
Fabrication du ciment

Prof. Karen Scrivener
Laboratoire des Matériaux de Construction

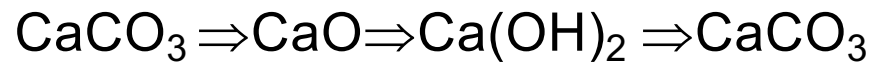


Sommaire

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.

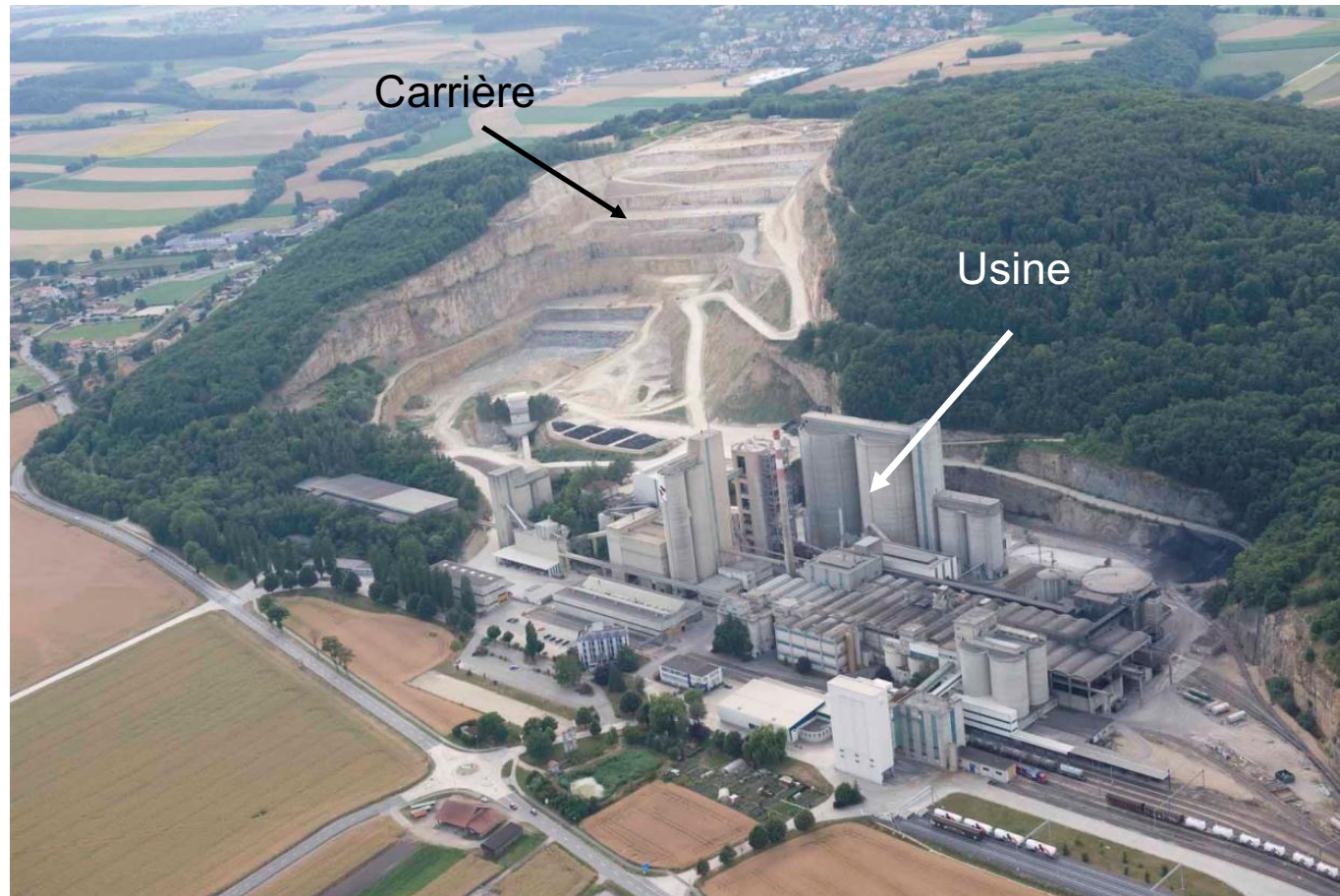


2. Production du ciment en Suisse

Suisse

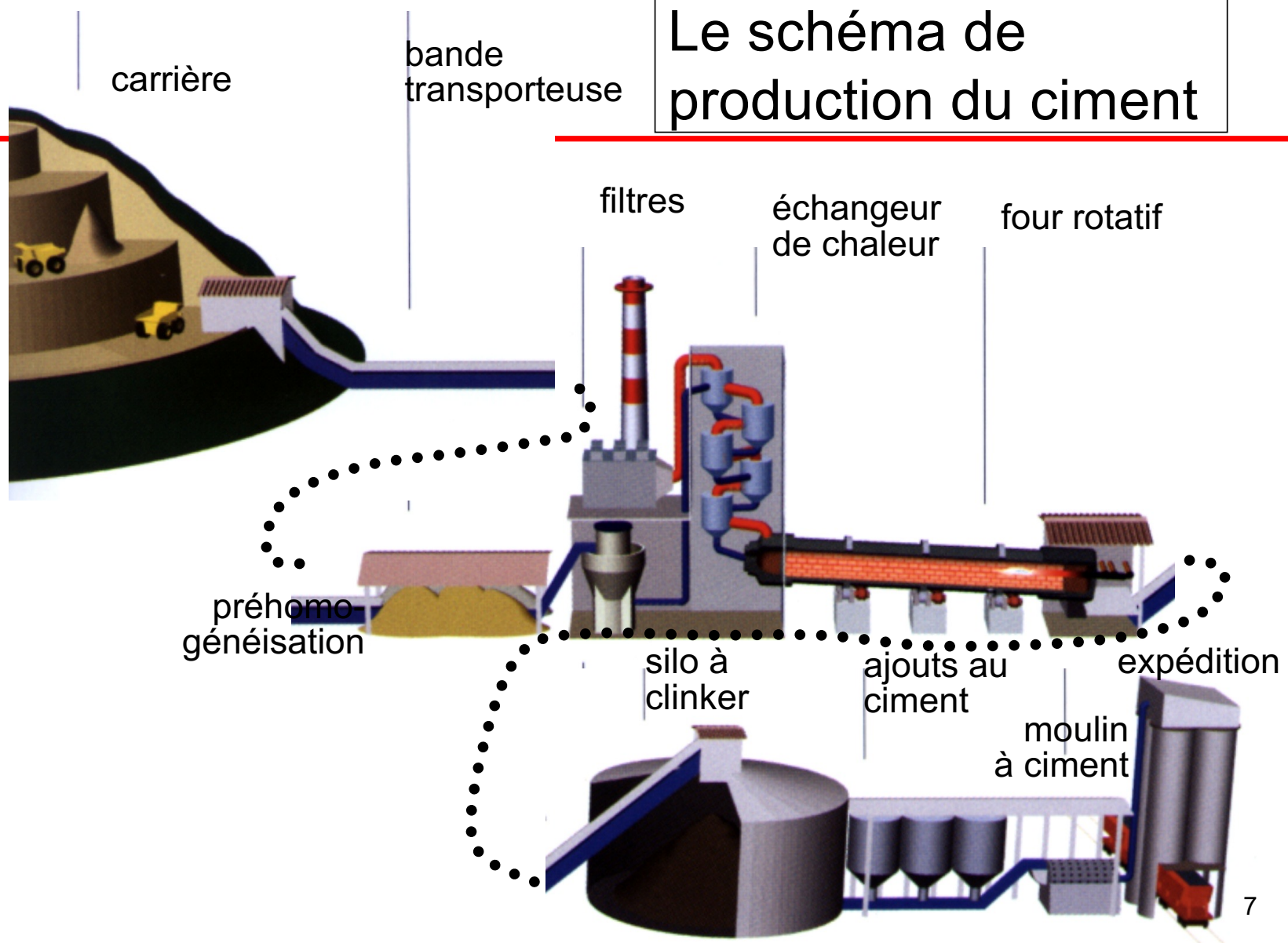


2. Production du ciment



Lafarge Holcim – Usine Eclepens

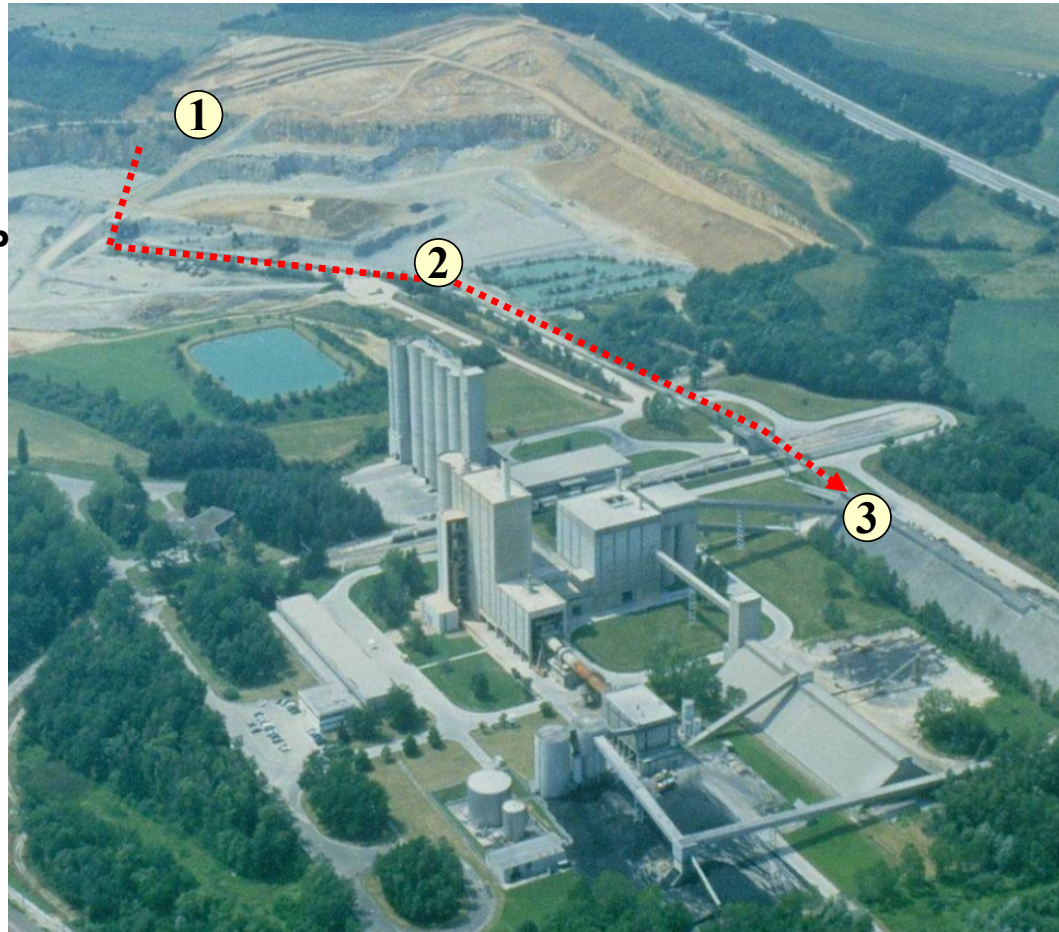
Le schéma de production du ciment



La fabrication du ciment – le processus

1- Extraction

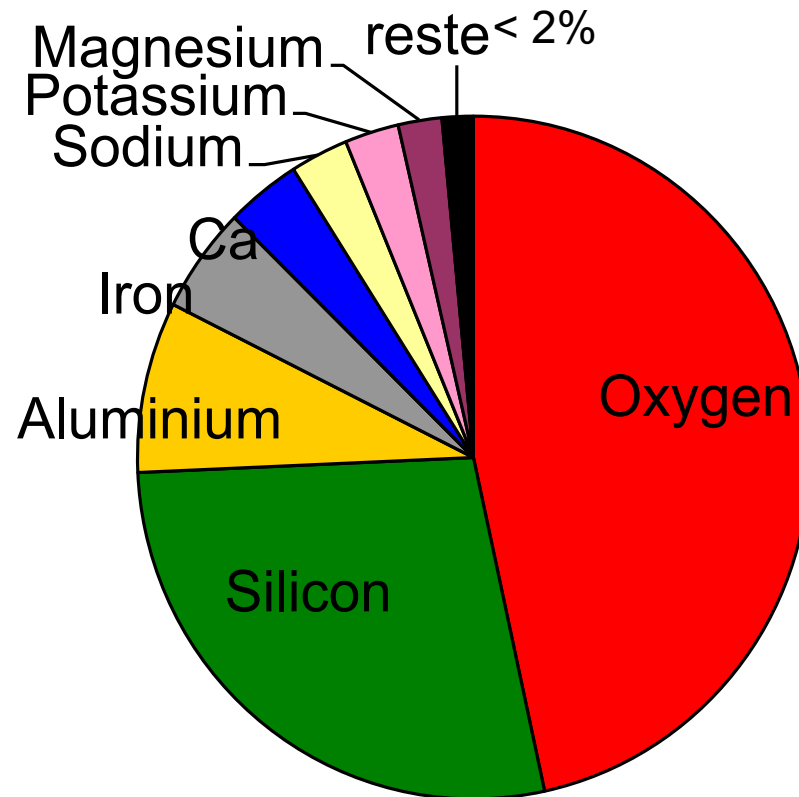
2- Transport MP



