

Résumé / questions

- Quelle est la différence entre le béton et le mortier?
- Pourquoi met-on des granulats dans le béton?
- Pourquoi utilise-t-on des granulats de tailles différentes?
- Pourquoi utilise-t-on des mélanges continus des granulats?
- Comment calcule-t-on les proportions de sable, 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 influence 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 prend pas sous eau

1756, Smeaton en Angleterre, découvre que les chaux qui présentent les meilleures propriétés « hydrauliques » sont celles contenant des matières argileuses

1796, Parker en Angleterre, développe le ciment « Roman » en calcinant certains gisements naturels de calcaire argileux

1813-28, Vicat en France, met en évidence le rôle de l'argile et fabrique un ciment à partir d'un mélange intime de calcaire et d'argile.

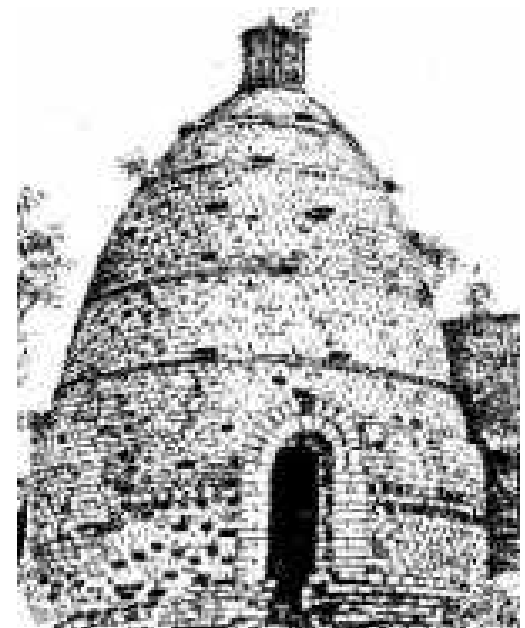


1824, Joseph Aspdin en Angleterre, fabrique et brevète une chaux hydraulique à laquelle il donne le nom de ciment Portland, car sa couleur, après prise, ressemble à la pierre de Portland.

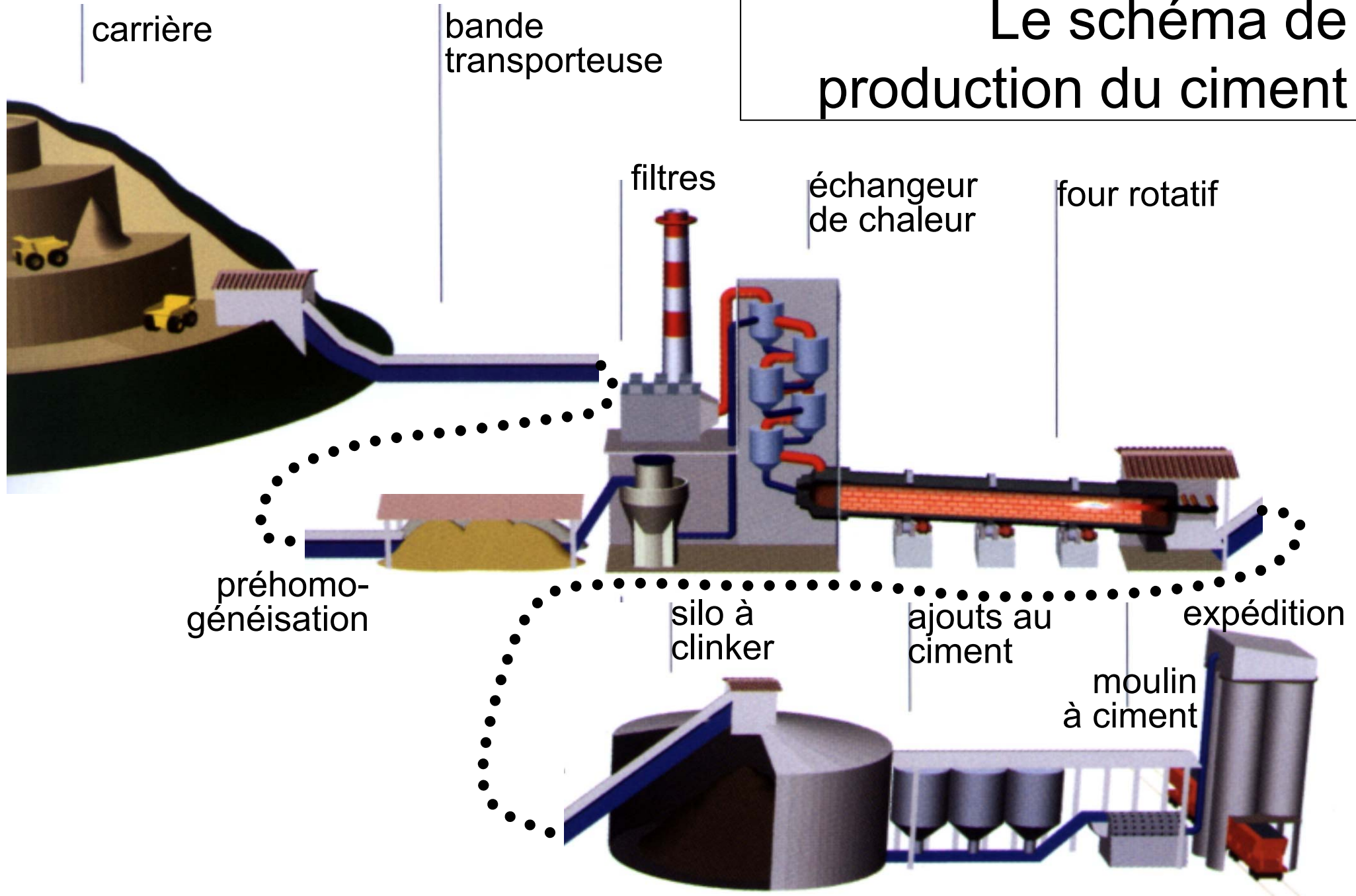


1835, Issac-Charles Johnson qui travaille dans une usine de ciment, observe que les morceaux trop cuits donnent, après mouture, un meilleur ciment. Il augmente la température de cuisson et donne naissance au véritable ciment Portland.

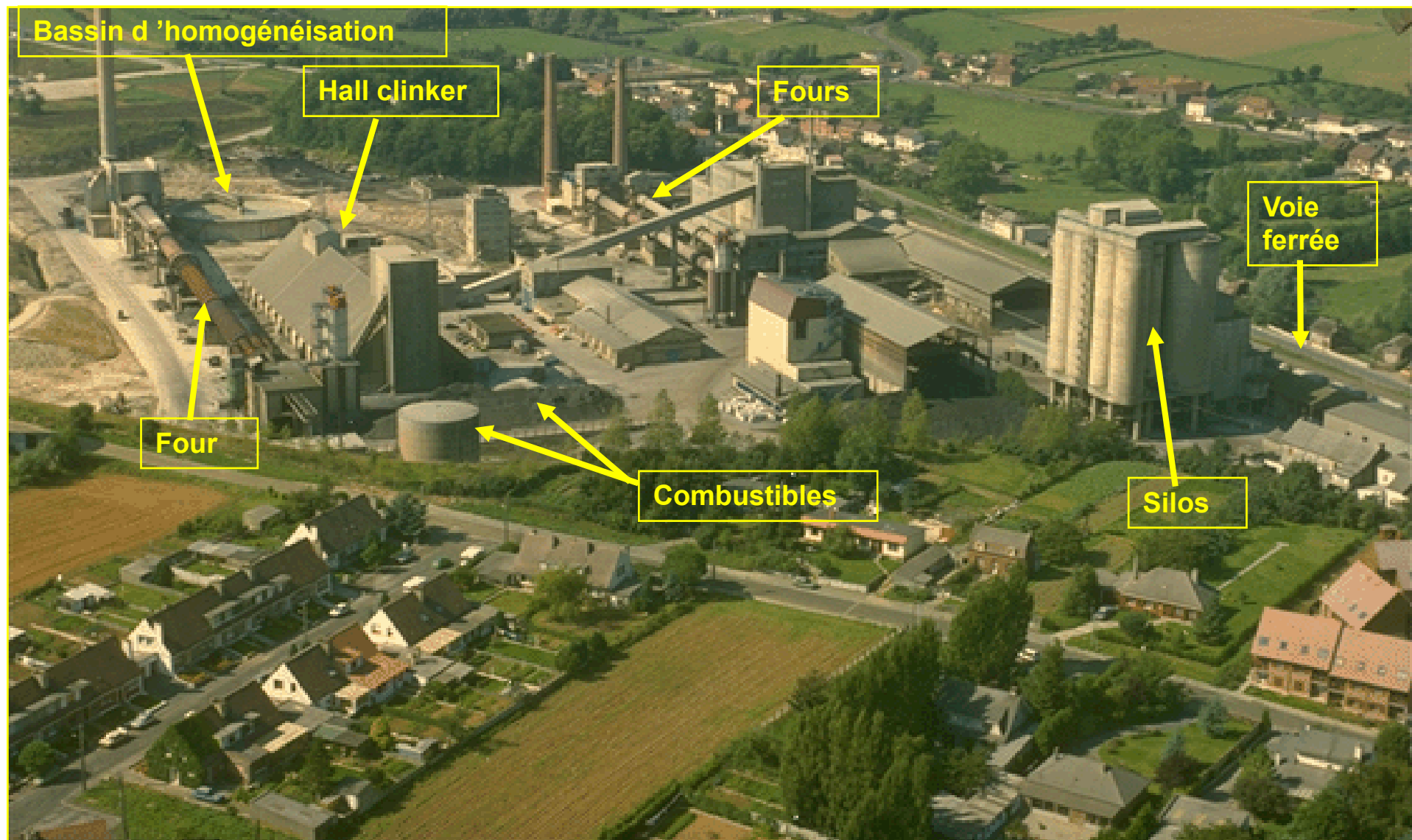
1838, William Aspin produit le ciment Portland à côté de la Tamise et convainc Brunel de l'utiliser pour réparer son tunnel sous la Tamise – la 1ère utilisation du ciment Portland dans le génie civil.



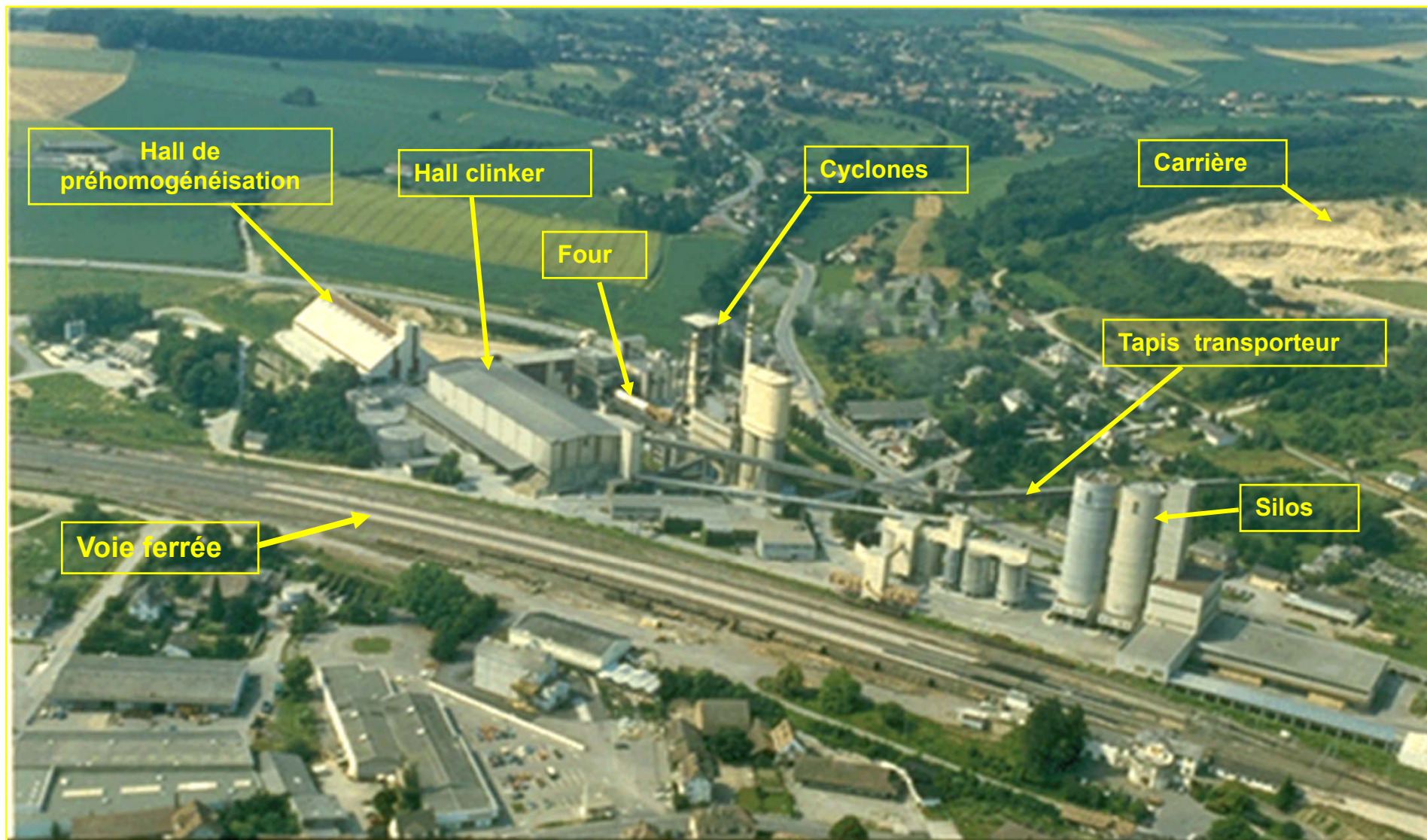
Le schéma de production du ciment



La fabrication du ciment – le process



La fabrication du ciment – le process



Cru



~80% roches calcaires

Jusqu'à 95% CaCO_3

~55% **CaO**

impuretés majeures MgO

bonne source de calcaire
détermine emplacements
des usines de ciment

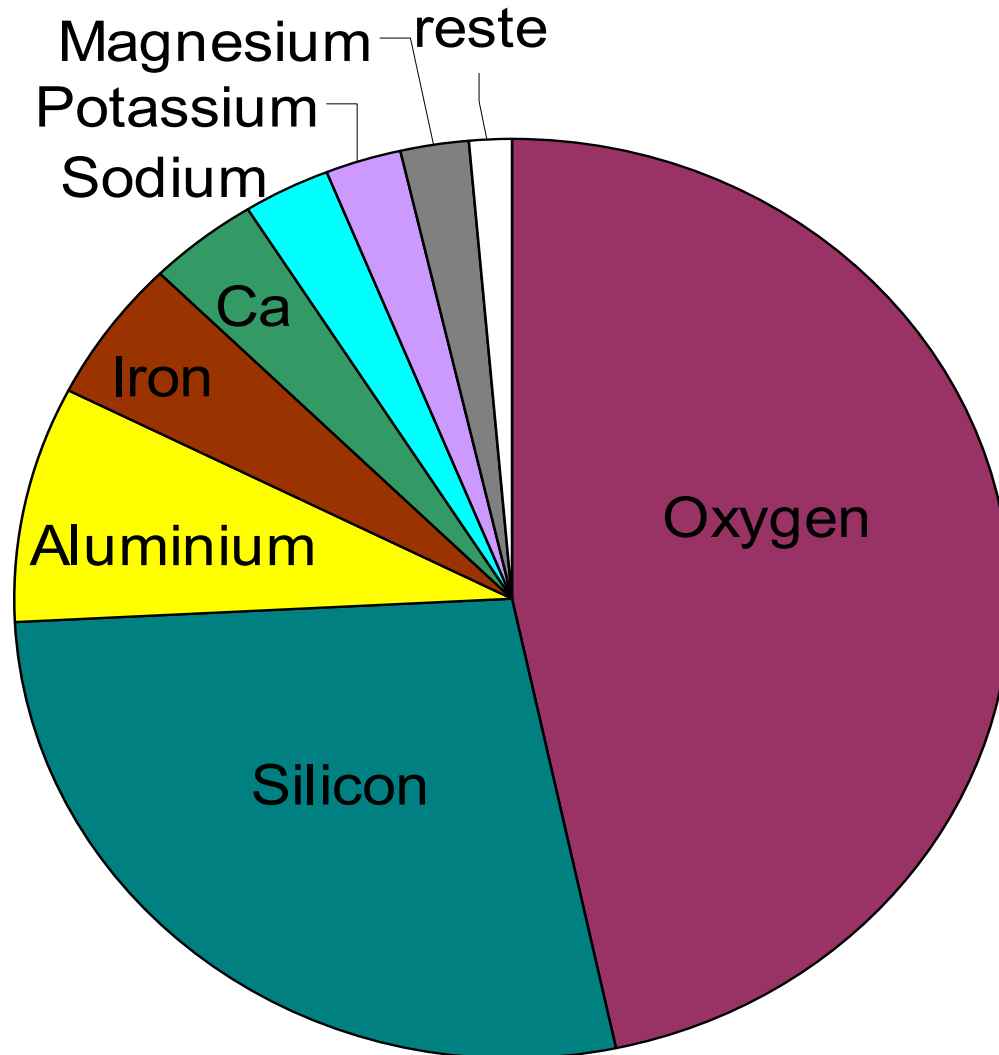


20% source de **SiO_2** qui amène
aussi **Al_2O_3** et **Fe_2O_3**

argiles, etc.

