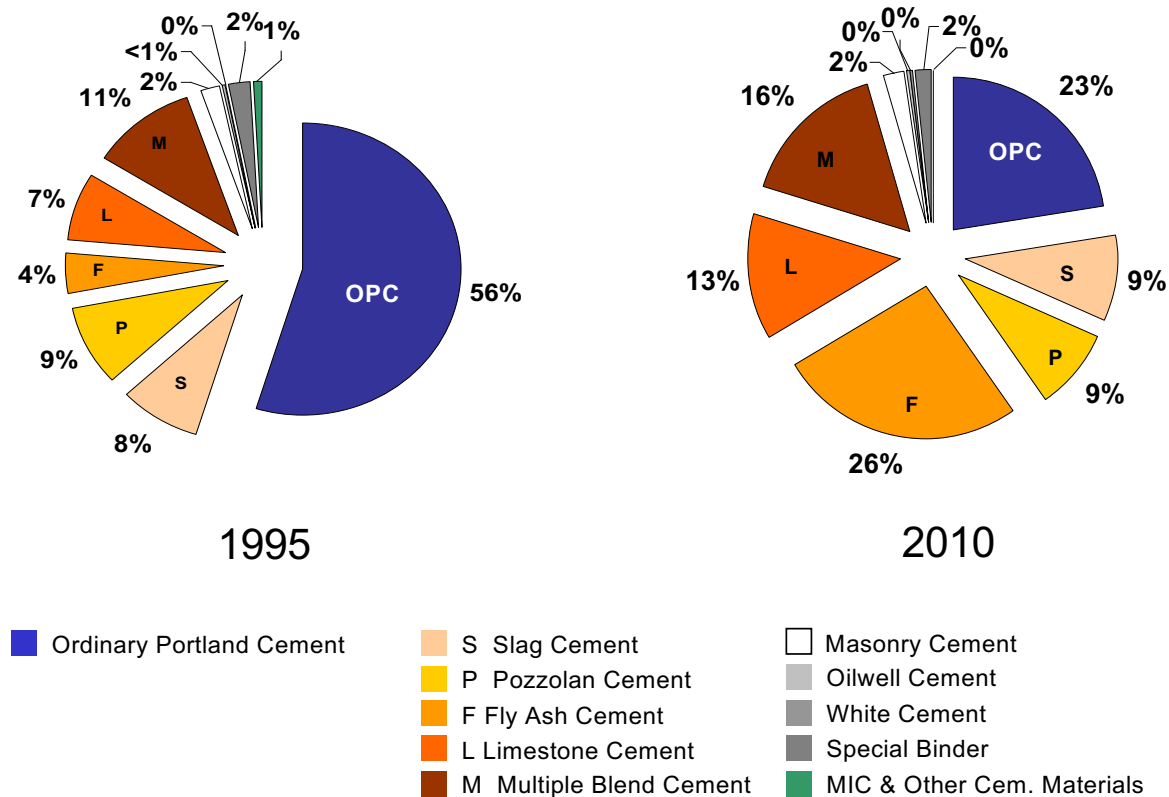
SCM: Supplementary Cementitious Materials