.....> cru

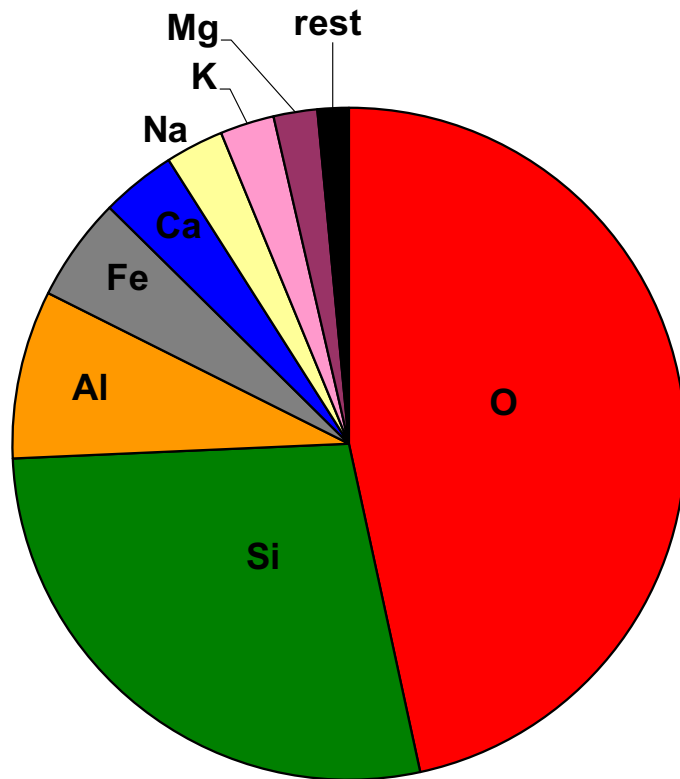
3-Préhomogénéisation

Composition de la croûte terrestre

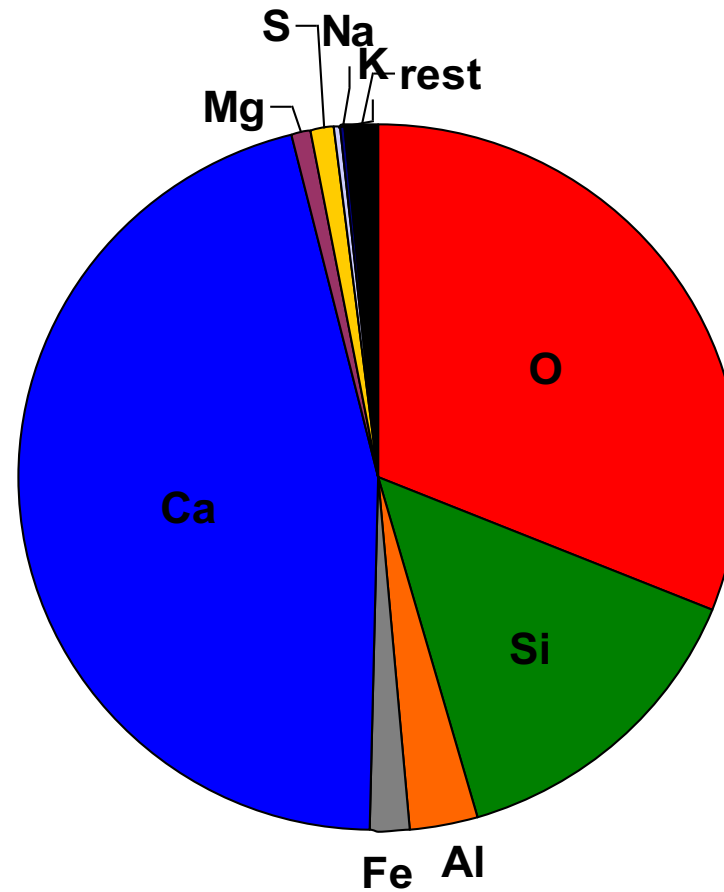


- Grande abondance des éléments nécessaires
- Malgré la quantité plus faible de calcium, cet élément est fortement concentré dans les roches calcaires, bien réparti

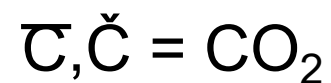
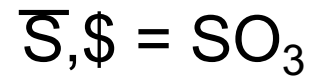
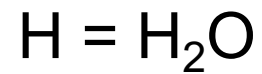
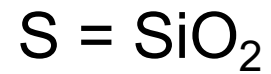
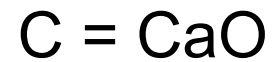
Composition
de la croute terrestre