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

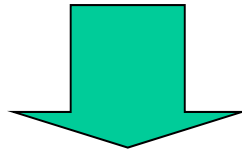
Composition de croûte terrestre



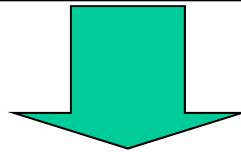
- **Grande abondance des éléments nécessaires**
- **Malgré la quantité plus faible de calcium, cet élément est fortement concentré dans les roches calcaire, bien réparti**

Nomenclature

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



Les **oxydes** constitutants : CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃
Abréviations **C** **S** **A** **F**



Les **phases** constitutantes : **C₃S**, **C₂S**, **C₃A**, **C₄AF** (ferrite ss)
Ca₃SiO₅, Ca₂SiO₄, Ca₃Al₂O₆, Ca₂(Al,Fe)₂O₅

aussi: H₂O, SO₃,
Abréviations **H** **\$ or $\bar{S}$**

La Carrière

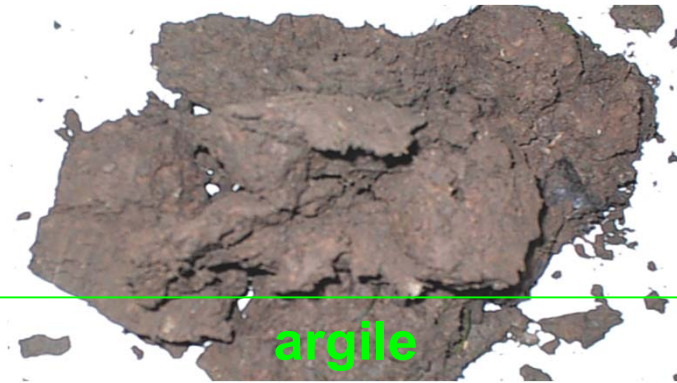


Composition du cru (exemple)



Calcaire

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



argile

$\pm 17\%$ + éventuellement de la bauxite



Ajouts

$\pm 3\%$ sable + $0,7\%$ oxyde de Fe

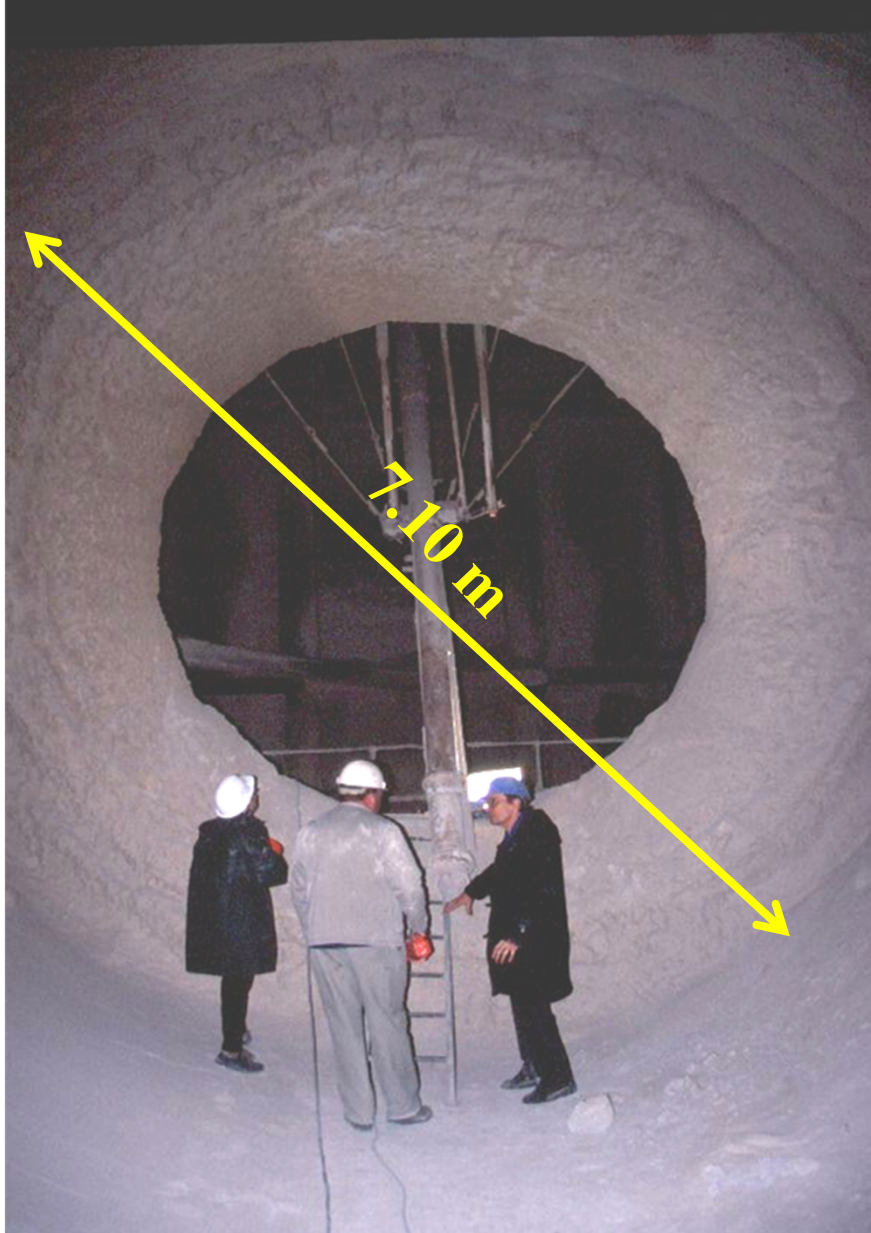


CRU

chimie

**SiO_2 13,5% ; Al_2O_3 3,1% ; Fe_2O_3 2,0%
 CaO 41,2% ; MgO 3,1% ; K_2O 0,9%**



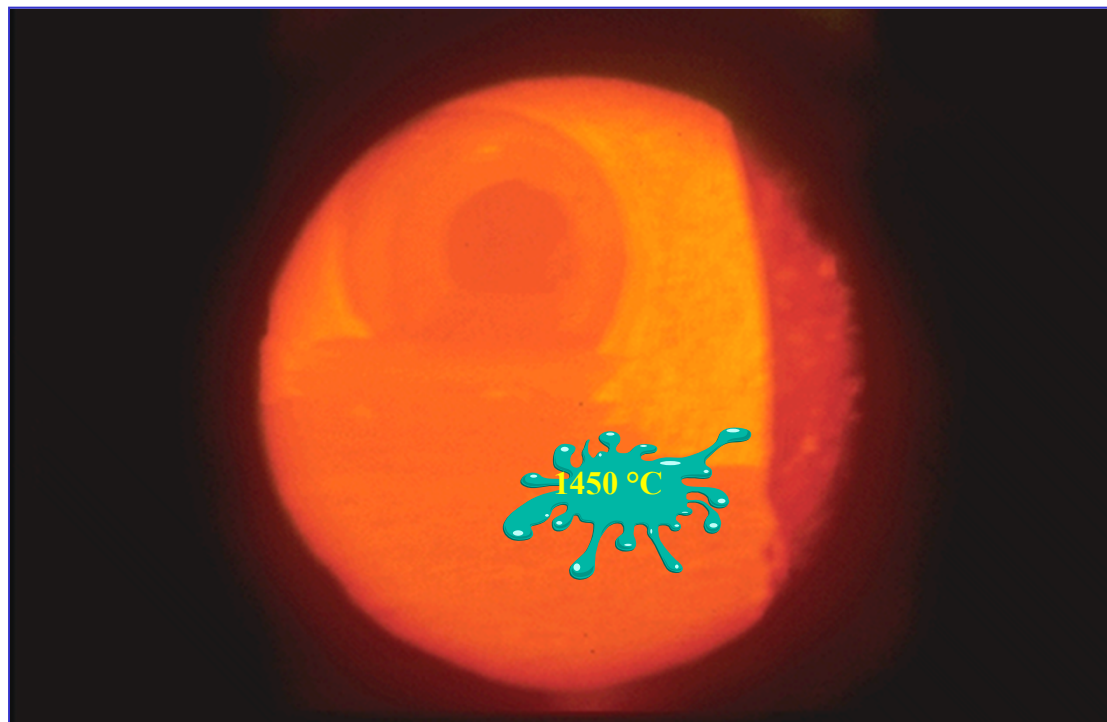
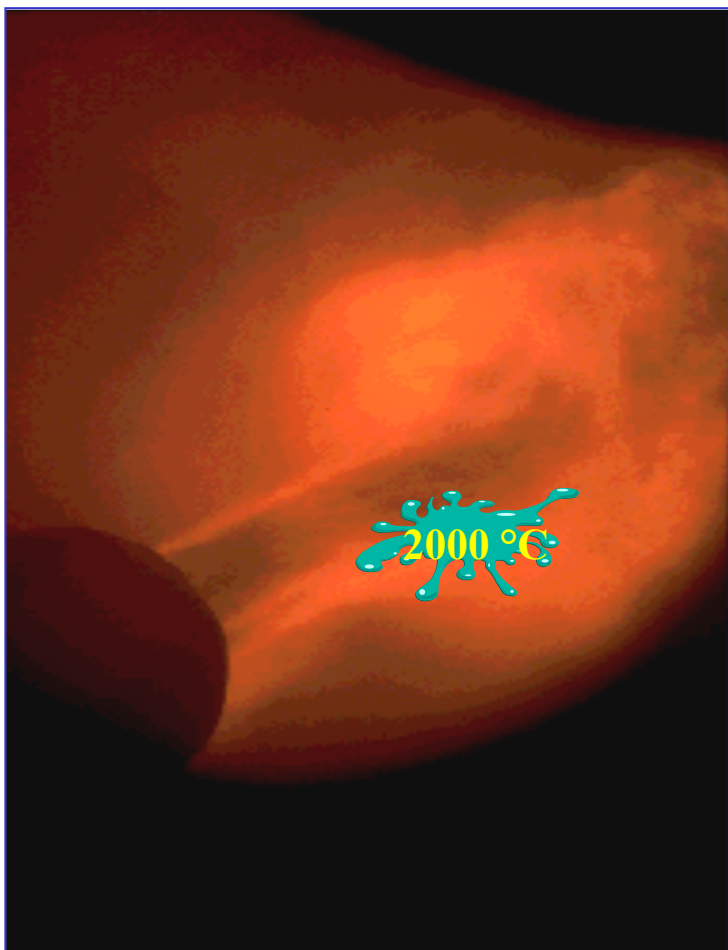