## 5. Impact sur l'environnement : eco-cement



## 5. Impact sur l'environnement : eco-cement

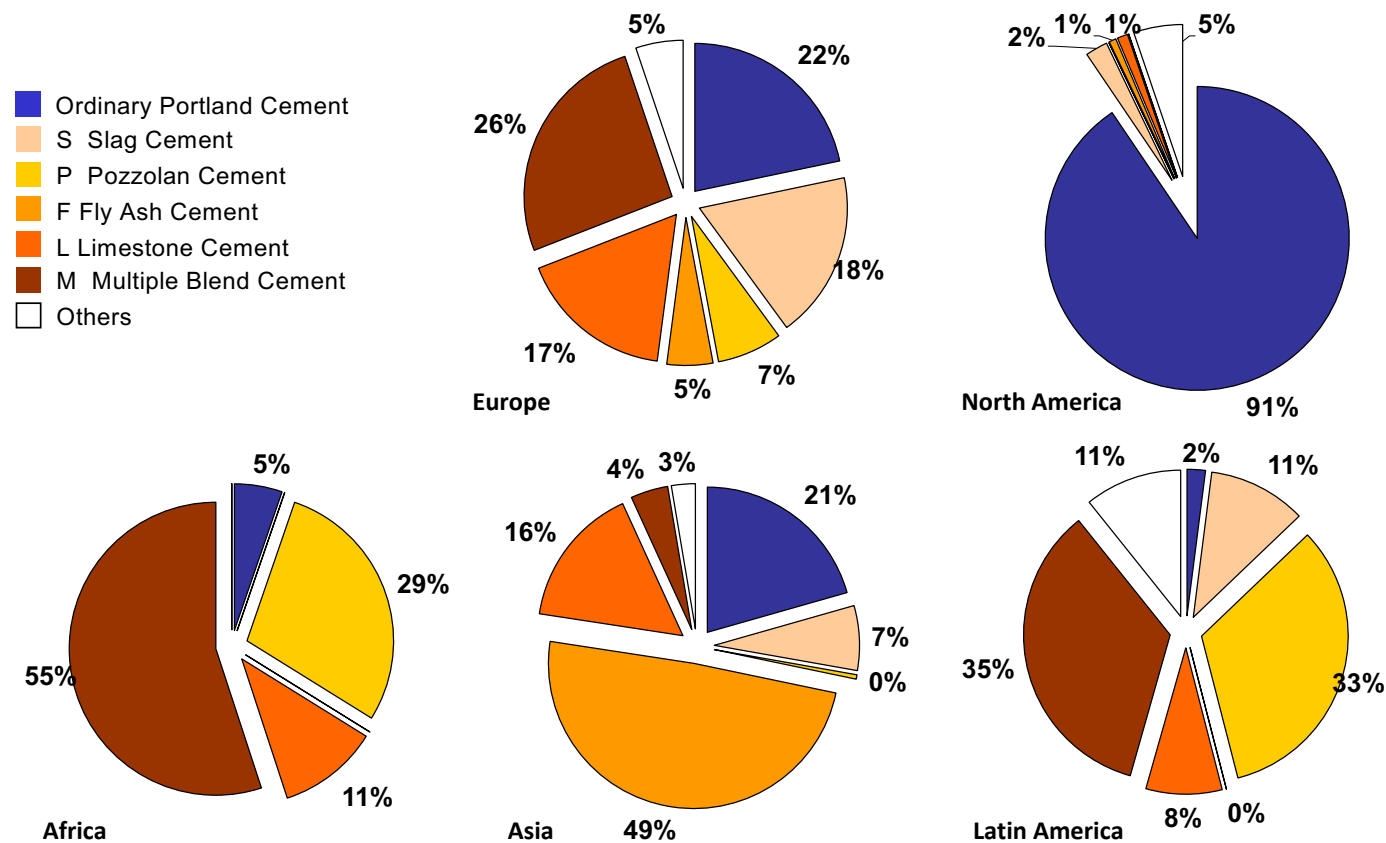
Cement types produced by Holcim 1995 - 2010