Composition
du ciment

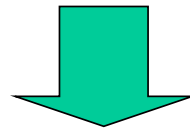


Notation chimiques

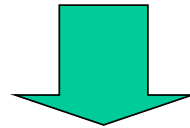


Composition

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



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



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

2.1. La carrière

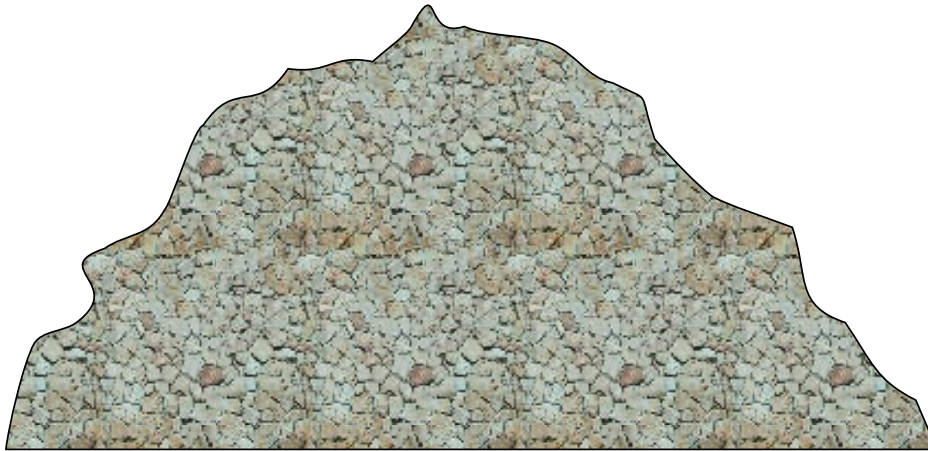
Calcaire (80%)



Argiles (20%)



2.2. Composition du Cru (generale)



Calcaire

~80% roches calcaires

Jusqu'à 95% CaCO_3

~55% **CaO**

impuretés majeures MgO

bonne source de calcaire
détermine emplacements
des usines de ciment

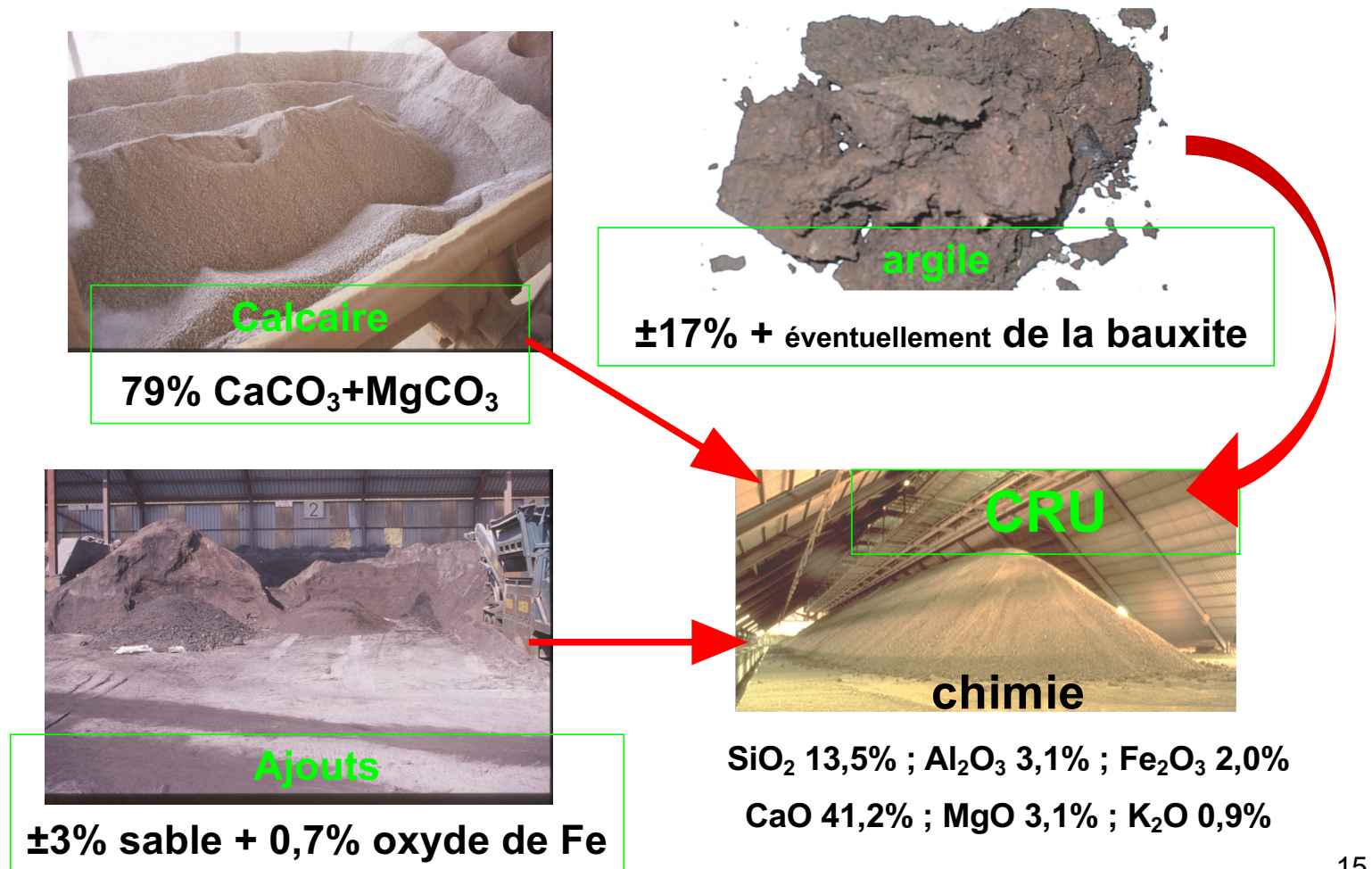
Argile



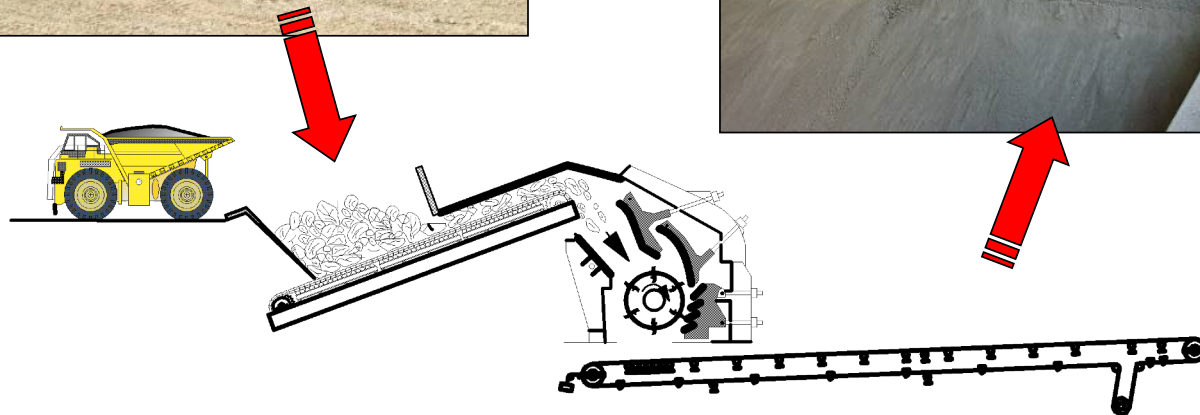
20% source de **SiO_2** qui amène
aussi **Al_2O_3** et **Fe_2O_3** , etc.

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

2.2. Composition de Cru (exemple)

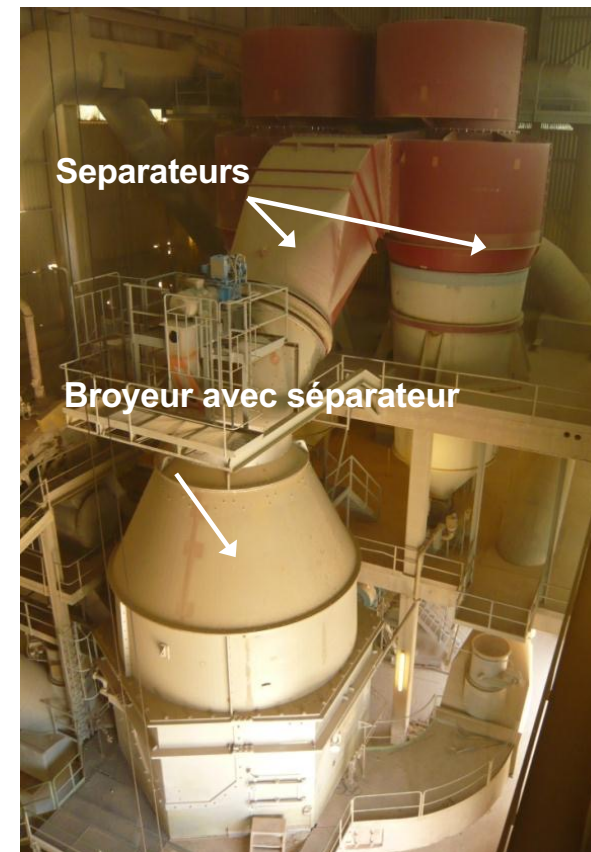
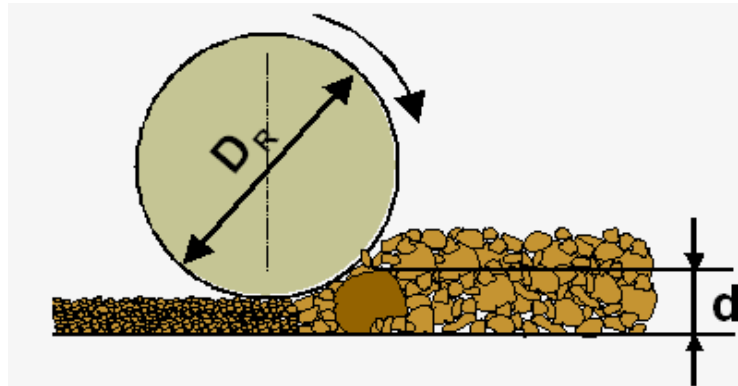