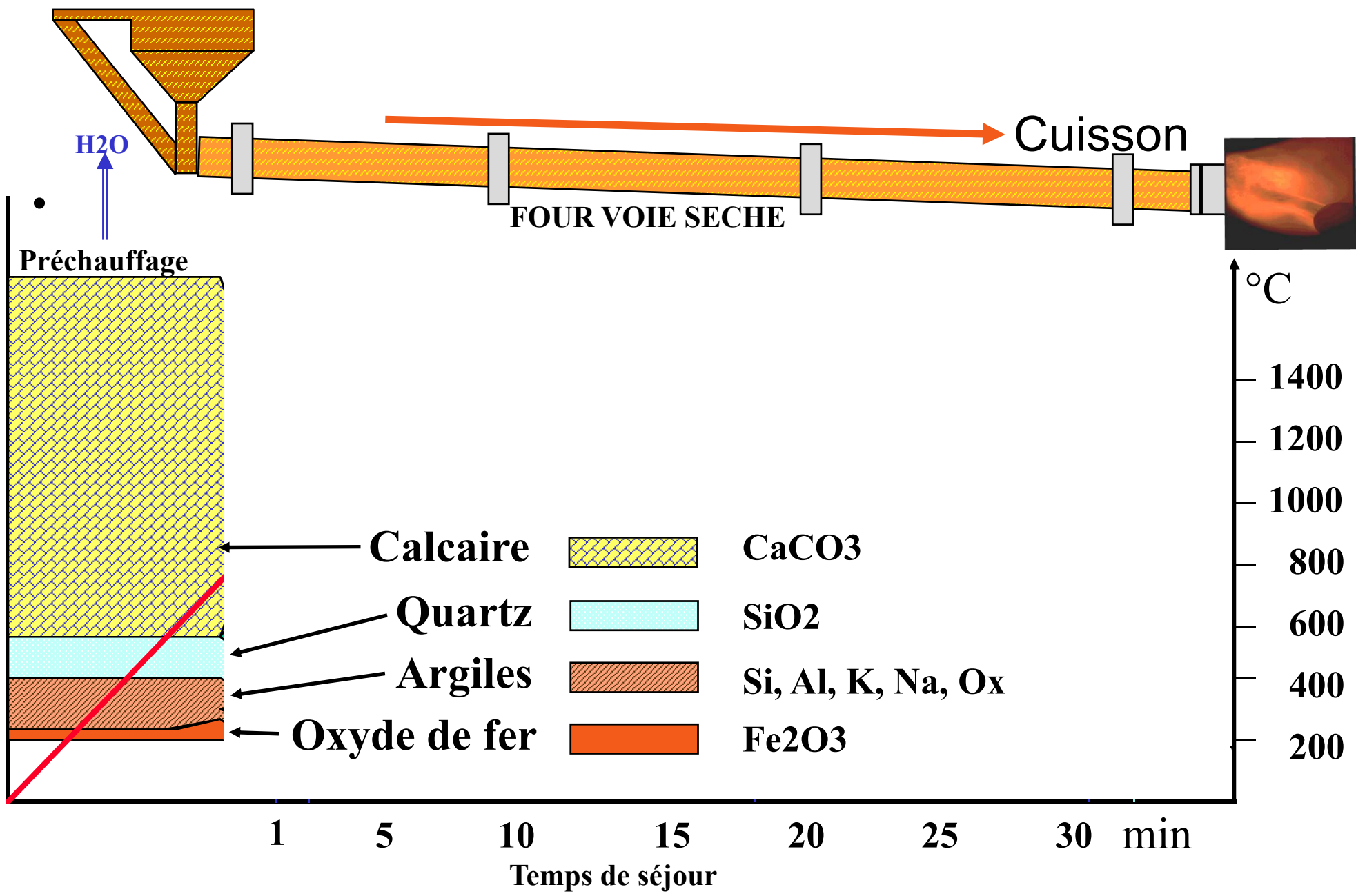
La cuisson



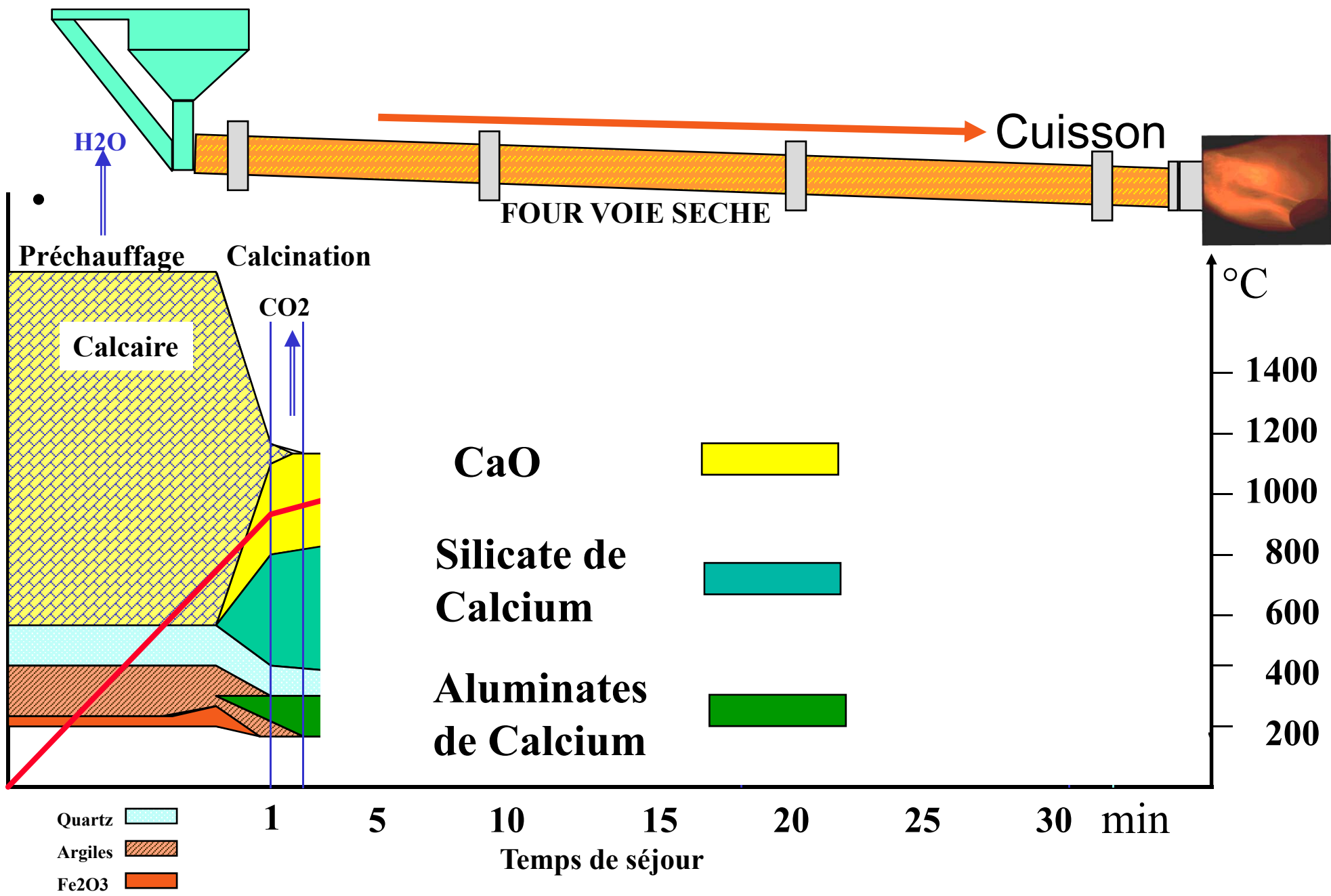
La cuisson



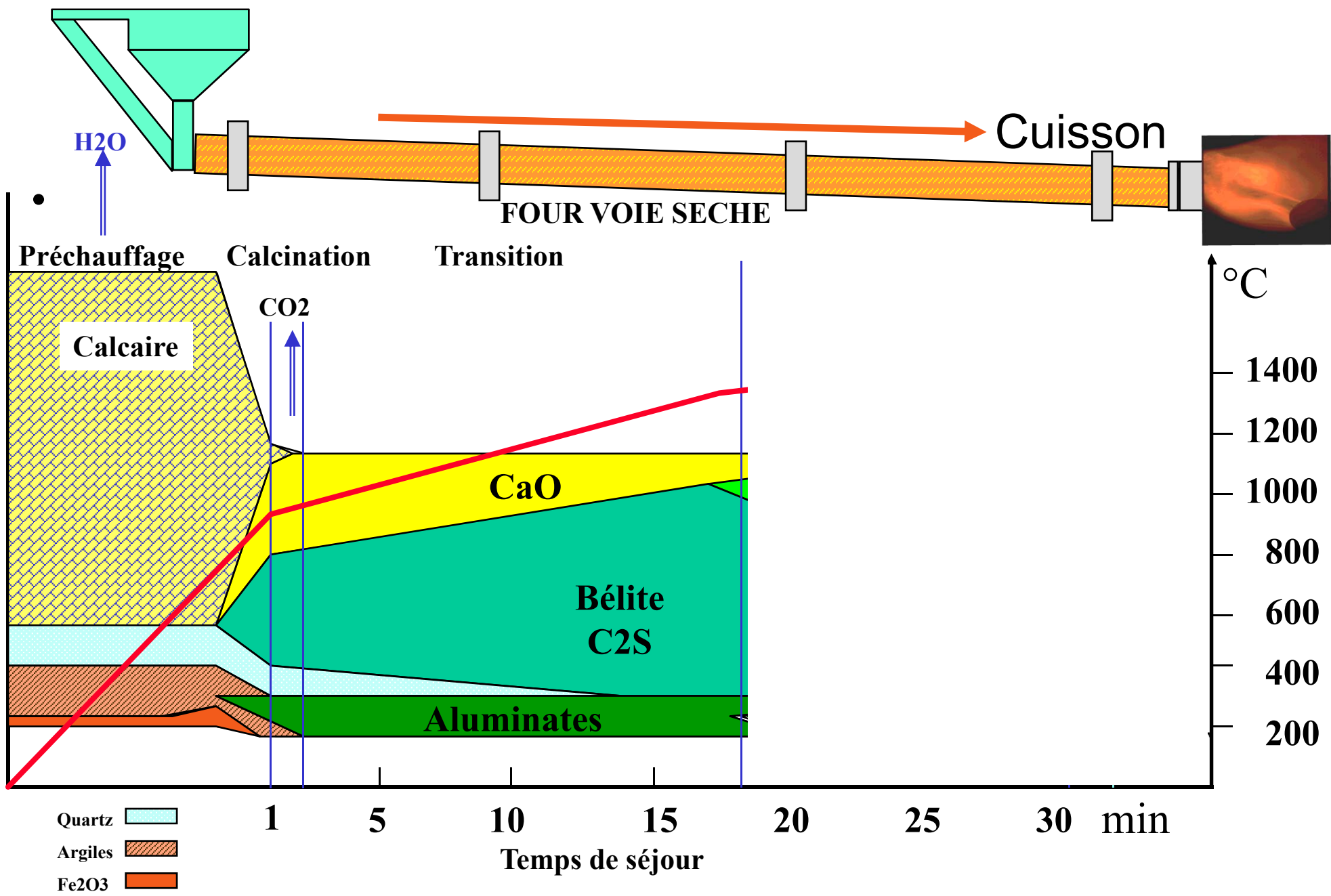
Répartition des masses



Répartition des masses



Répartition des masses



Répartition des masses

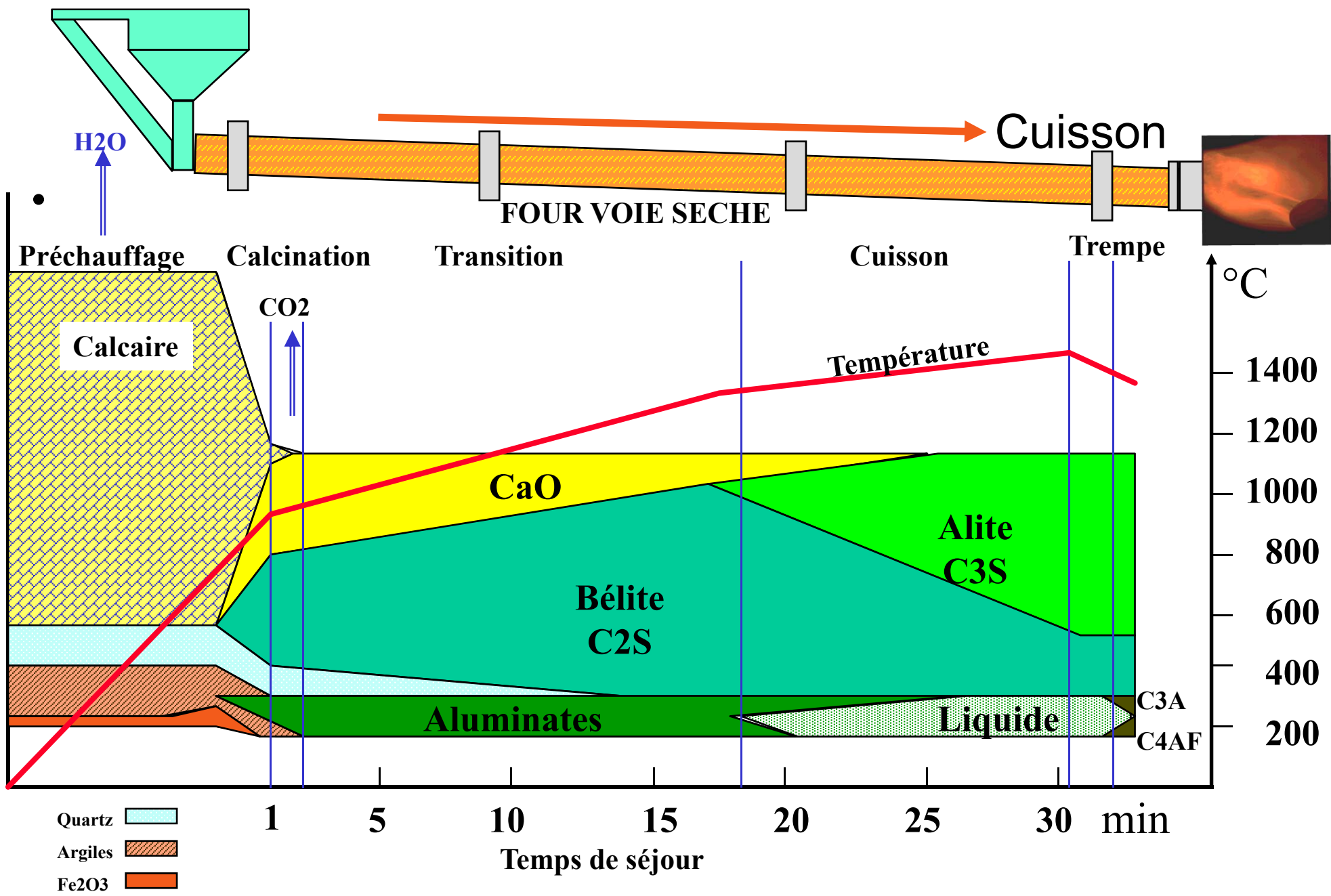
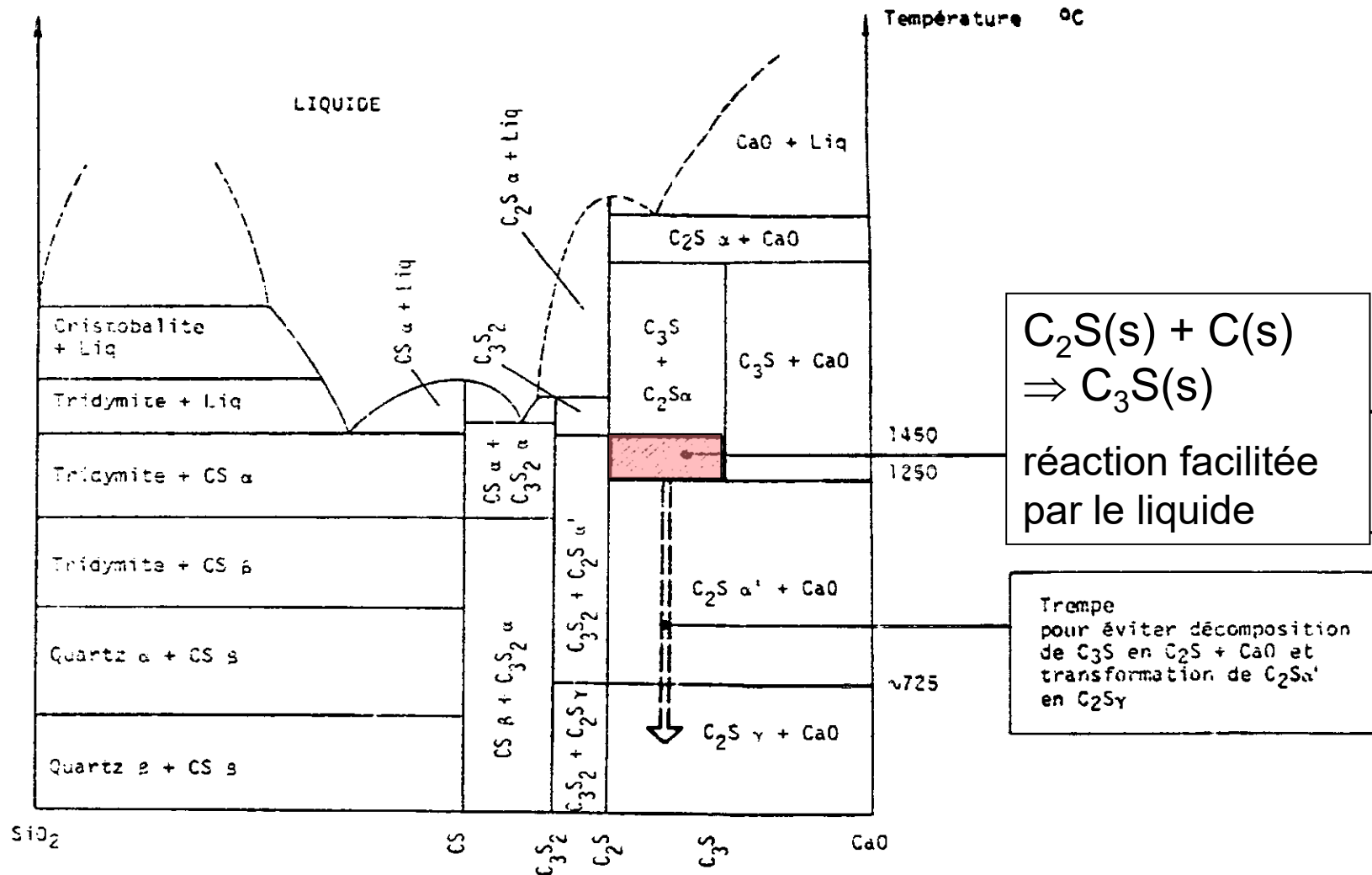
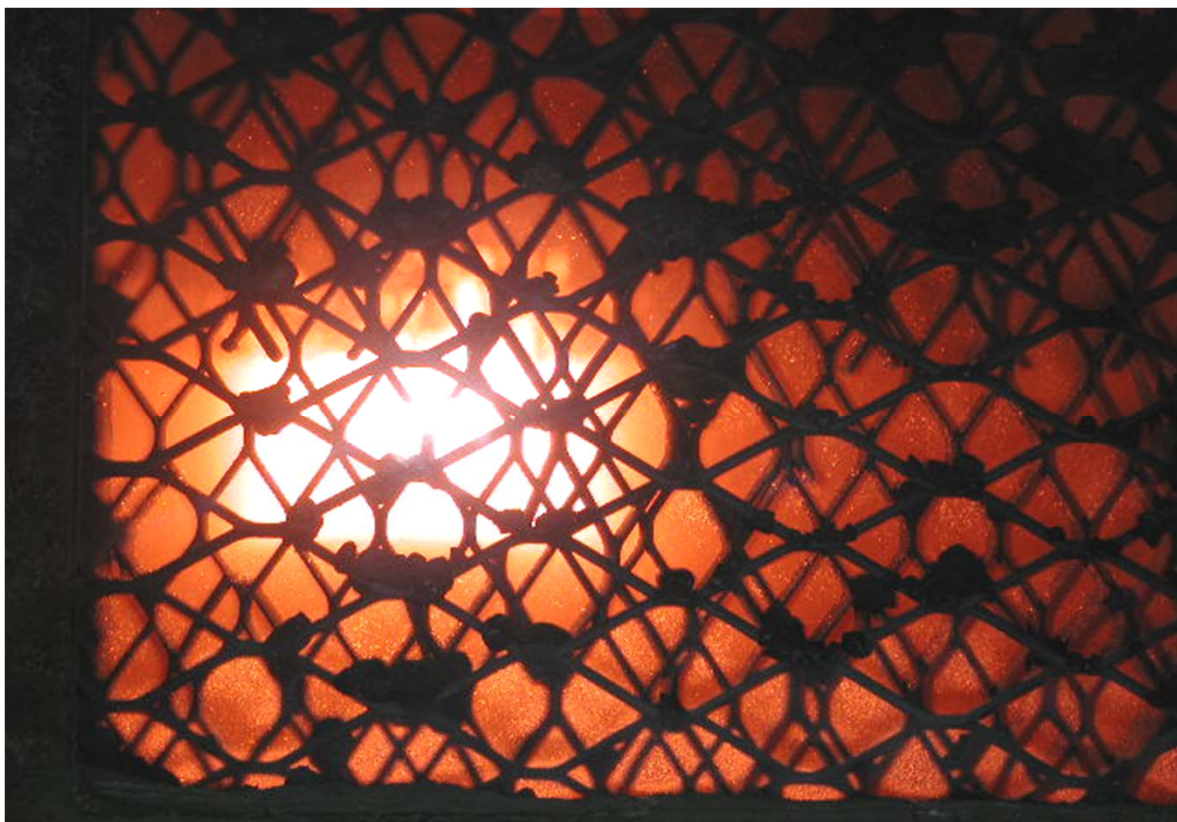