ATR data, only consolidated companies included

Source, Holcim

## Holcim cement product portfolio per region shows high geographical diversity in 2010

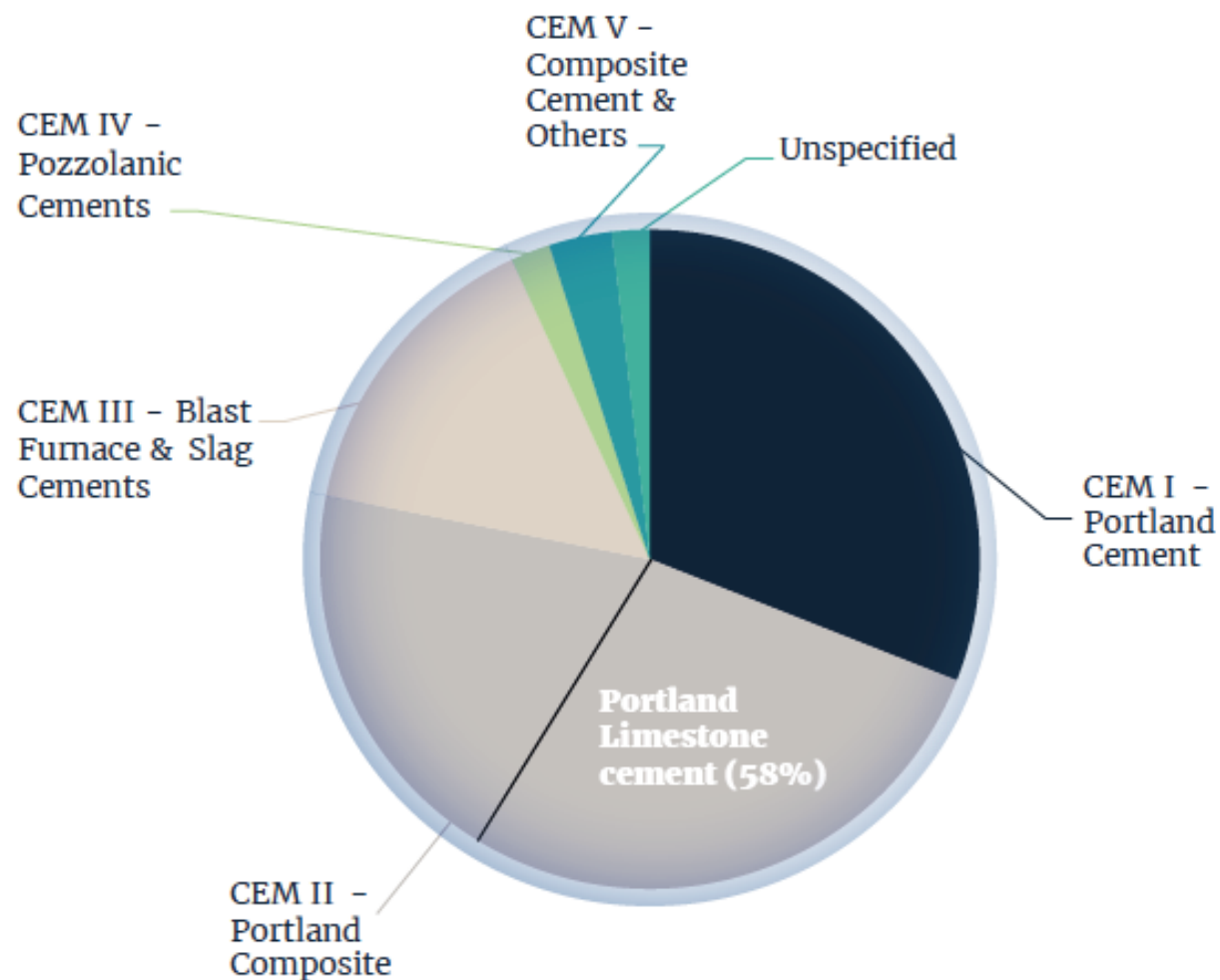


ATR data, only consolidated companies included

Source, Holcim

# Cement types in Europe 2015

---





## Portland-composite cement CEM II/C-M and Composite cement CEM VI

- a The values in the table refer to the sum of the main and minor additional constituents.
- b In case of the use of silica fume, the proportion of silica fume is limited to 6-10 % by mass.
- c In case of the use of limestone, the proportion of limestone (sum of L, LL) is limited to 6-20 % by mass.
- d The number of main constituents other than clinker is limited to two and these main constituents shall be declared by designation of the cement (for examples, see Clause 6).

# Gamme de ciments en Suisse

Type de ciment	Livraison 2018 <small>(source: cemsuisse)</small>	utilisation
CEM II / A-LL 42.5N	32%	Bâtiment standard
CEM II / B-M(T-LL) 42.5N (Optimo)	57.7%	Bâtiment standard <small>(réduction de la teneur en clinker)</small>
CEM I 42.5 N (Normo 4)	7.6%	Bâtiment standard
CEM I 52.5R (Normo 5)		Préfabriqué / hivers

<http://www.holcim.com/referenceprojects/greater-building-sustainability-with-holcim-optimo.html>



## Production

**4,151,137 tonnes**

The amount of cement produced in Switzerland in 2019.