2.2. Formation du cru



2.2. Formation du Cru

20-100 μm finesse



Cement Plant Eclépens, 2018

A l'intérieur d'un moulin à farine

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

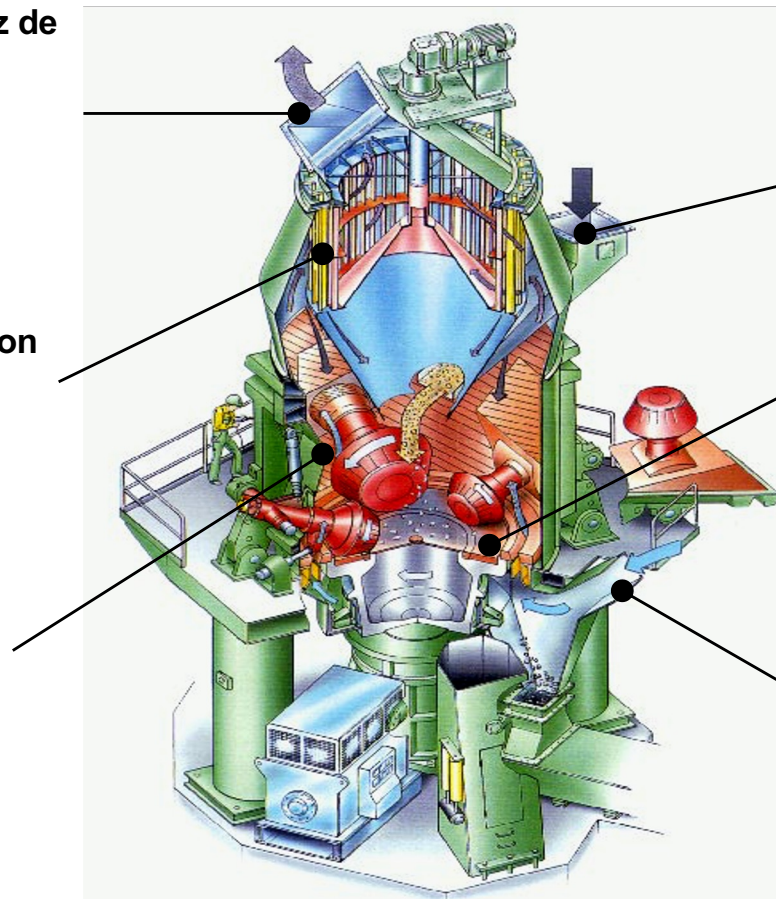
5 Séparateur = tri des grains en fonction de leur dimension