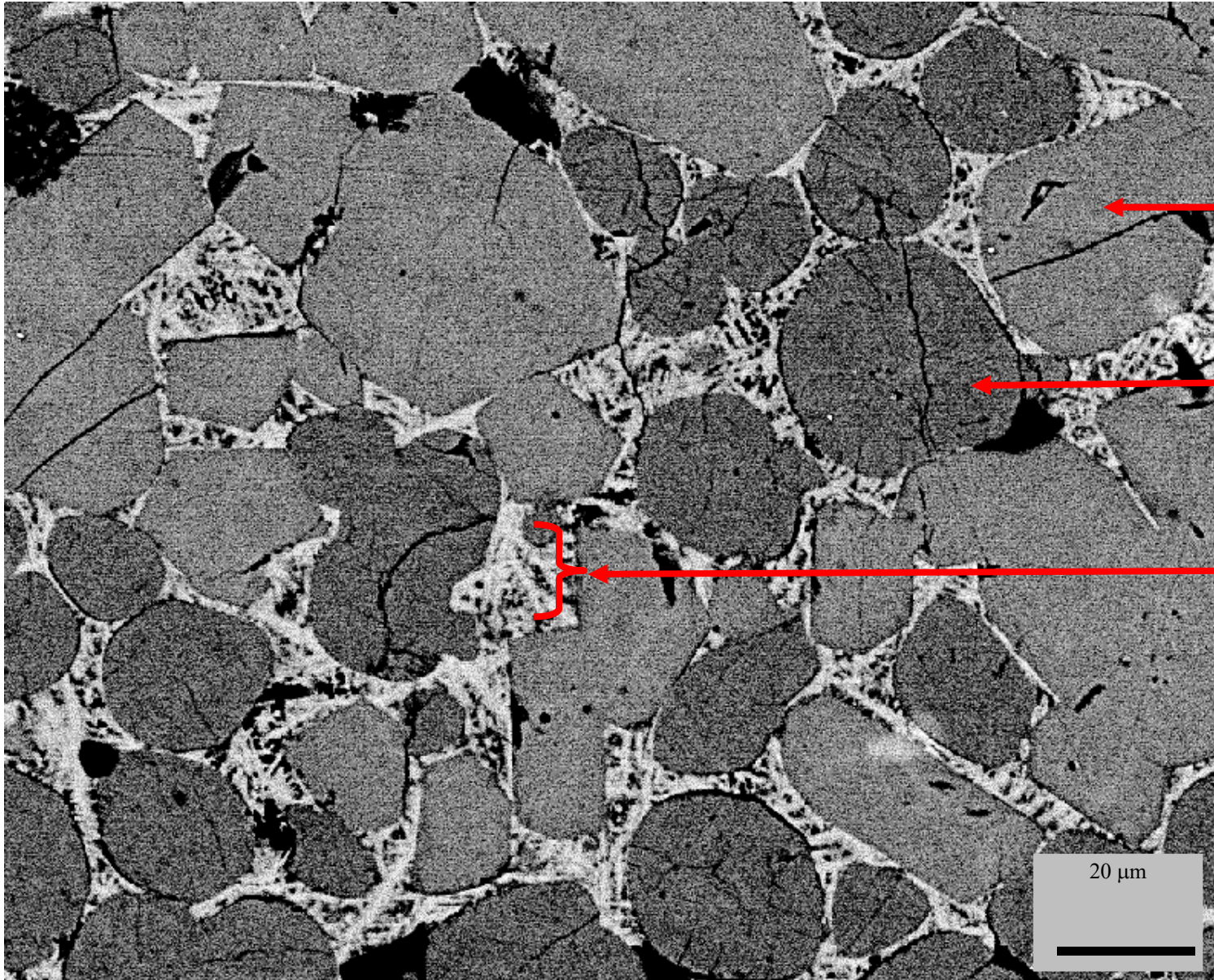
diagramme d'équilibre SiO_2 - CaO



La trempe



Microstructure de clinker « idéale »

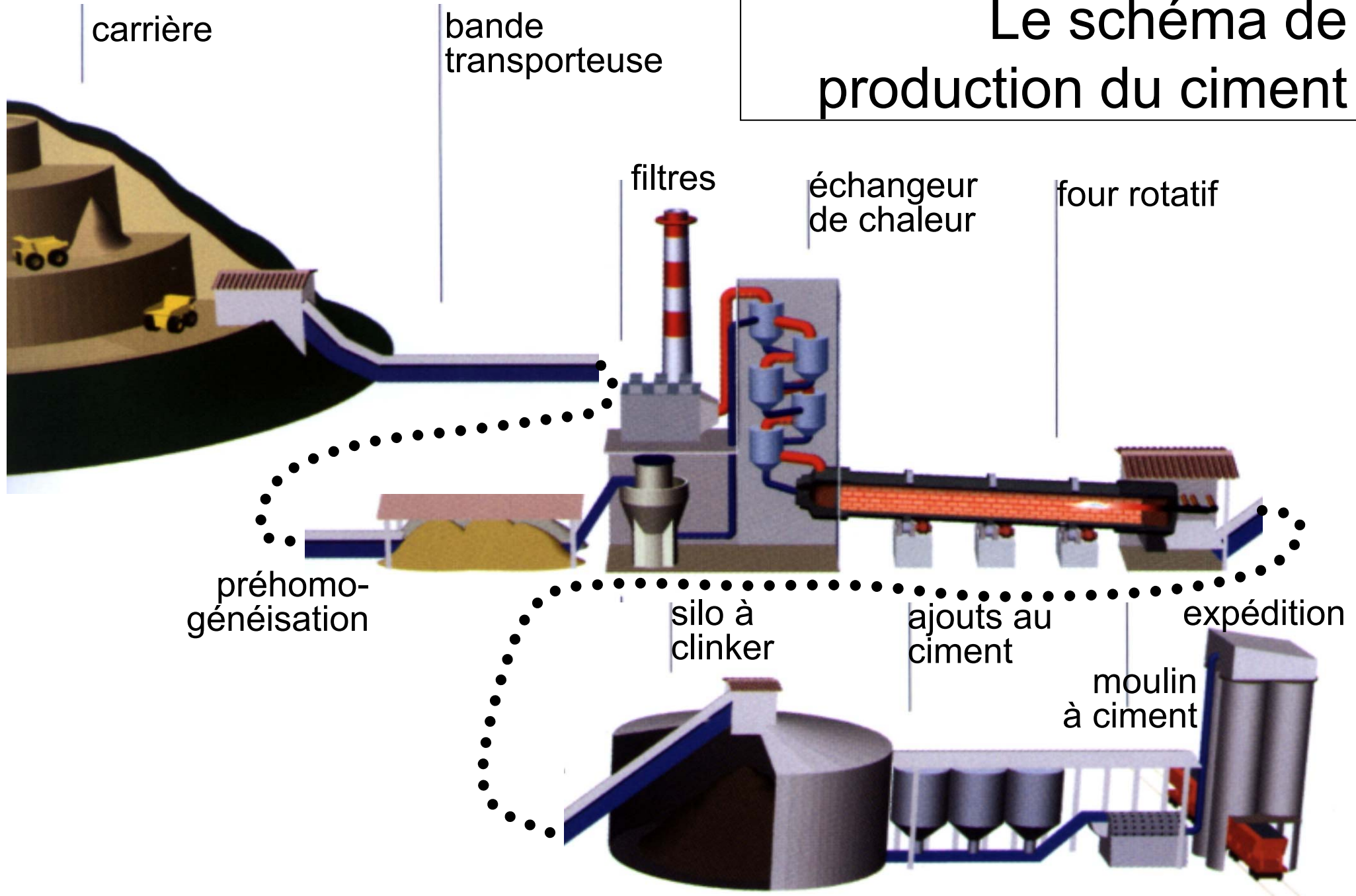


« alite »
 C_3S , impure

« belite »
 C_2S , impure

phases
« interstitielles »
 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

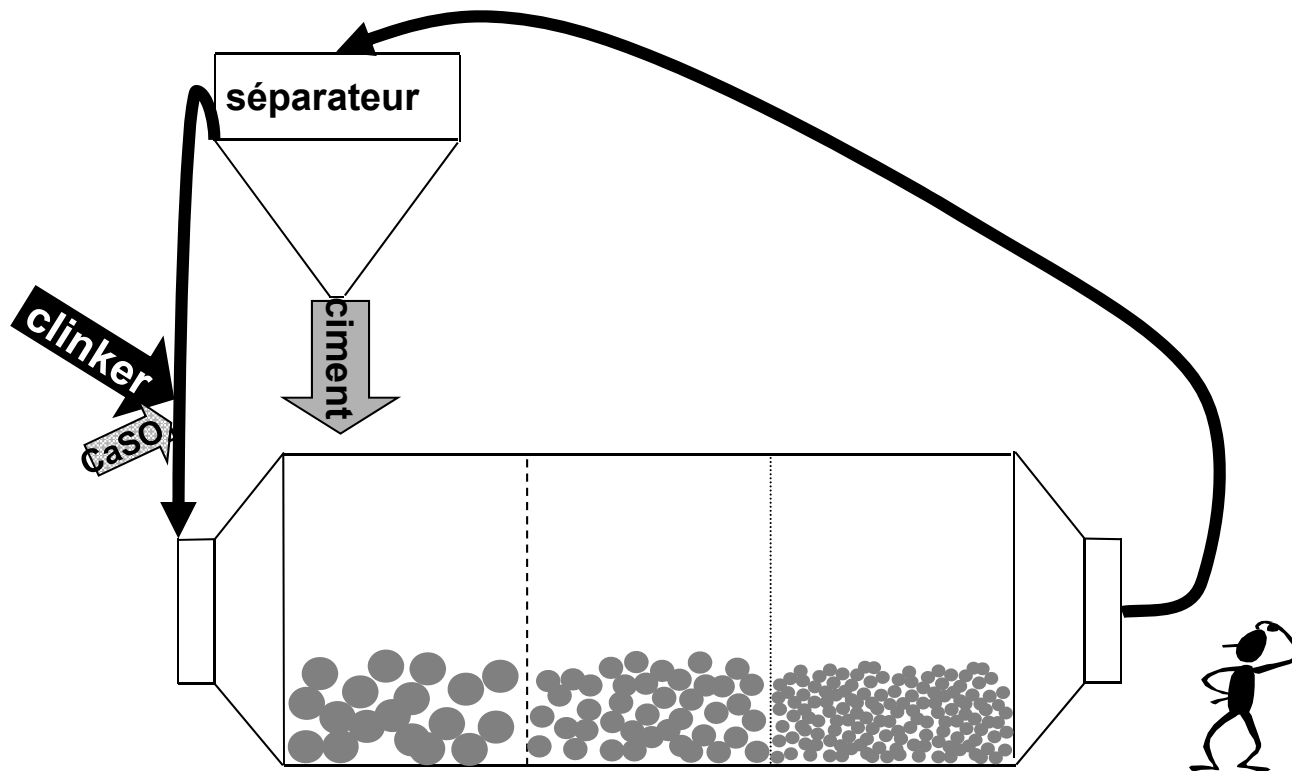
+

Régulateur
de prise

+

Autres
constituants
(éventuellement)

Broyage



2 ou 3 compartiments

Toujours

Ajout de $\text{CaSO}_4\text{H}_2\text{O}_x$:
(4 – 8%)

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

déshydratation

à plâtre ($x=0,5$) possible

Souvent

Ajout de CaCO_3 fin:
(10-20%)

Filler fin

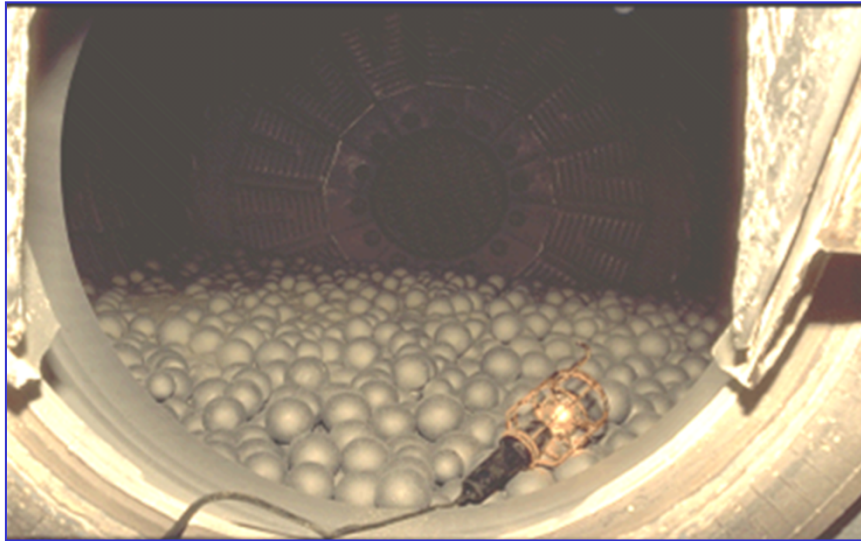
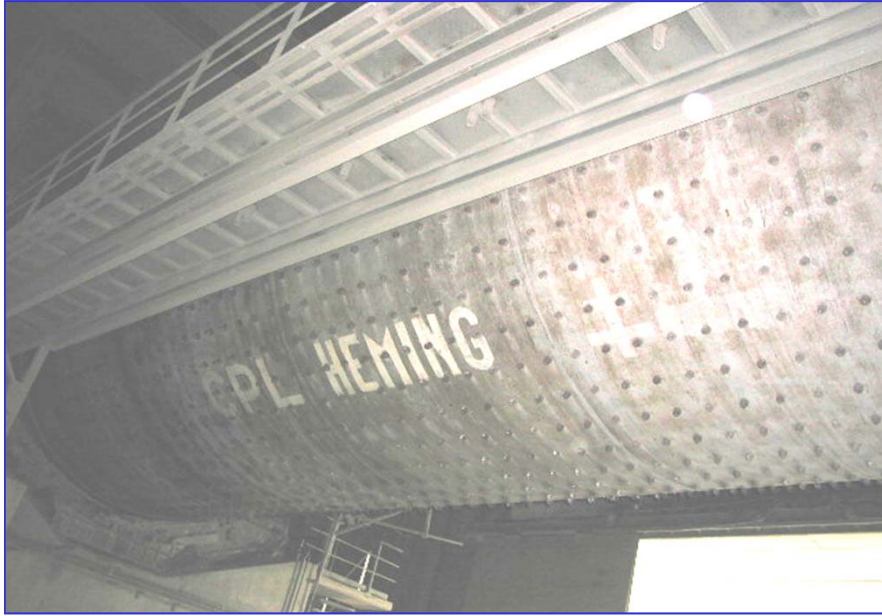
Aussi possible

Laitier (slag)