0.1% of world production

# Susteno from 2020 (from Holcim web site)

---

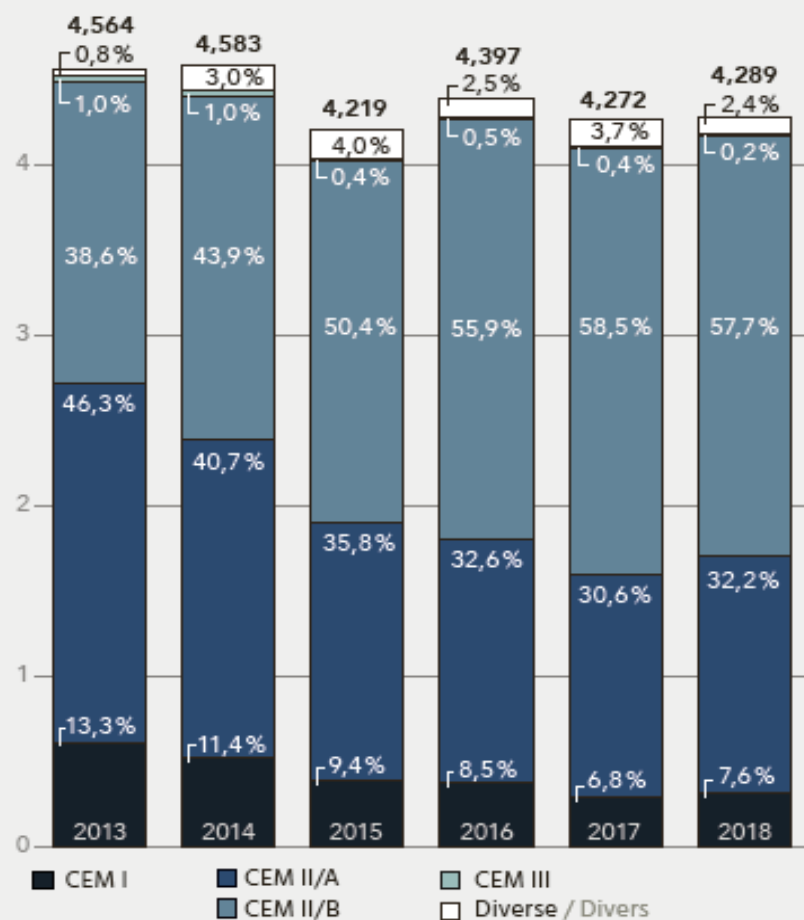
Holcim Susteno 4 est un ciment Portland composé suisse ZN/D 42,5 N certifié selon le cahier technique SIA 2049.

Il contient du clinker Portland, des graves mixtes recyclées, du schiste calciné et du gypse.

La grave mixte recyclée est la fraction fine résultant du traitement industriel des granulats non triés de démolition et qui était jusque-là souvent mise en décharge ou utilisée dans des bétons sans exigence particulière.