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



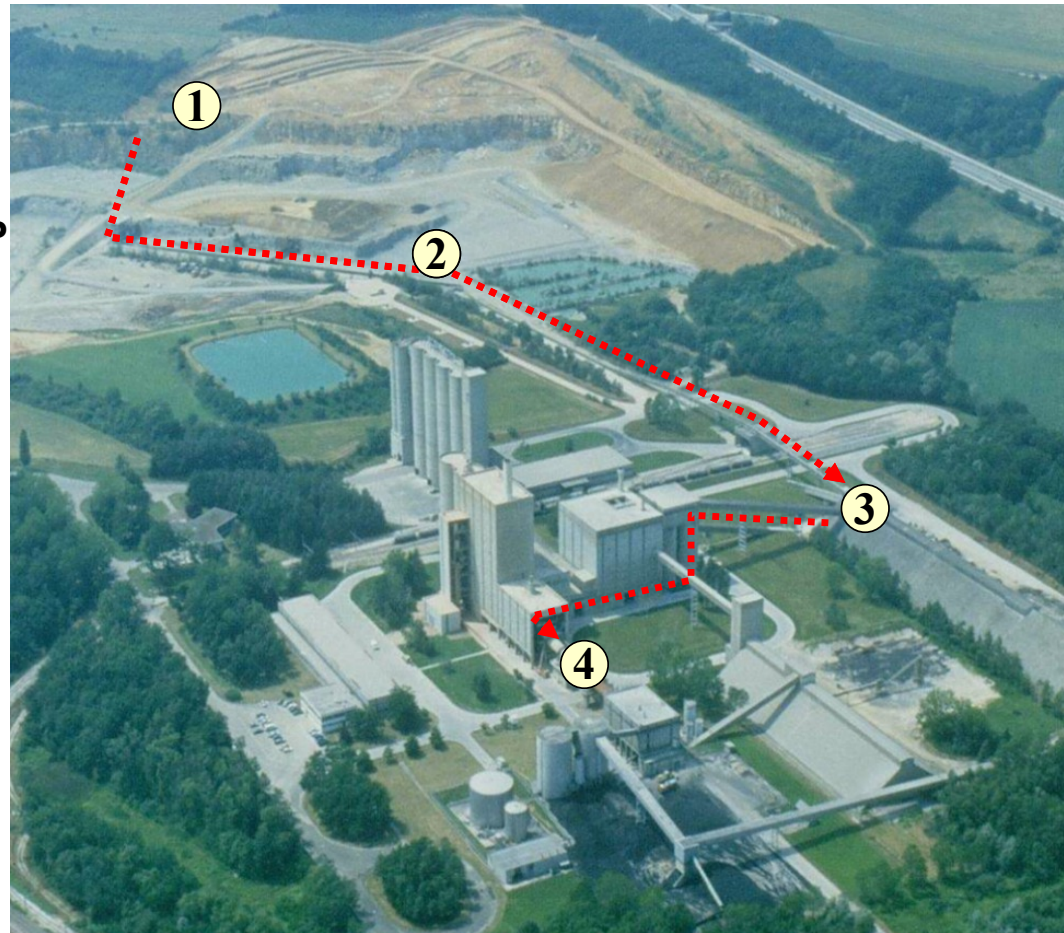
Lafarge Holcim

2.2. Formation du cru

1- Extraction

2- Transport MP

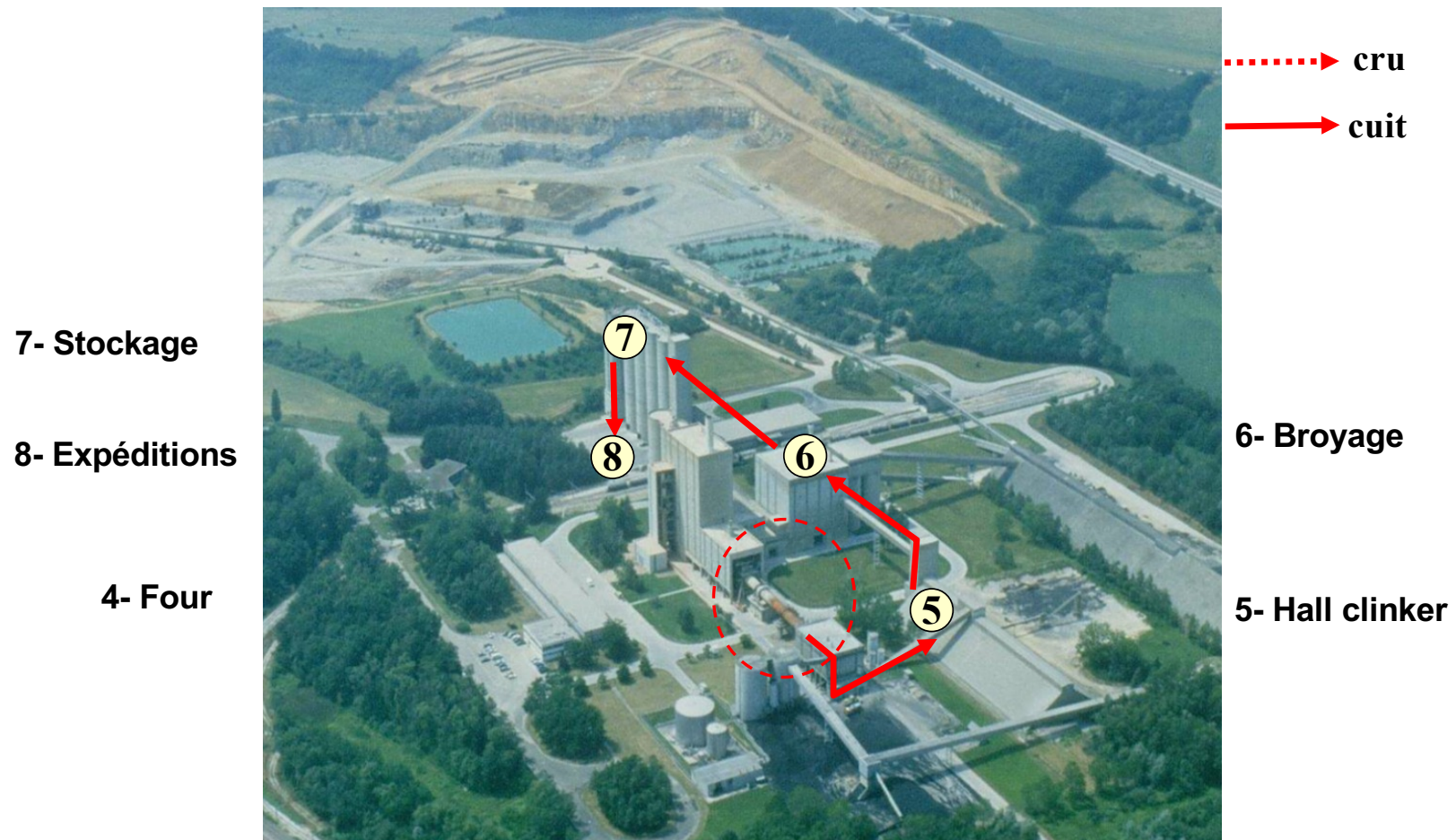
4- Four

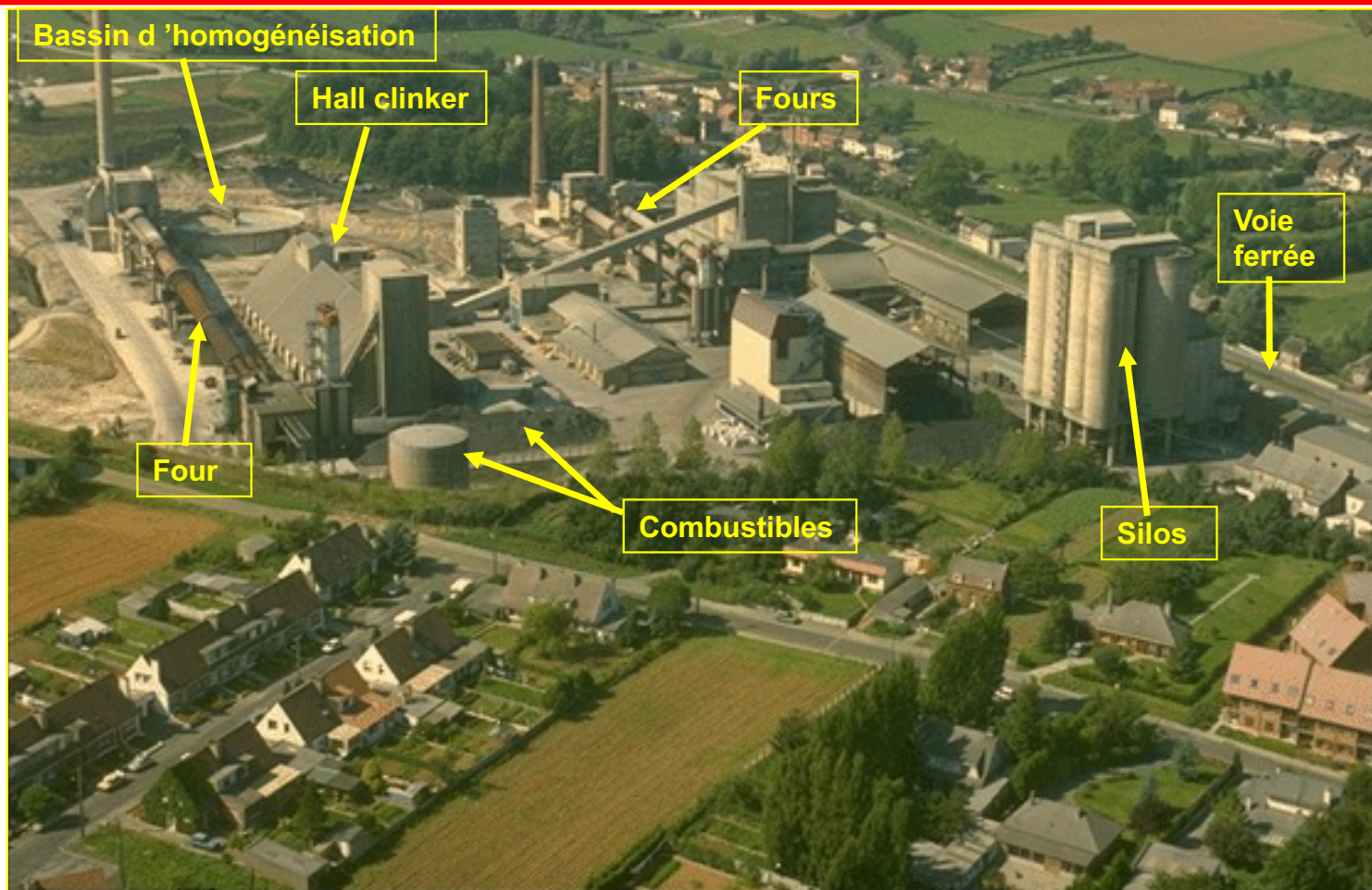


.....> cru

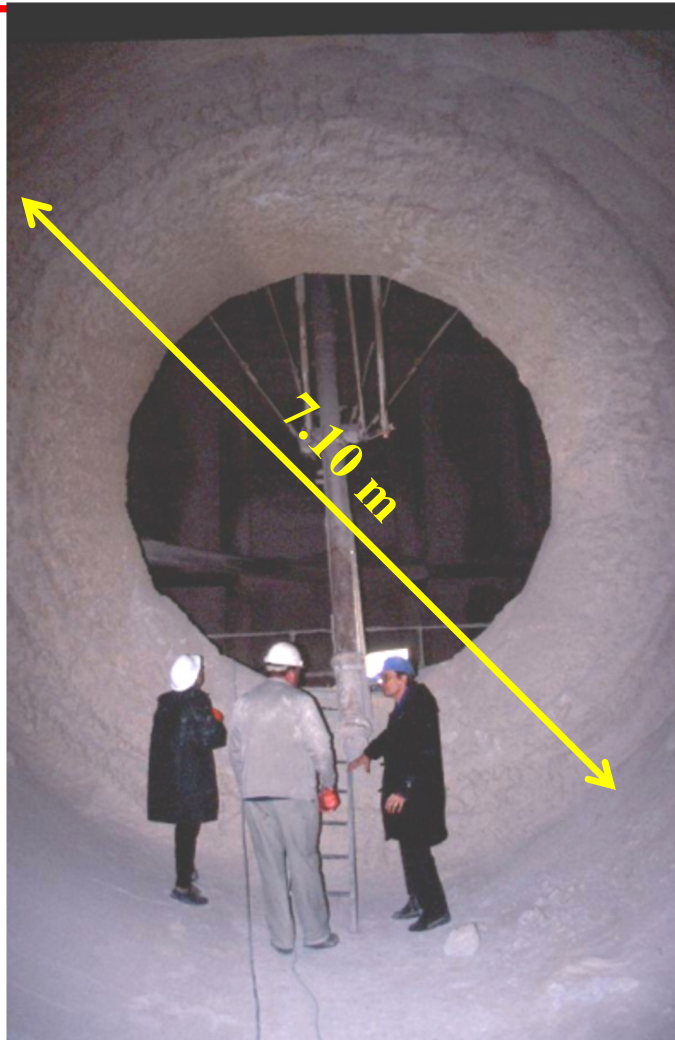
3-Préhomogénéisation

2.3. Formation du clinker: four











2.3. Formation du clinker: four

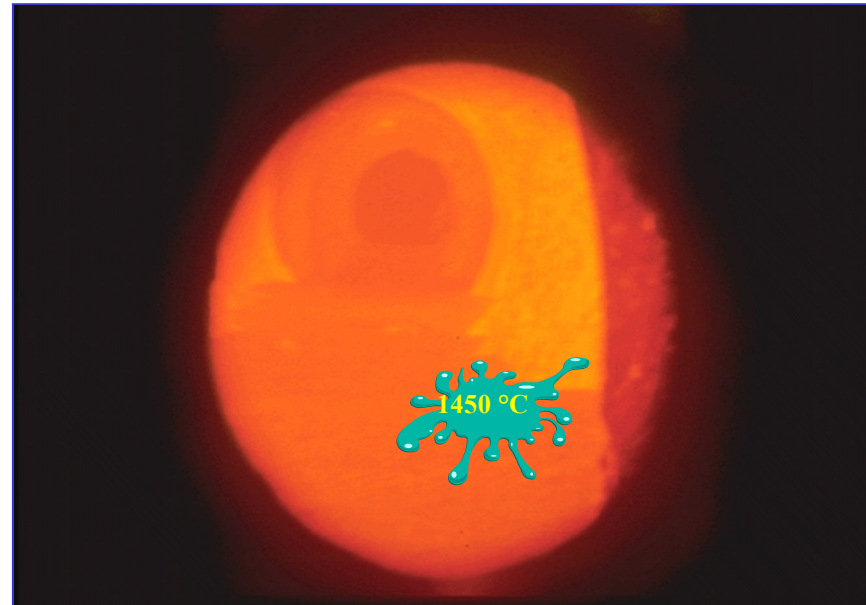
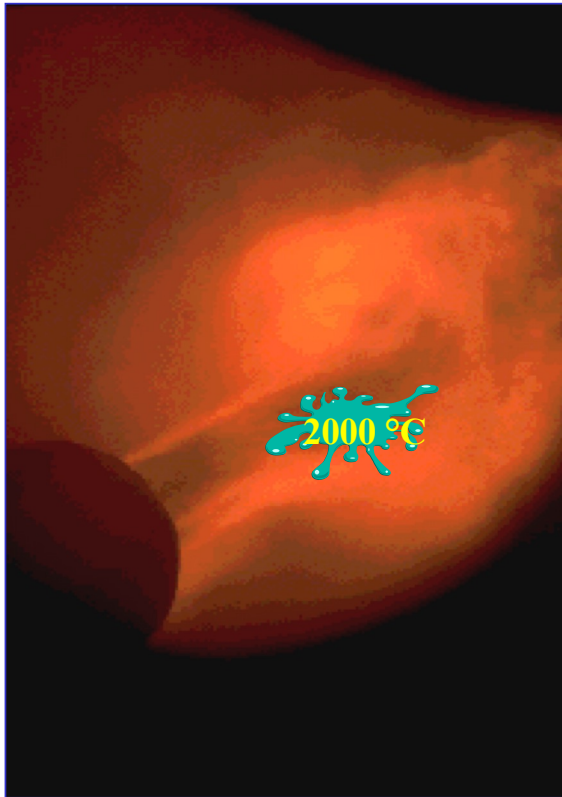


Tourne 24/24h !