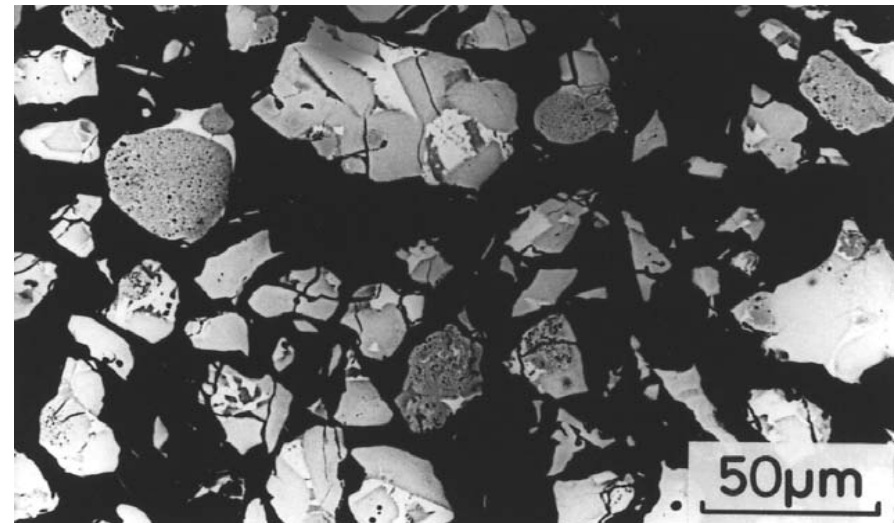
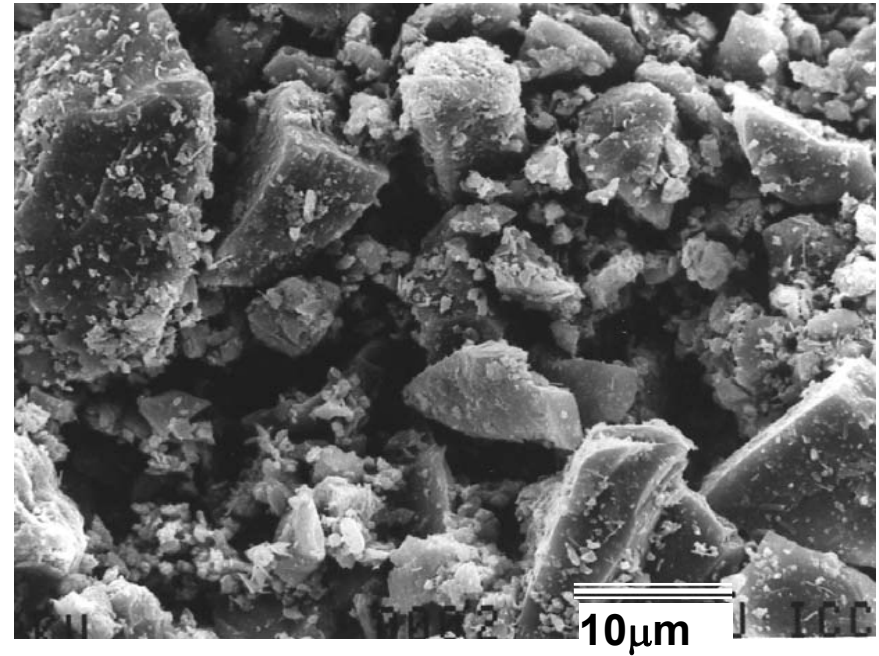
Cendres volantes (fly ash)

Fumée de silice (silica fume)

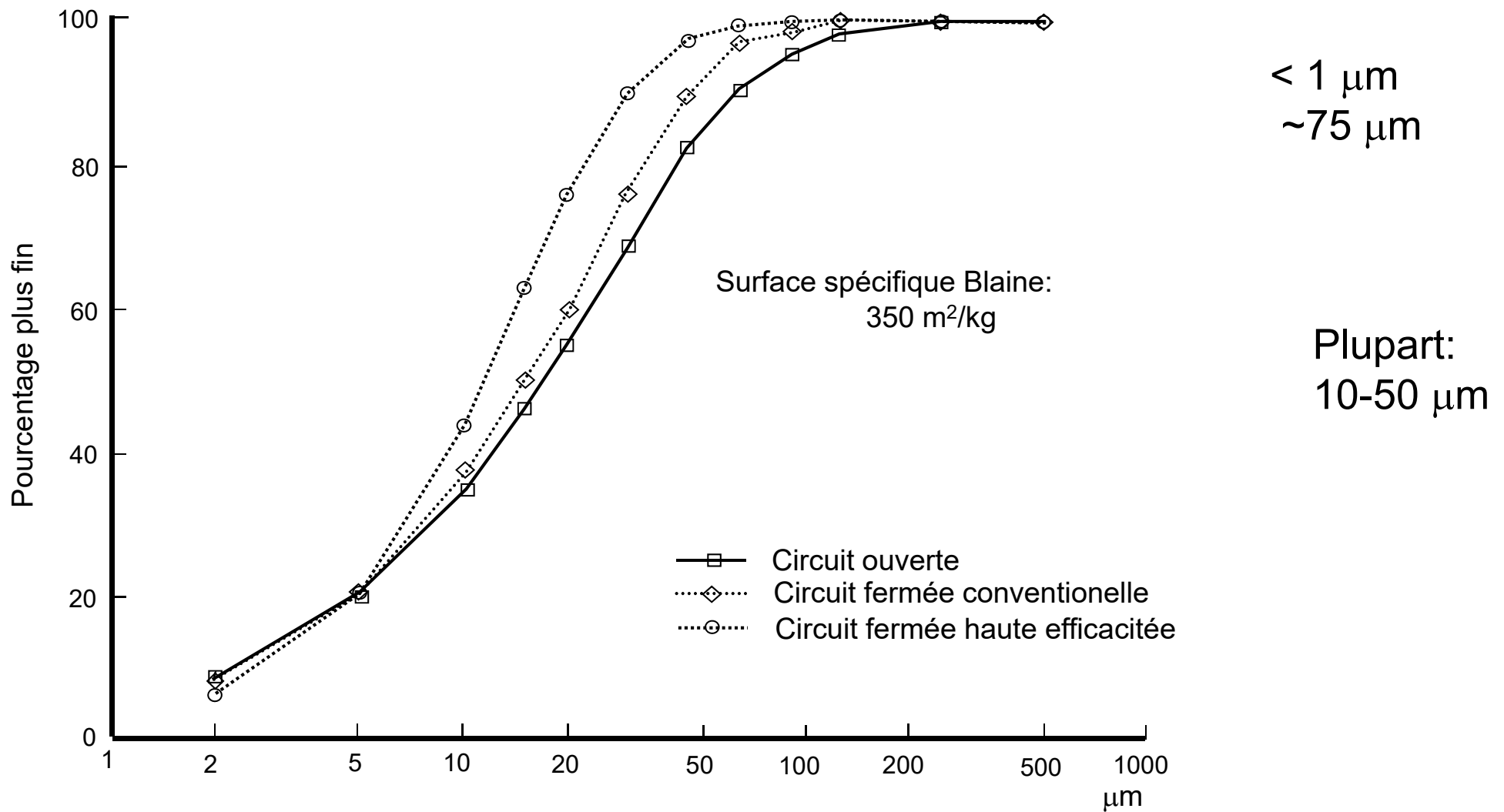
Le broyage



Grains du ciment



Granulométrie – psd (particle size distribution)



Packaging

Sac
~<10%



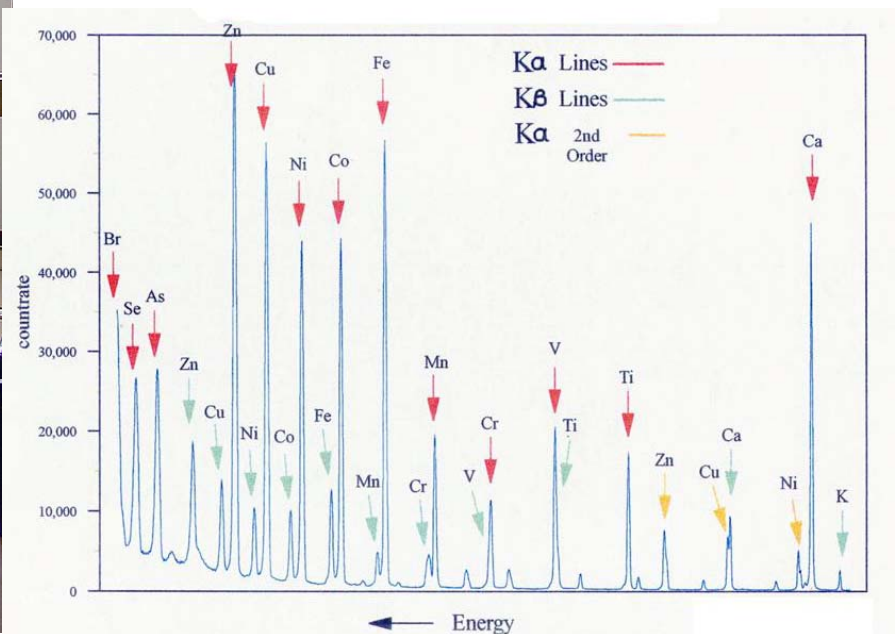
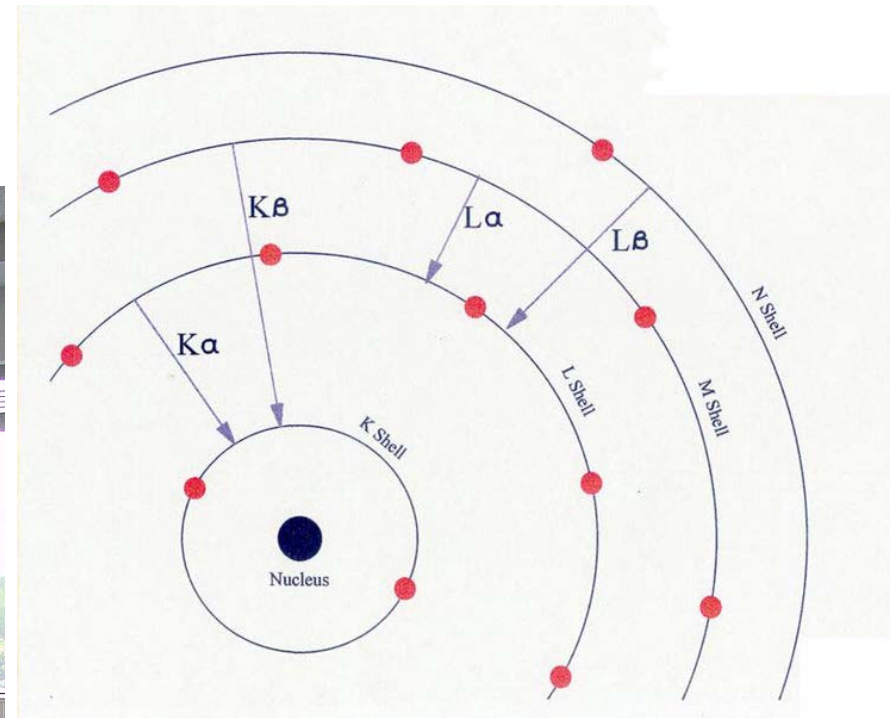
Big bag
~<10%



Vrac
~80-90%



Control Qualité



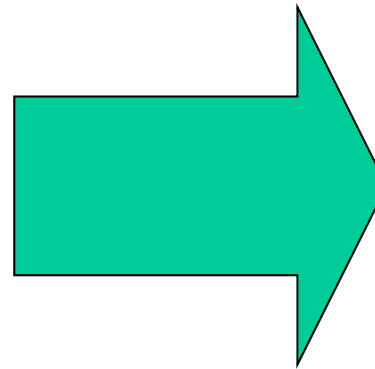
Source : http://en.wikipedia.org/wiki/X-ray_fluorescence

Caractérisation du ciment

Analyse oxyde (XRF)

SiO₂	20,5	(19 – 21)
Al₂O₃	6	(4-7)
Fe₂O₃	2,5	(2-3)
CaO	64	(62-65)
☀ MgO	1,2	(1-4)
SO₃	2,8	(2,5-3,2)
K₂O	0,5	(0,3-1)
Na₂O	0,2	(0,2-0.5)
PaF(LOI)	1	(1-2)
☀ CaO libre	1	(0,5-1,5)
resid insol	0,3	(0,2-0,4)

+Mn₂O₃, TiO₂, P₂O₅, CO₂



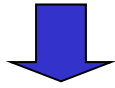
C3S	?
C2S	?
C3A	?
Fss	?

☀ Contrôle strict pour éviter le gonflement

Calcul « Bogue »

composition des phases «potentielles»

Tous Fe_2O_3 comme C_4AF :
 CaO et Al_2O_3 qui va avec



Al_2O_3 qui reste comme C_3A :
 CaO qui va avec



CaO qui reste – CaO libre



Solution de deux
équations simultanées
pour C_3S et C_2S

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

$$\text{C}_3\text{A} = 2,65 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 1,69 \text{ Fe}_2\text{O}_3$$

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

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

À cause des solutions solides
Le calcule « Bogue » et que un estimation

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

Écartes typiques

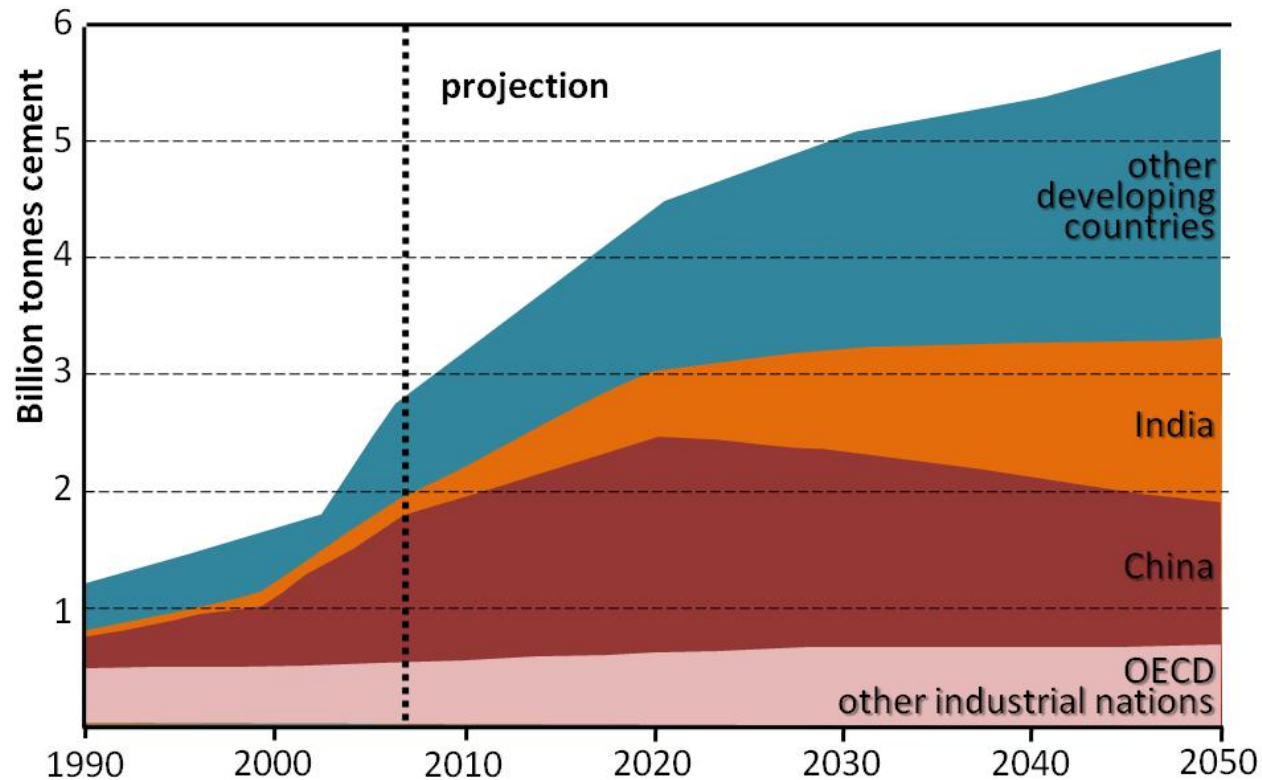
CEM I (>95% clinker)