Further CO2 reductions of 10%

in Millionen Tonnen  
en millions de tonnes



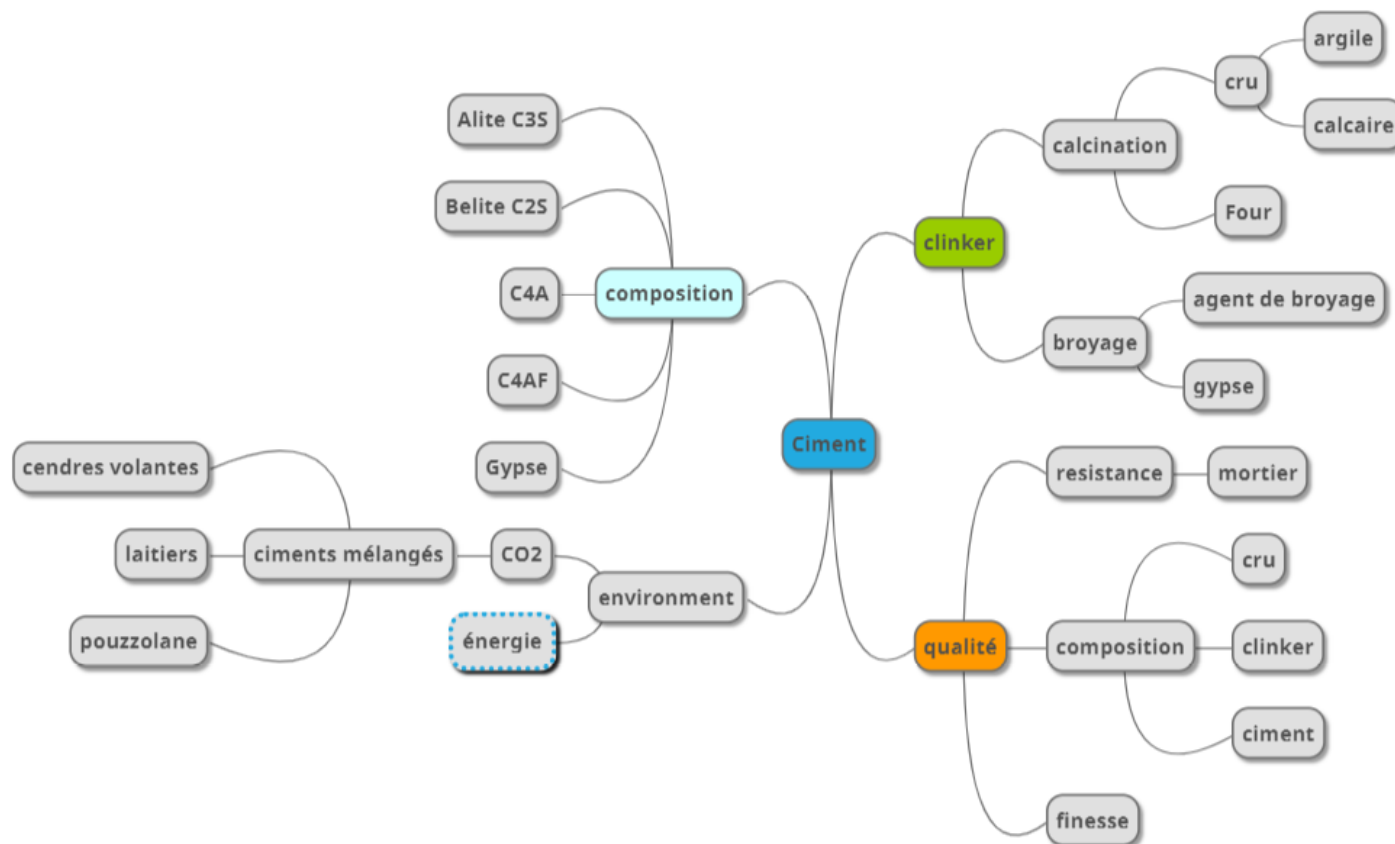
## 6. L'essentiel du cours

---

- Les notations sont différentes en science du ciment:  
 $C=CaO$ ,  $S=SiO_2$ ,  $A=Al_2O_3$ ,  $F=Fe_2O_3$
- Quelles roches cherche-t-on pour une usine de ciment?
- Quelles sont les 4 phases principales du clinker?
- Dominance de  $C_3S$  ~ deux tiers
- Pendant le broyage ajout de ~4-5%  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$
- Contrôle de réactivité par la finesse
- Aujourd'hui beaucoup de ciments mélangés – ajouts de calcaire, laitier, etc.
- Présence de < 1% des alkalis ( $K_2O$ ,  $Na_2O$ ) qui sont des impuretés, mais jouent un rôle important



## 6. L'essentiel du cours



## 6. Pour aller plus loin...

---

- **Video Lafarge – Dans une usine a ciment**

<https://www.youtube.com/watch?v=ZN6bfYYf4R0>

- **Video RTS les secrets du ciment**

<https://www.rts.ch/play/tv/couleurs-locales/video/les-secrets-de-fabrication-du-ciment?id=10099728&station=a9e7621504c6959e35c3ecbe7f6bed0446cdf8da>