Données du Four d'Eclepens

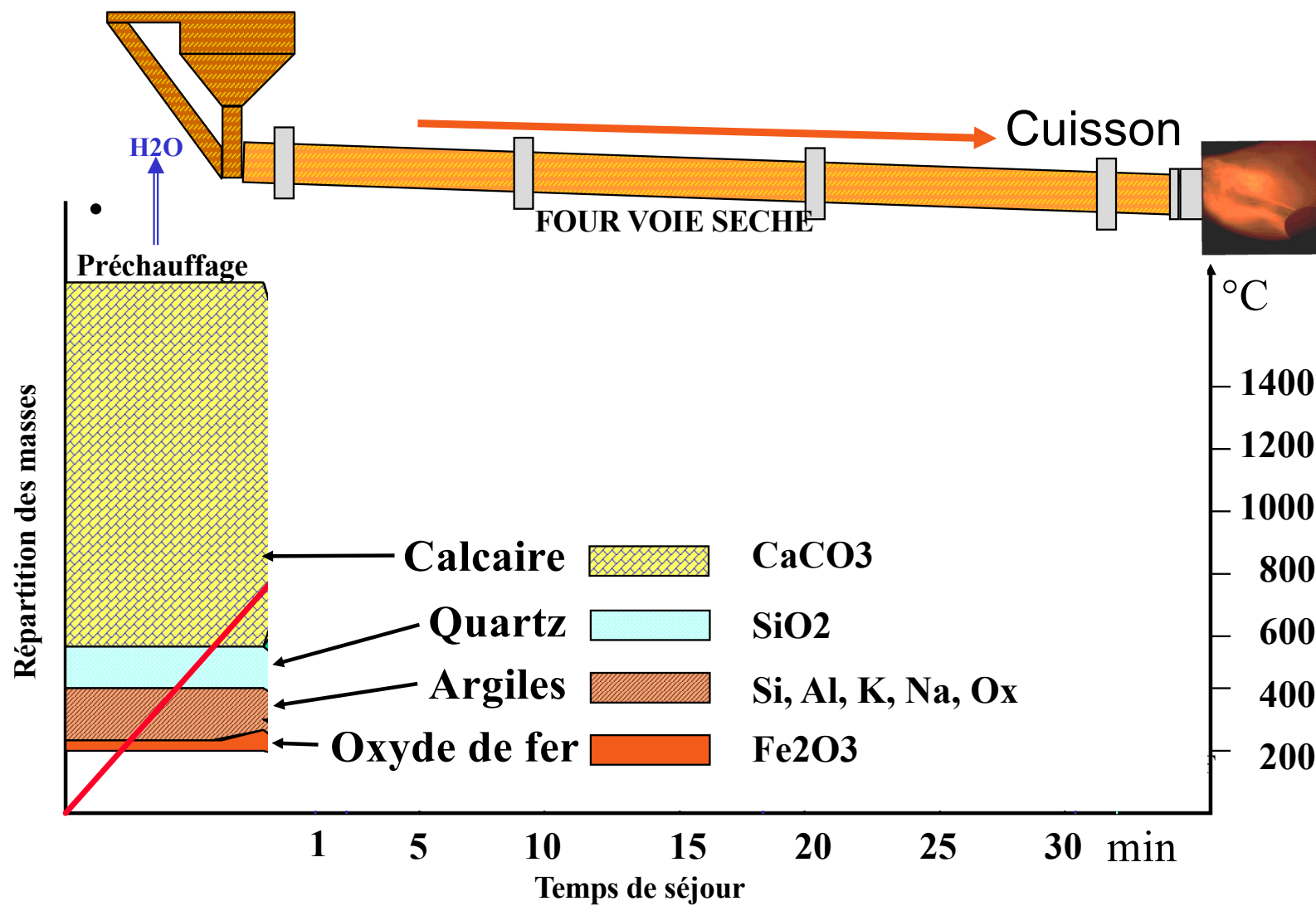
- Capacité: 2'300 t/j
- Longueur: 65m
- Diamètre: 4.35m
- 2.8 revs/ min.