Résistance précoce High early strength	Finnesse , C_3S , C_3A , (alk)	R1j ~2x
Basse chaleur Low heat	Finnesse ↓, 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

CO₂

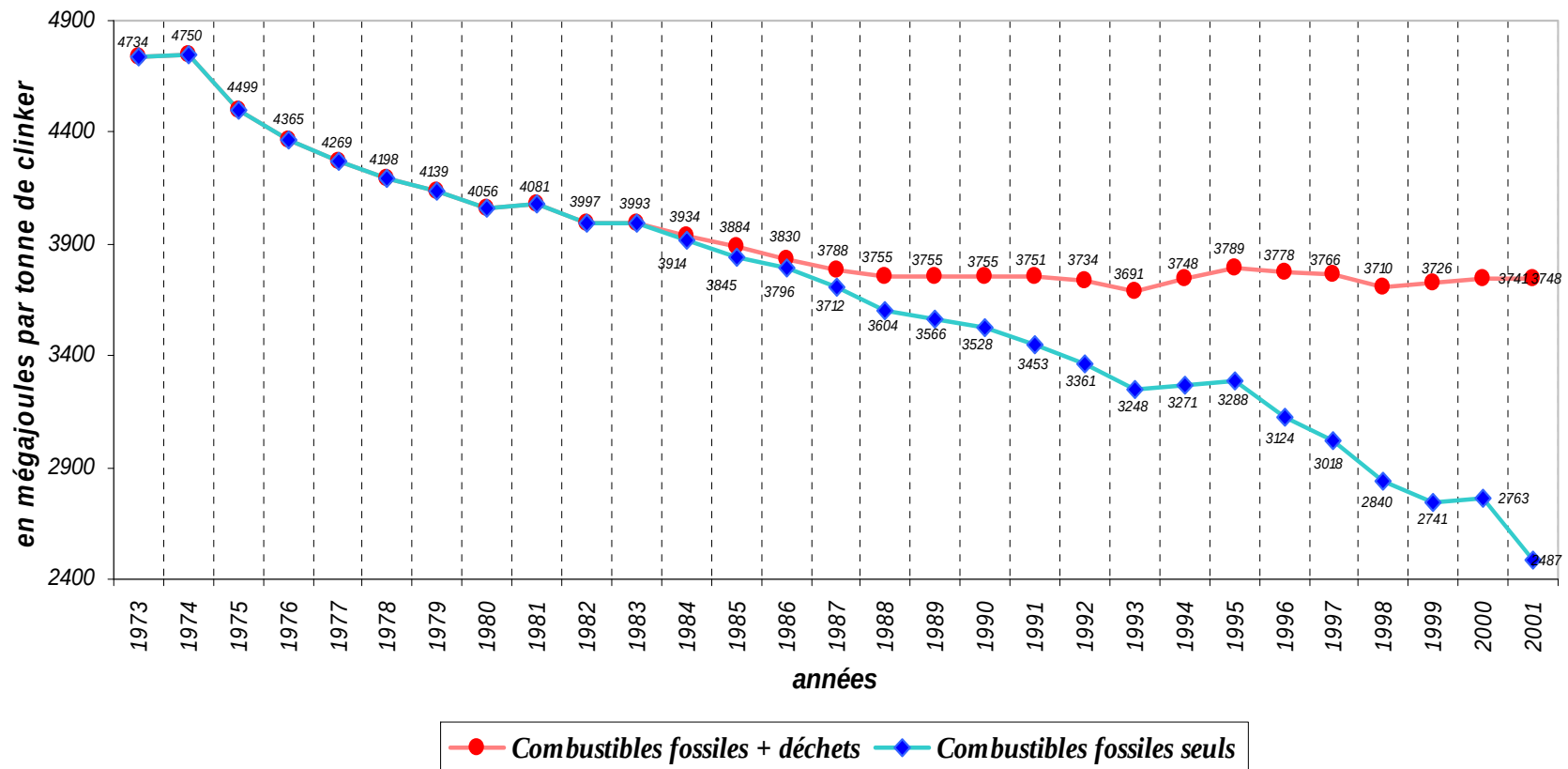
- The production of 1 tonne of cement emits about 700-900 kg of CO₂
- This constitutes about 5-8% of man made CO₂
- And demand is forecast to increase



Source: based on US Geological Survey, International Energy Agency, European Cement Association



Combustibles de substitution (chiffres français 2002)



The total energy of production is within about 20% of the theoretical minimum – it is estimated that no more than 2% of further savings are possible

Combustibles de substitution

données France 2000

Combustibles fossiles		Combustibles de substitution	
- coke de pétrole	45,0 %	- DIS :	
- CHV / brais	15,6 %	huiles usagées	8,1 %
- charbon	9,1 %	autres	10,4 %
- fuel lourd	3,4 %	- DIB :	
- gaz	0,7 %	farines animales	5,8 %
		pneus usés	1,0 %
		autres	0,9
Total	73,8 %	Total	26,2 %
	(1,1 M t.e.p.)		(0,4 M t.e.p.)

Possible to use up to 90% substitute fuels

The Future Of Concrete / Facing Challenges

1. Reducing the environmental impact of cement production

1.2. alternative fuels

Alternative fuels consumption in Europe (2000)

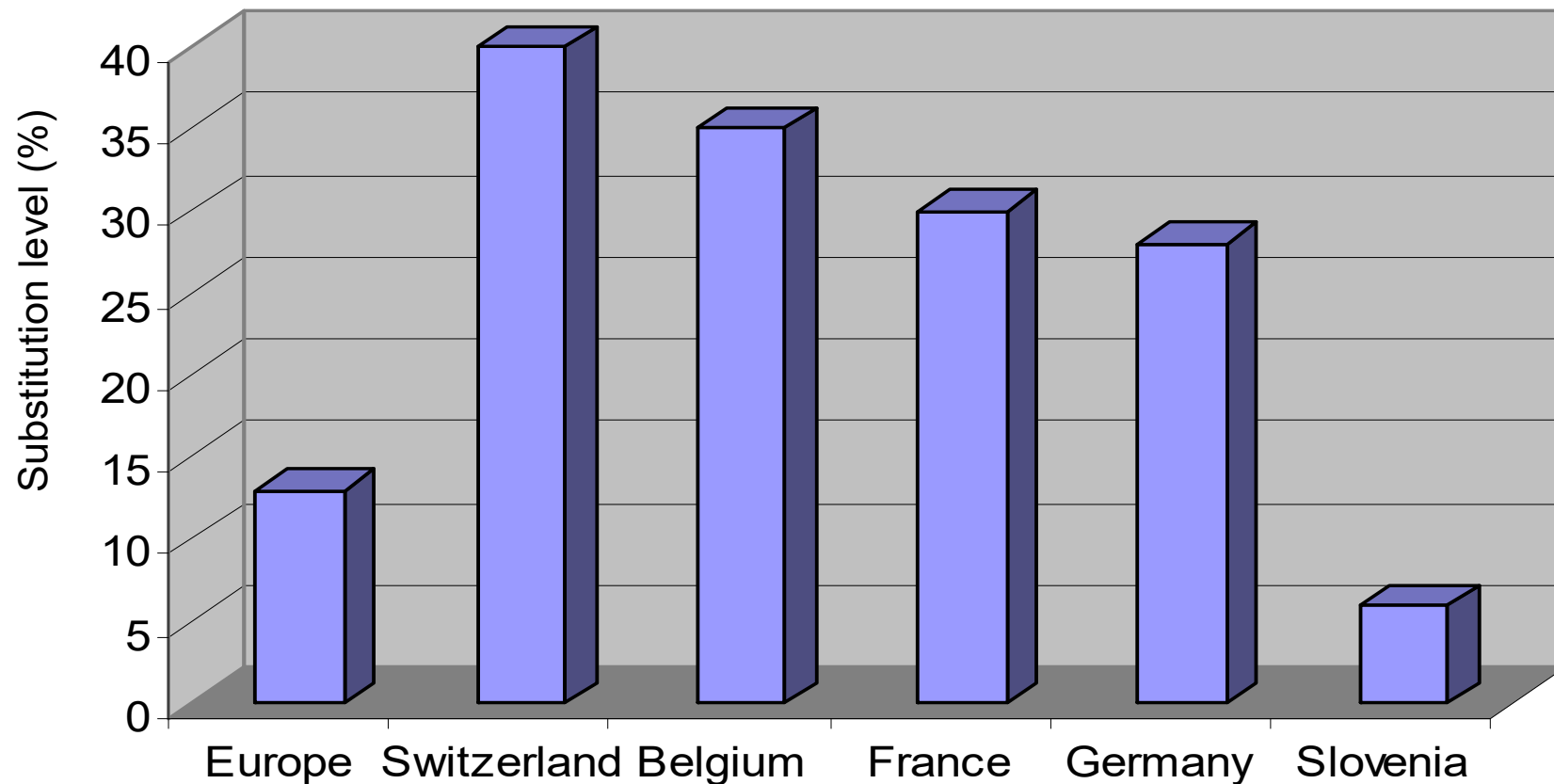
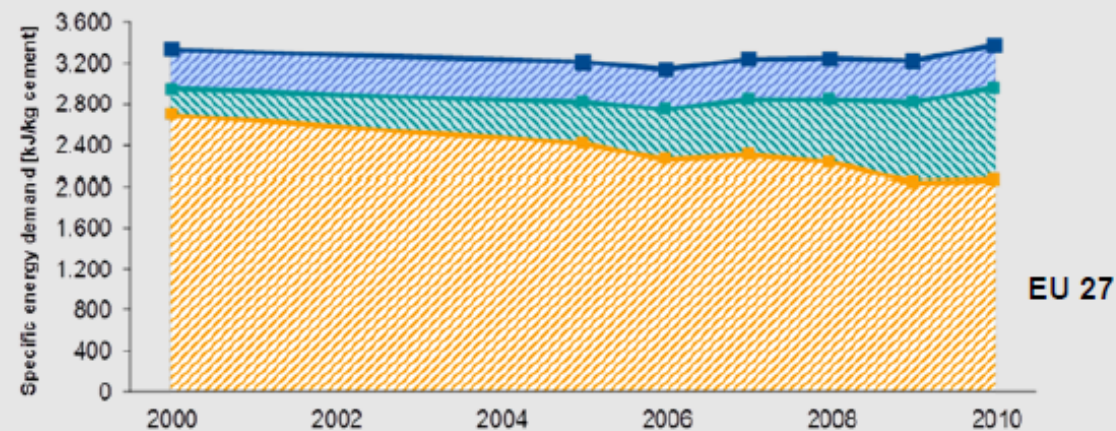
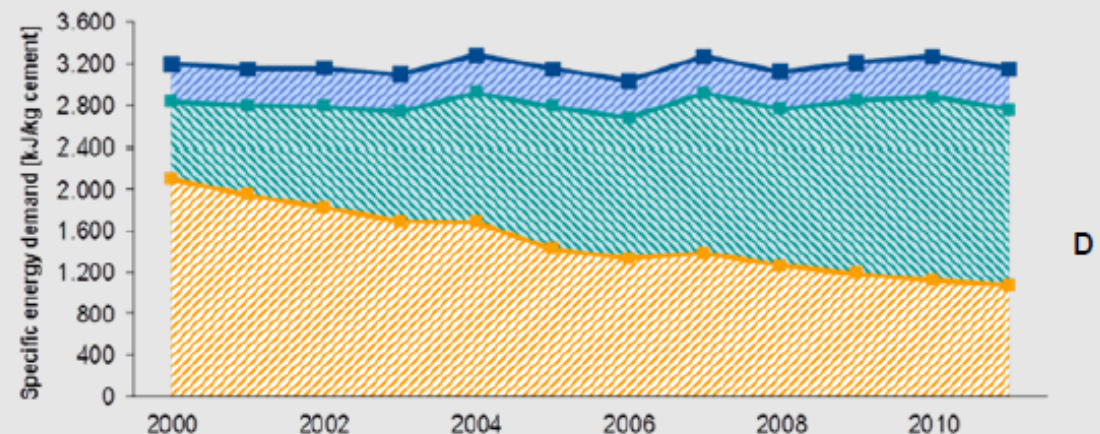


Fig.1: Development of cement related energy demand of the European (EU27) and German cement industry



-  Share of power
-  Share of alternative fuels
-  Share of regular fuels



The Future Of Concrete / Facing Challenges

1. Reducing the environmental impact of cement production

1.2. alternative fuels

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/>)



The Future Of Concrete / Facing Challenges

1. Reducing the environmental impact of cement production

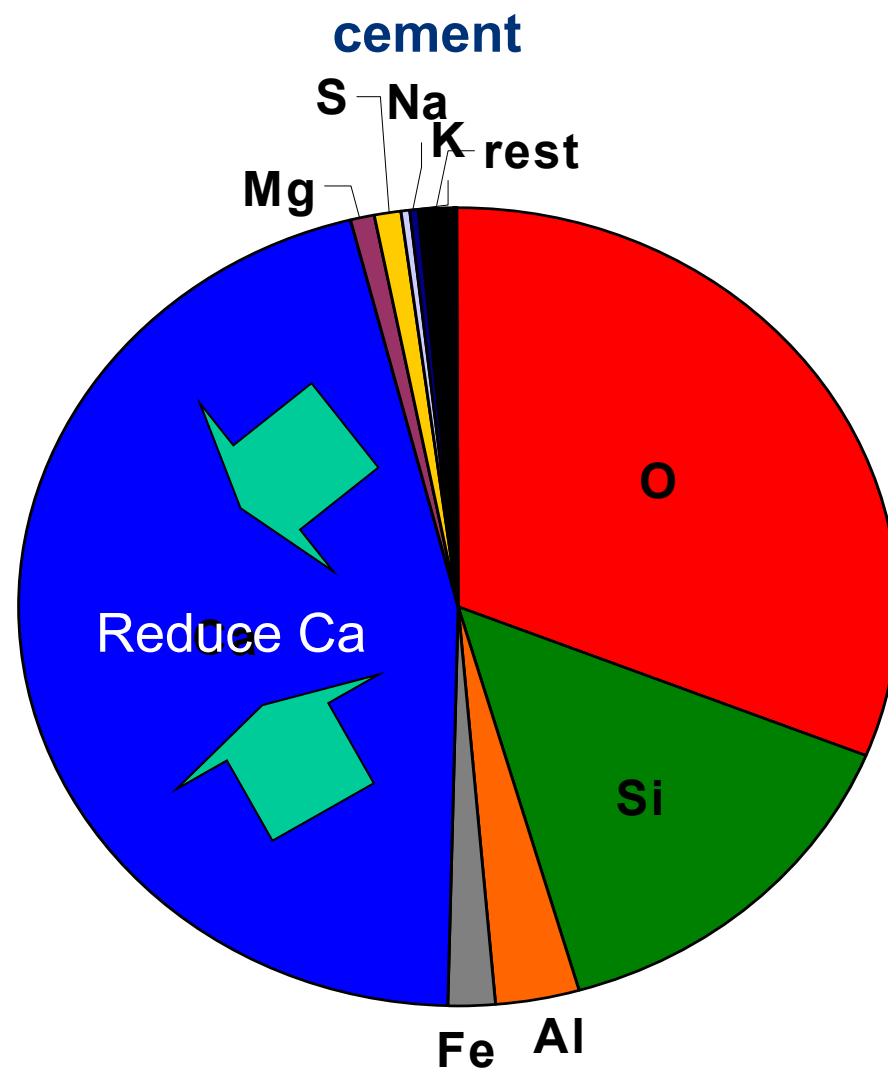
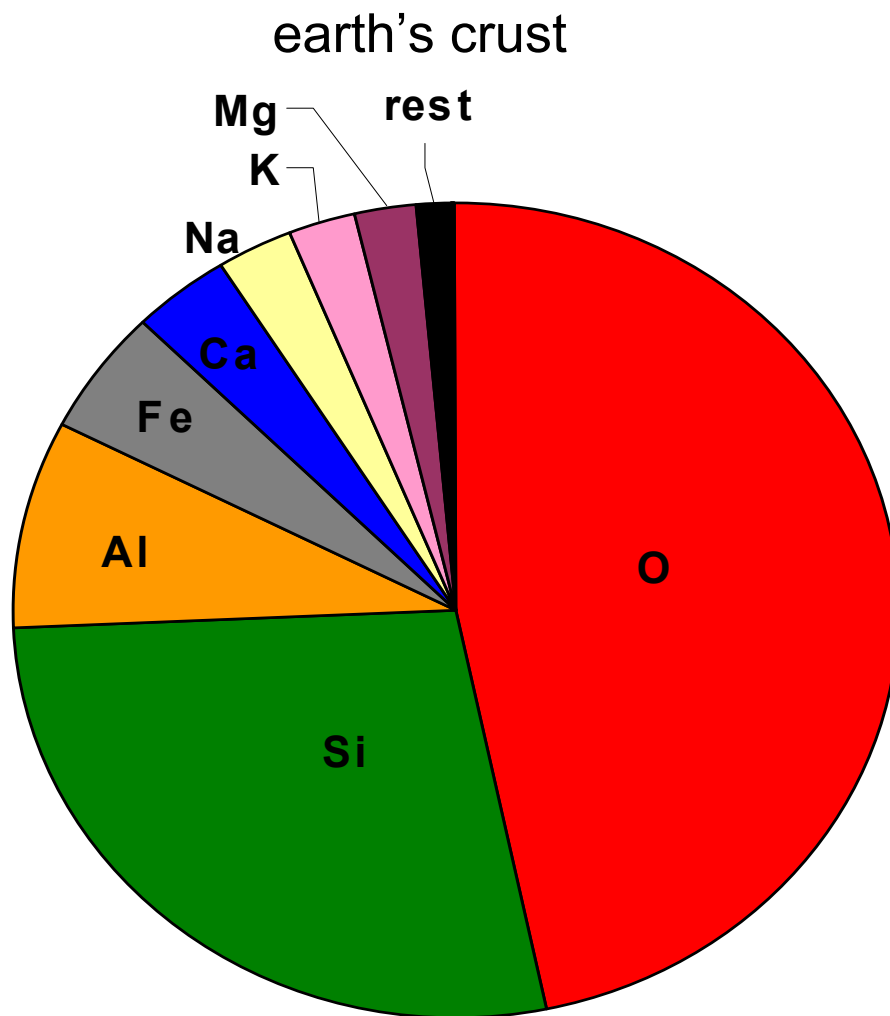
100% "green" concrete

Environmental perspective - organics

- Destruction of organic molecules in two French plants

Plant type	Organic Compounds	% destruction
Tower furnace	Xylene	> 99,997
	Dichlorobenzene	> 99,999
	Sulphur Hexafluoride	> 99,997
Grid furnace	Toluene	> 99,997
	Xylene	> 99,999
	O-Dichlorobenzene	> 99,998





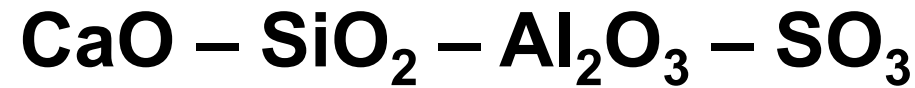
4 promising routes

- 1. greater use of wastes and by-products;**
- 2. new cementitious substitutes;**

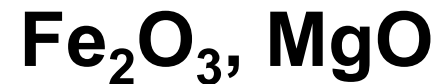
3. alkali activated binders,
4. alternative clinker,

These two are insignificant today, but may become more important in the future

Main system:



Low mobility: (hydration products do not go to fill space between grains)



Alkalis:



Hydraulically reactive minerals

- C_3S 74% CaO
- C_2S 65% CaO
- CA 35%
- $C_4A_3\$ \cong$ 37%
- $(3CA + C\$)$
- $C_{11}A_7 \cdot CaF_2$