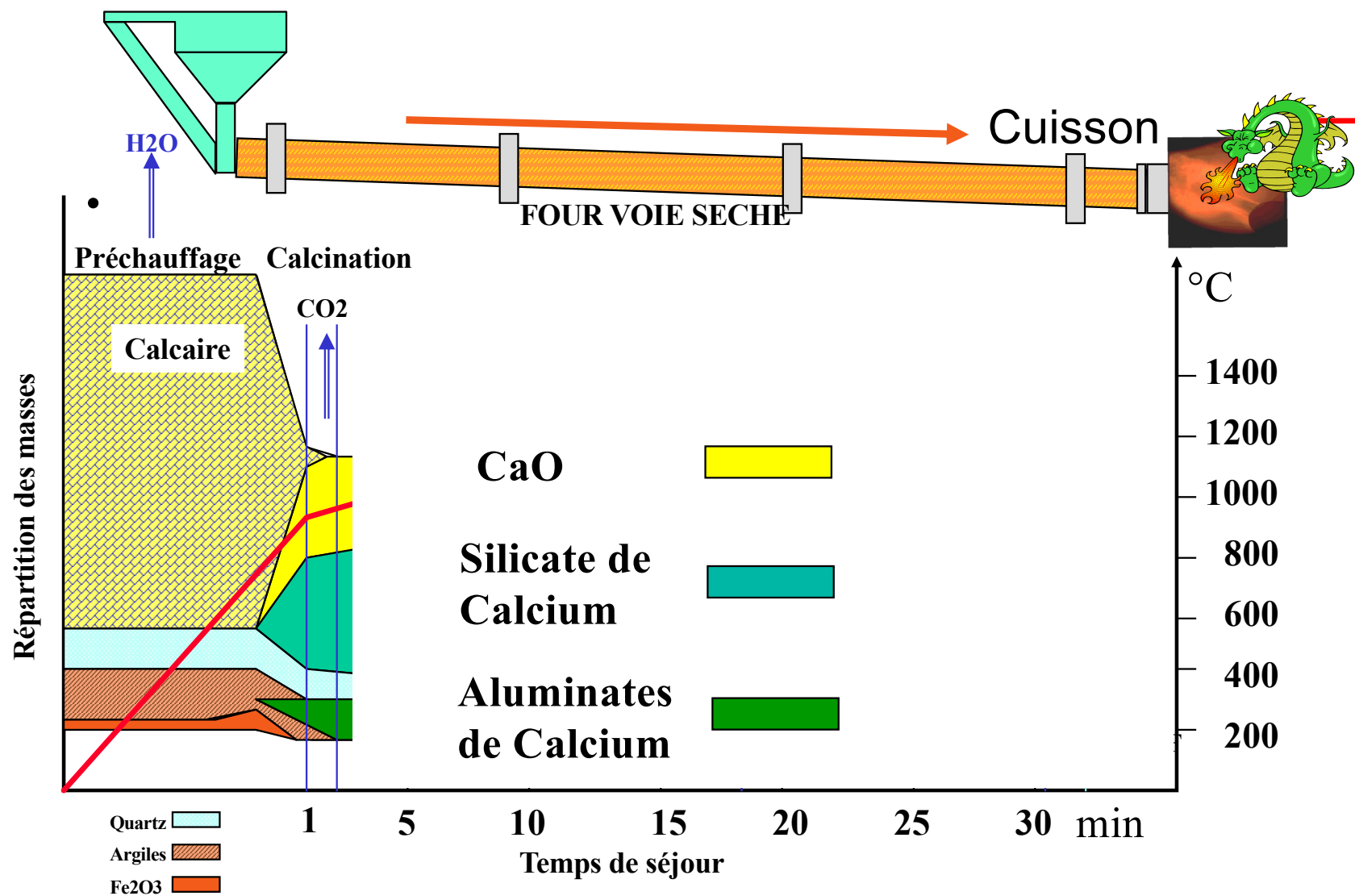
2.3. Formation du clinker: cuisson

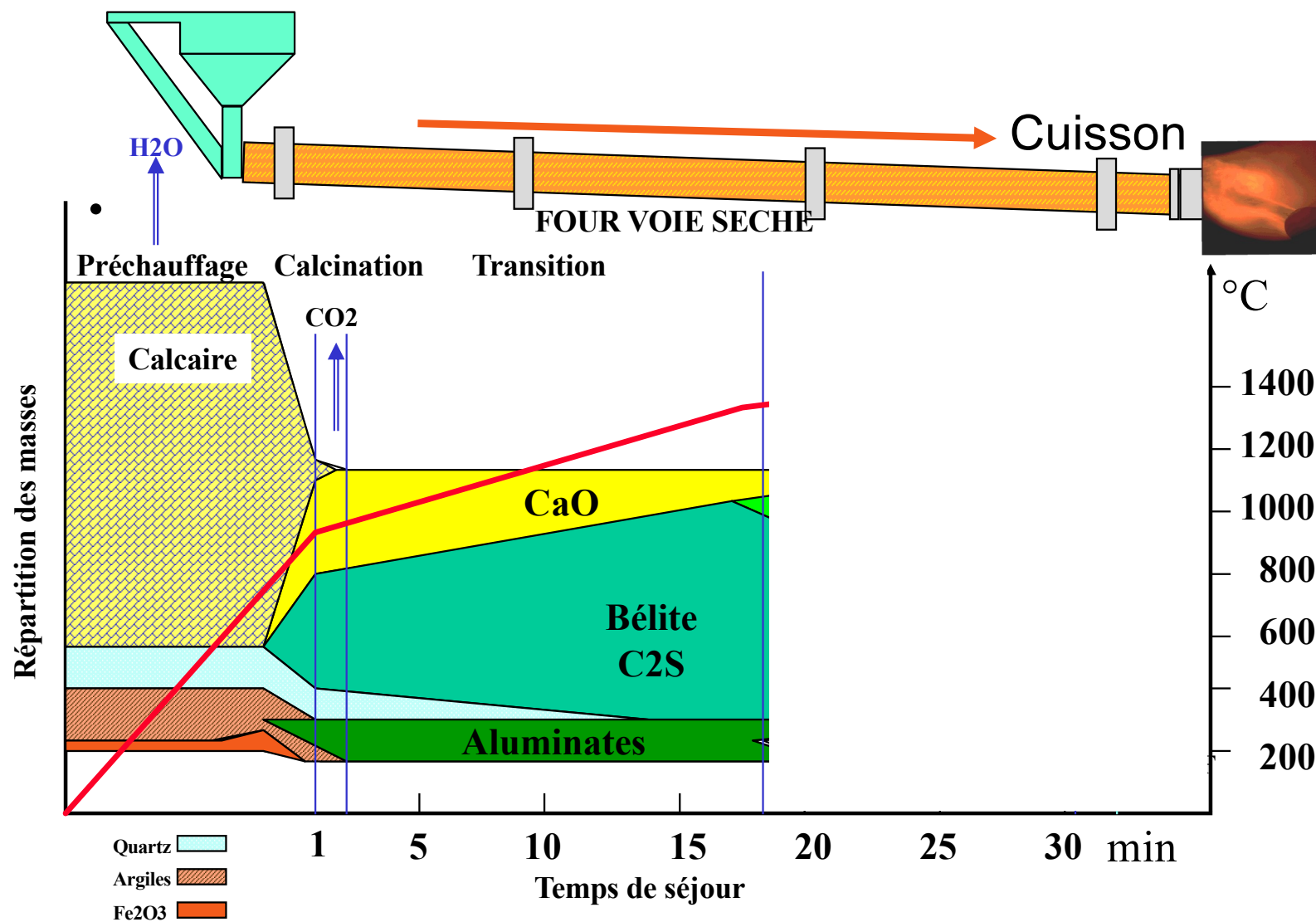


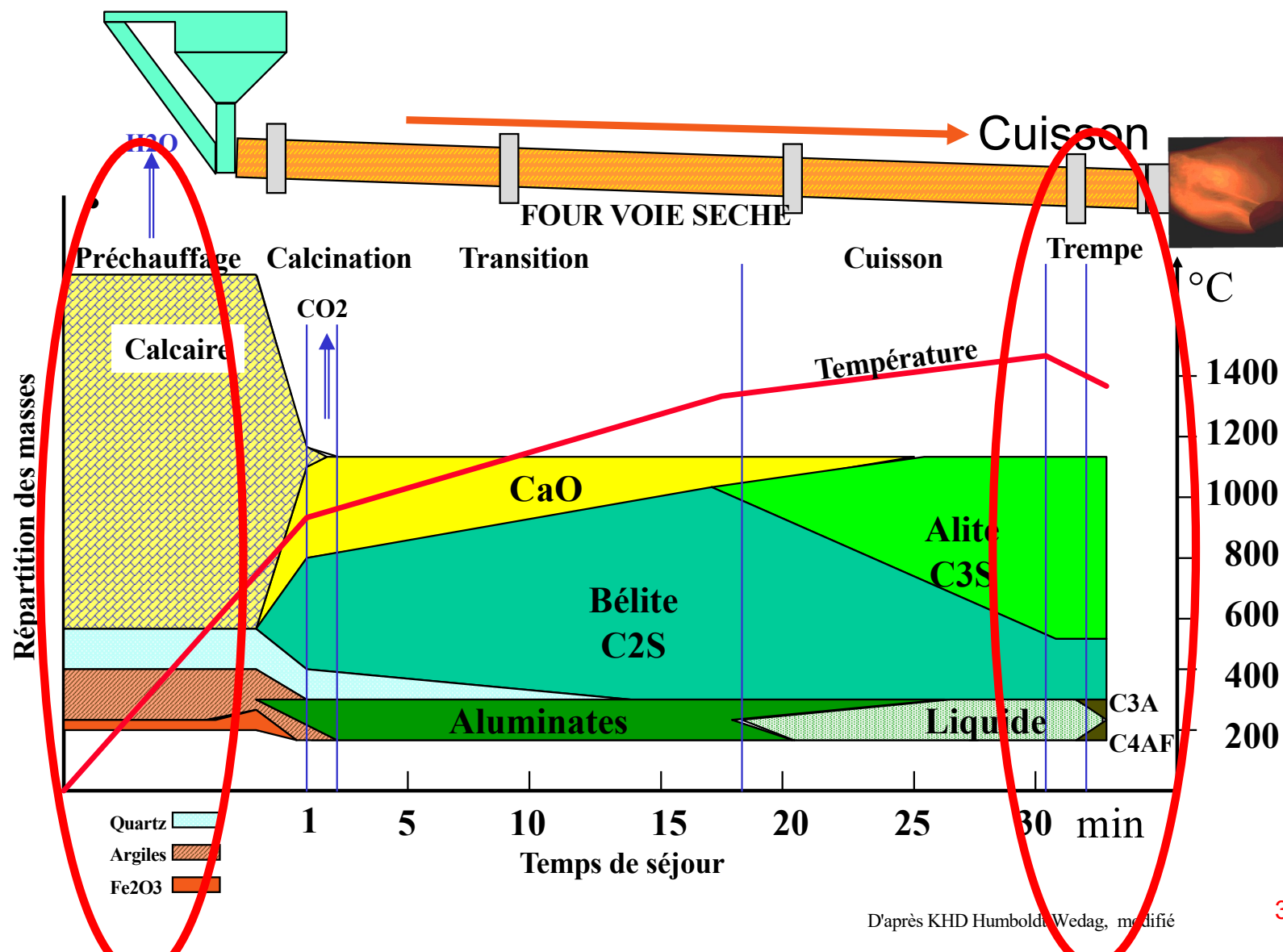
Flamme = 2'000 °C

Matériau = 1'450°C

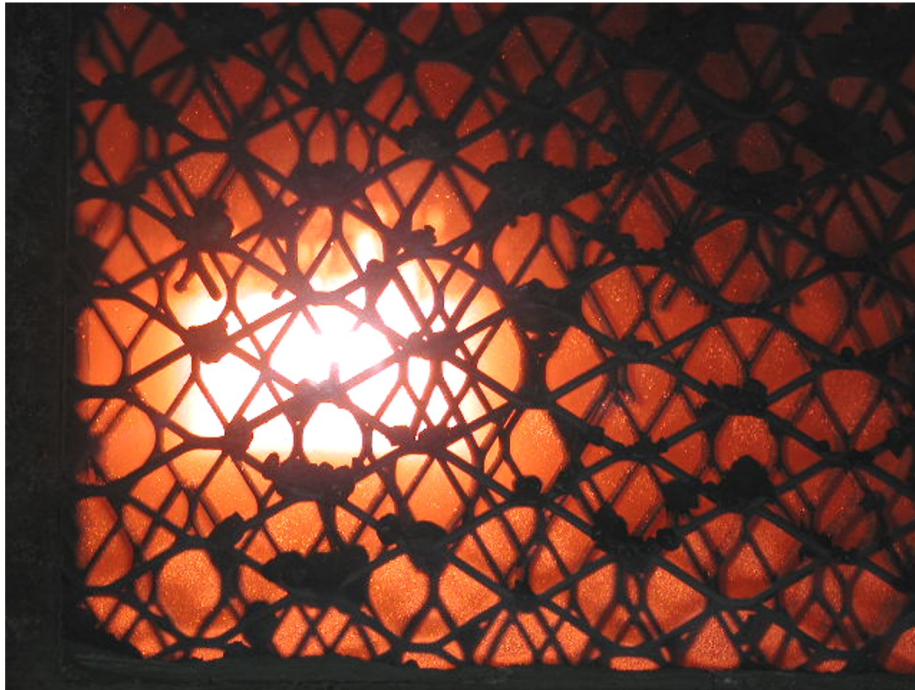




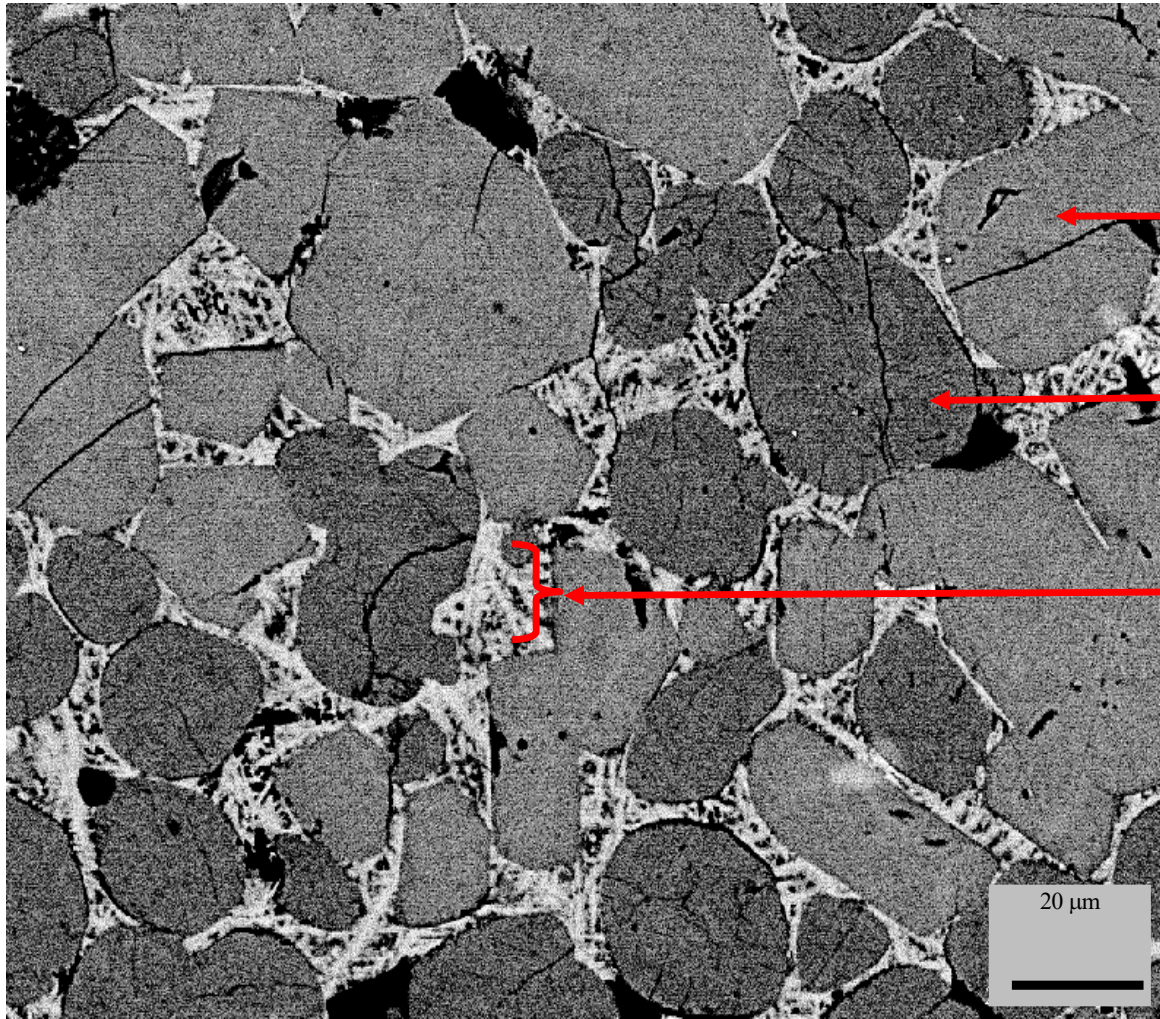




2.3. Formation du clinker: la trempe



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



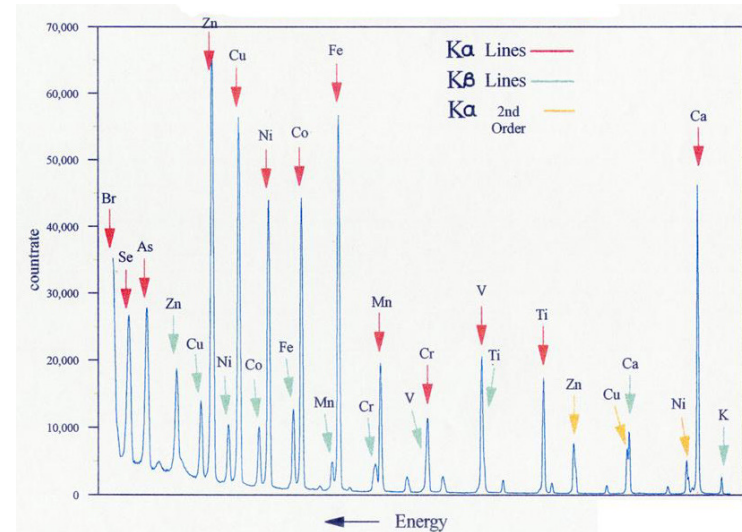
3. Contrôle de la composition du ciment



Techniques: XRF, FRX
Florescence des rayons X

Plus en plus: XRD
Diffraction de rayons X

Echantillonnage automatique