More sustainable cement



Clinker

+



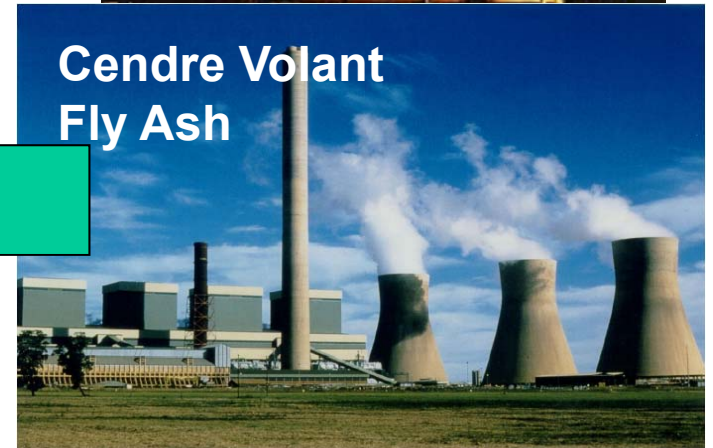
gypsum



Calcaire
limestone

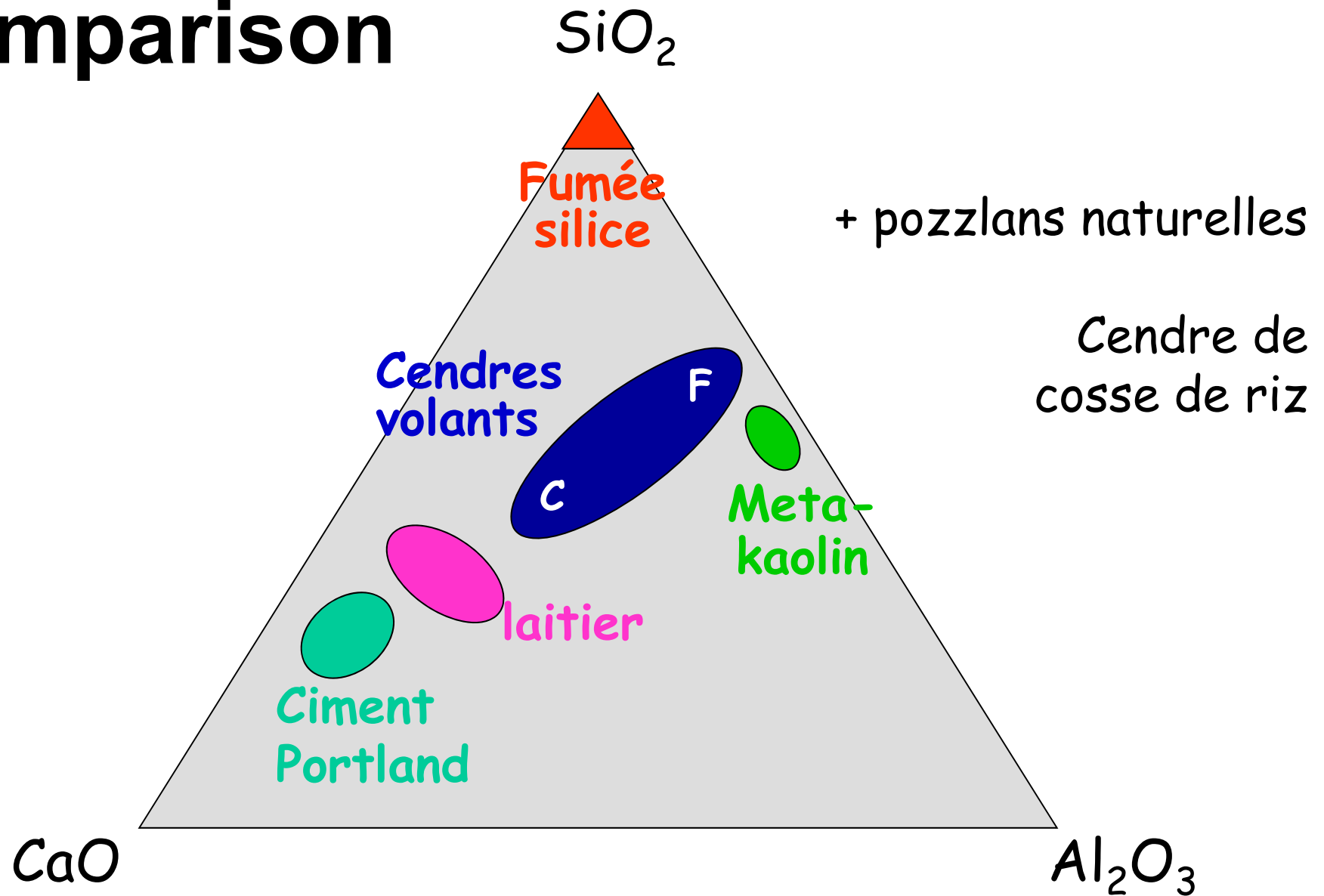


Laitier de haut fourneau
Blast furnace slag



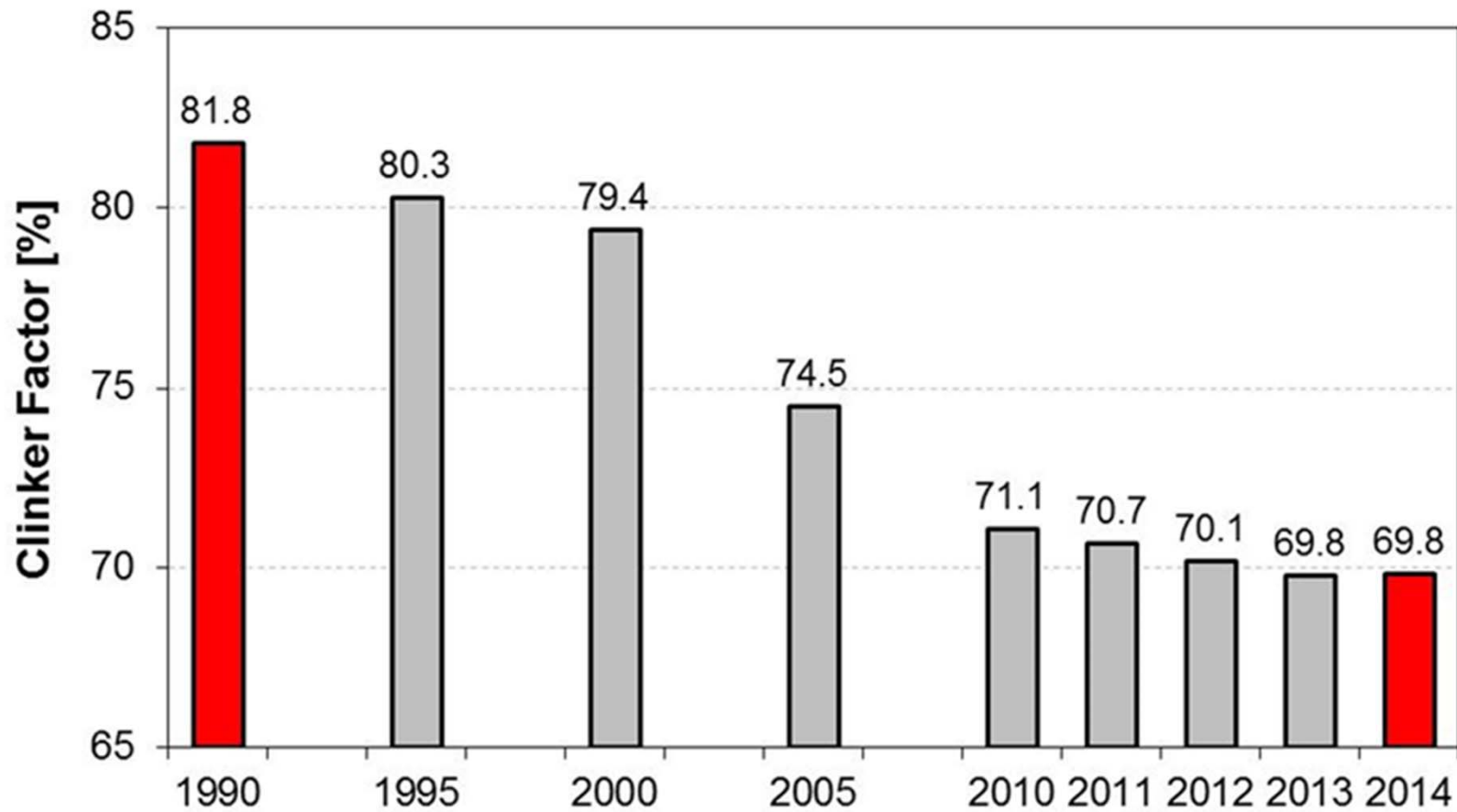
Cendre Volant
Fly Ash

Comparison



Note: disponibilité local

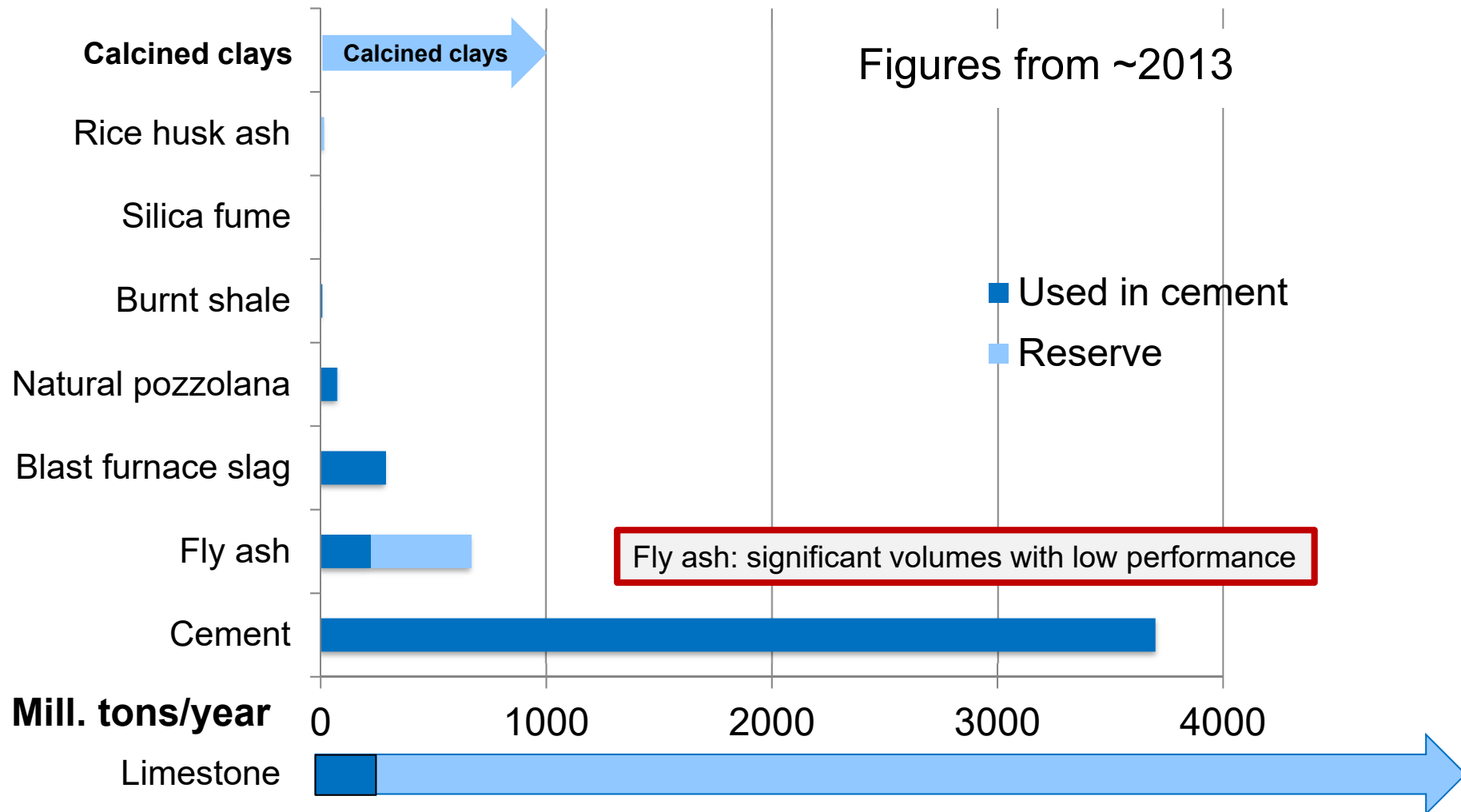
Holcim clinker factor 1990 – 2014



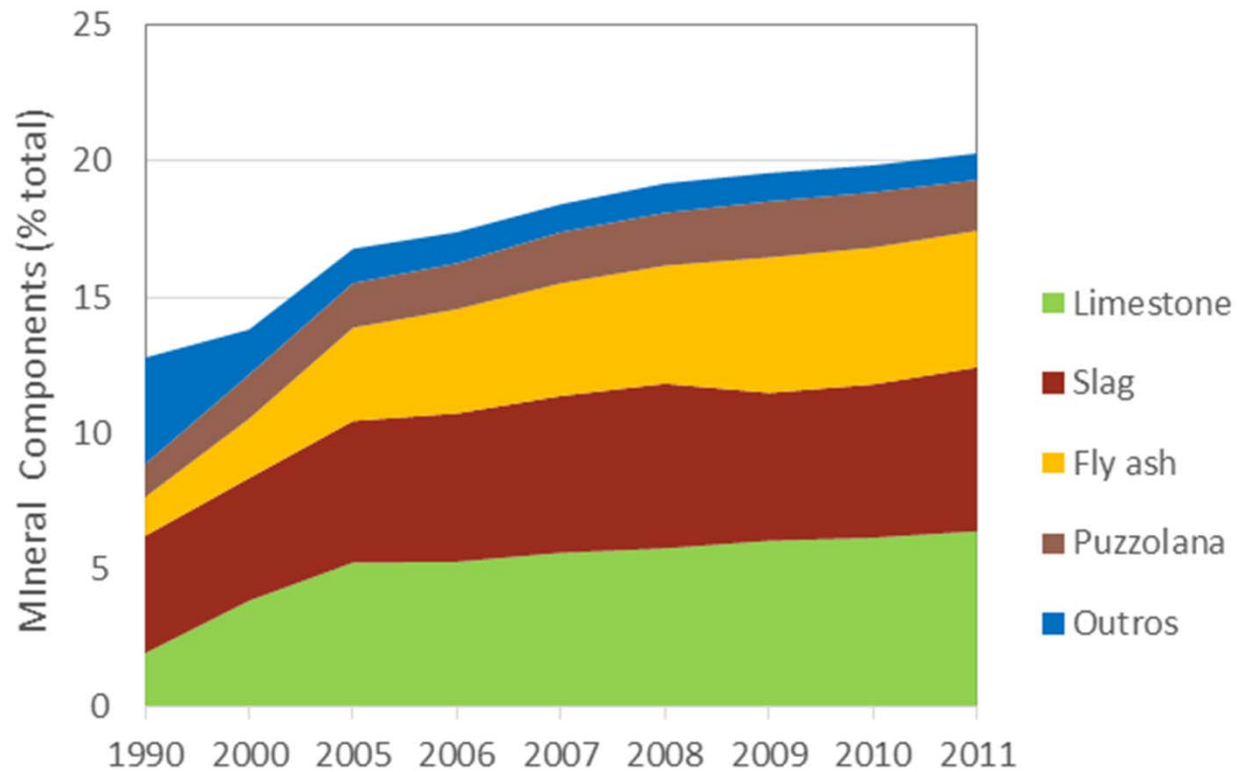
Source, Holcim

But increasing substitution of these materials is reaching a limit due to:

- technical performance
- availability



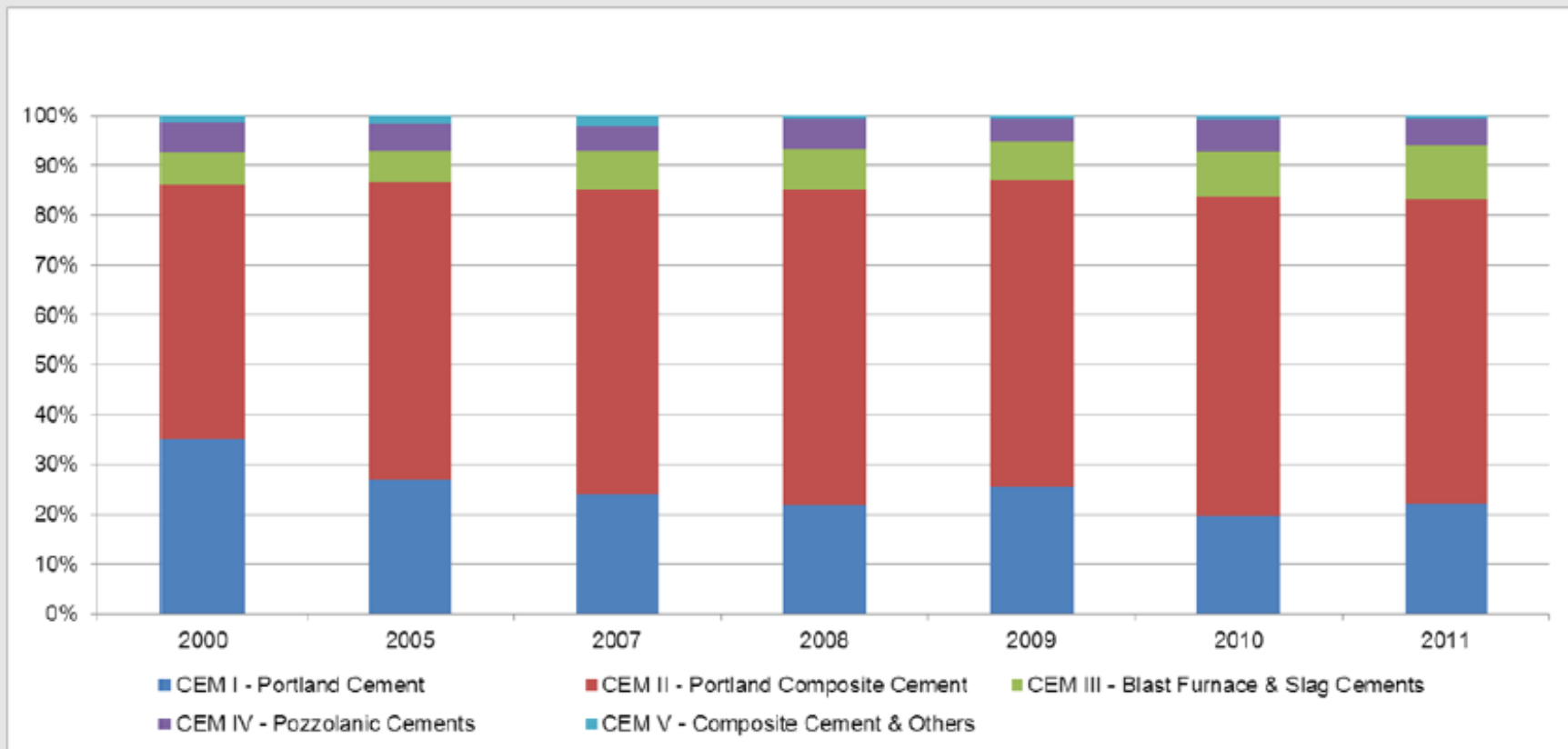
But only 3 main substitutes, worldwide



Classification des principaux types de ciments selon ENV 197-1

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	40-64	36-60	0-5
		V / B	20-39	61-80	0-5

Fig.2: Development of cement portfolio in Europe (EU 27)



Source: Cembureau

Classification des principaux types de ciments selon ENV 197-1

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.

L : inférieure à 0,50 % en masse.

De plus:

- **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))

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	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 R	≥ 10,0	-				
42,5 N	≥ 10,0	-				
42,5 R	≥ 20,0	-				
52,5 N	≥ 20,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
52,5 R	≥ 30,0	-				
			≥ 52,5	-	≥ 45	

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

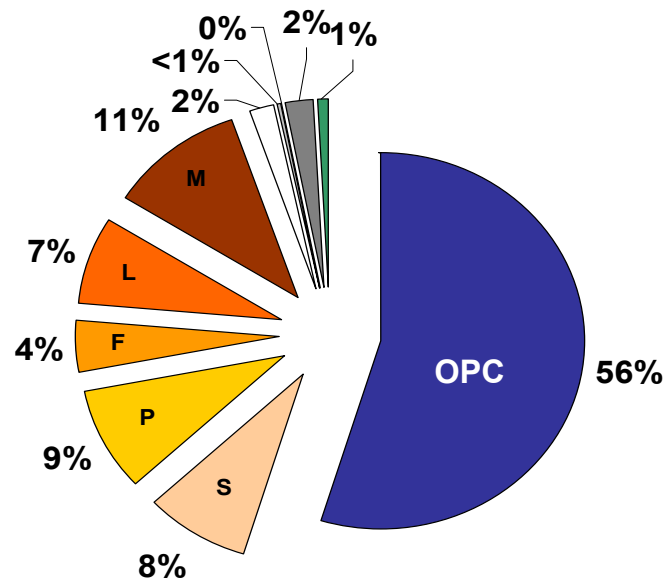
Gamme de ciments en Suisse

Type de ciment	Livraison 2012 (source: cemsuisse)	utilisation
CEM II / A-LL 42.5N	50%	Bâtiment standard
CEM II / B-M(T-LL) 42.5N (Optimo)	30%	Bâtiment standard (réduction de la teneur en clinker)
CEM I 42.5 N (Normo 4)	12%	Bâtiment standard
CEM I 52.5R (Normo 5)	5%	Préfabriqué / hivers

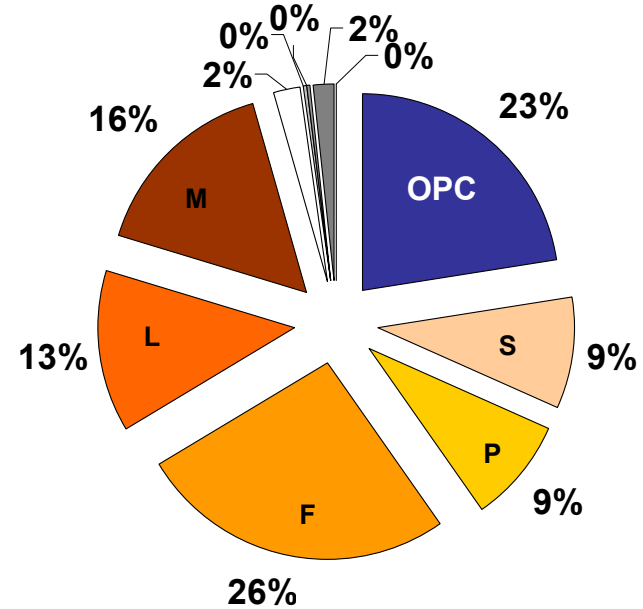
<http://www.holcim.com/referenceprojects/greater-building-sustainability-with-holcim-optimo.html>



Cement types produced by Holcim 1995 - 2010



1995



2010

■ Ordinary Portland Cement

■ S Slag Cement

□ Masonry Cement

■ P Pozzolan Cement

■ Oilwell Cement

■ F Fly Ash Cement

■ White Cement

■ L Limestone Cement

■ Special Binder

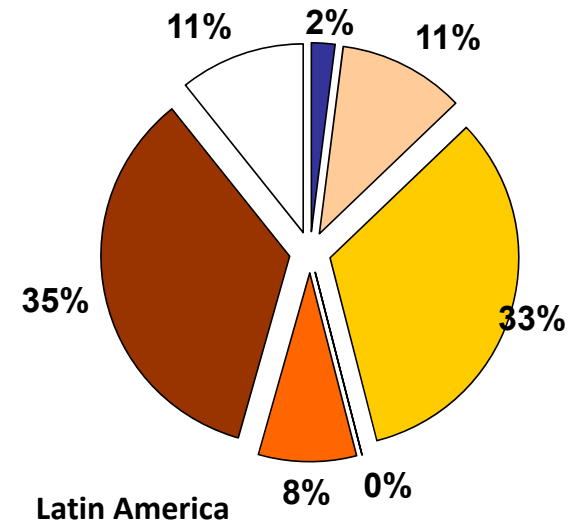
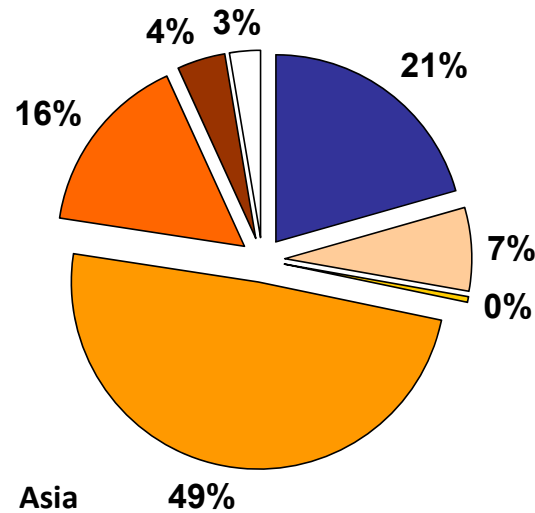
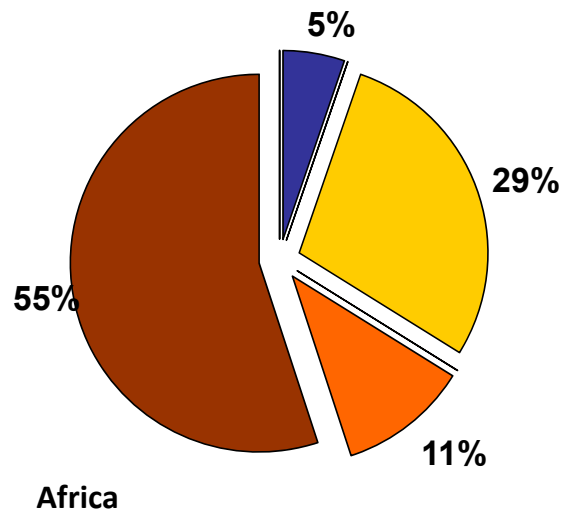
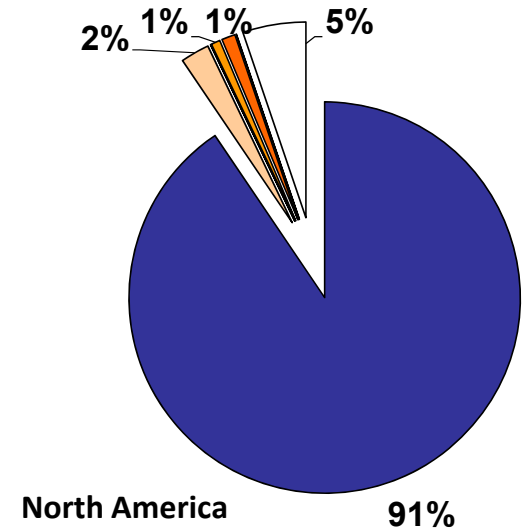
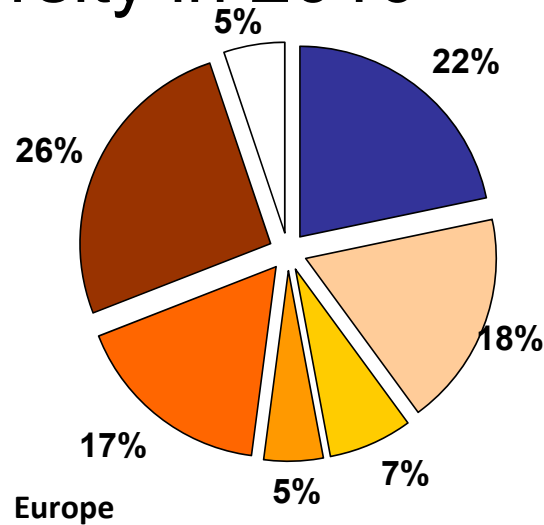
■ M Multiple Blend Cement

■ MIC & Other Cem. Materials

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

Ce qu'il faut retenir

- **C=CaO, S=SiO₂, A=Al₂O₃, F=Fe₂O₃**
- **4 phases dans clinker – C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF**
- **Dominance de C₃S ~ deux tiers**
- **Pendant le broyage ajout de ~4-5% CaSO₄.2H₂O**
- **Contrôle de réactivité par la finesse**
- **Aujourd'hui beaucoup de ciments mélangés – ajouts de calcaire, laitier, etc.**
- **Présence de < 1% des alkalis (K₂O, Na₂O) qui sont des impuretés, mais jouent un rôle important**