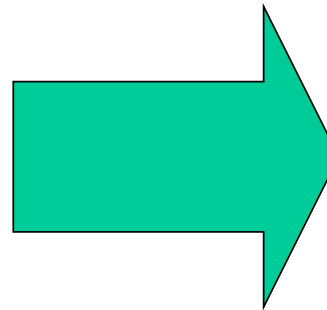


3. Contrôle de la composition du ciment

Analyse oxyde (XRF)

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	?
C4AF	?

☀ Contrôle strict pour éviter le gonflement

3. Contrôle de la composition du ciment

Tous Fe_2O_3 sous la forme C_4AF :
Avec CaO et Al_2O_3



Al_2O_3 qui reste sous la forme C_3A :
Avec CaO



CaO qui reste – CaO libre



Solution de deux
équations simultanées
pour C_3S et C_2S

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

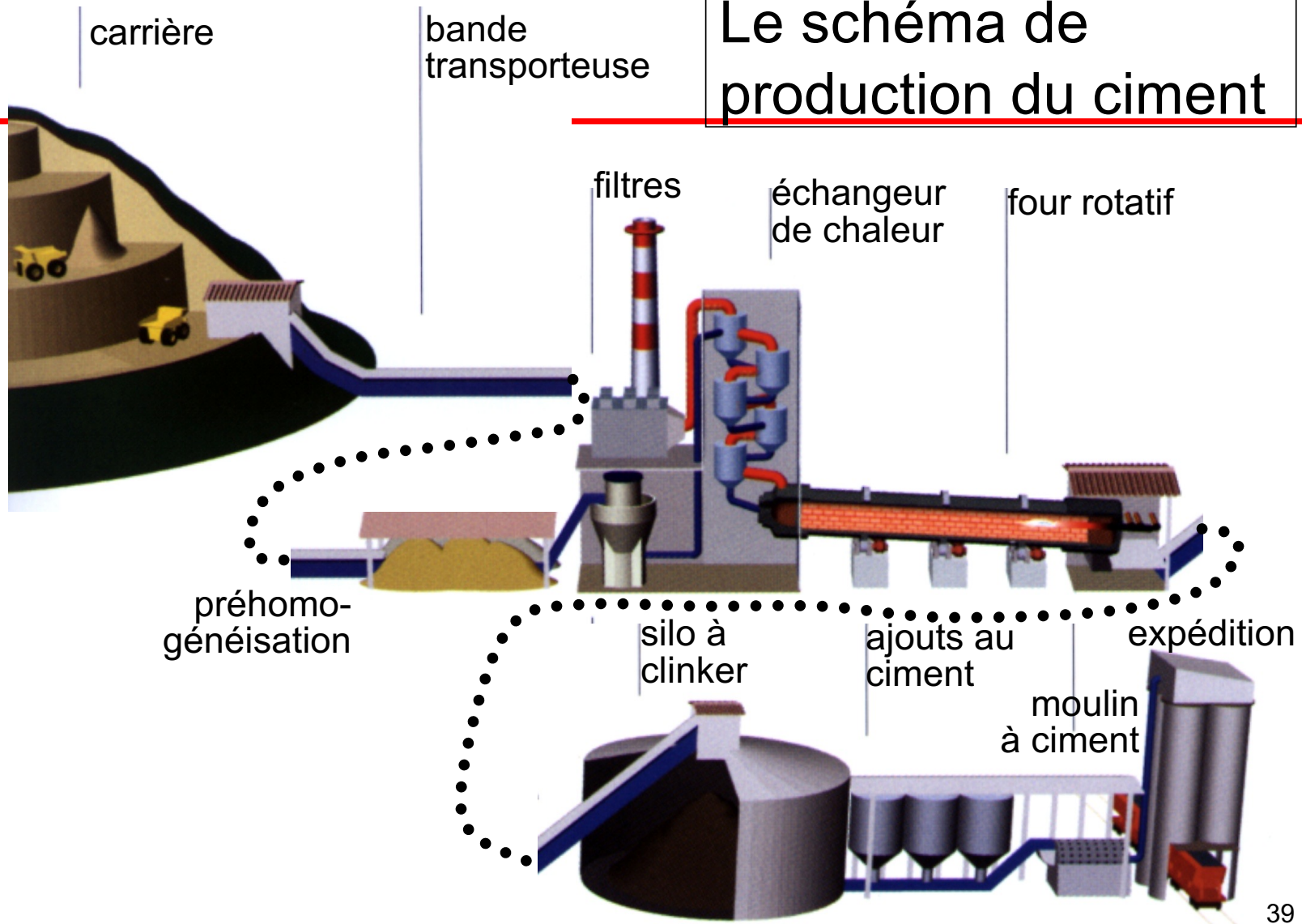
À cause des solutions solides

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

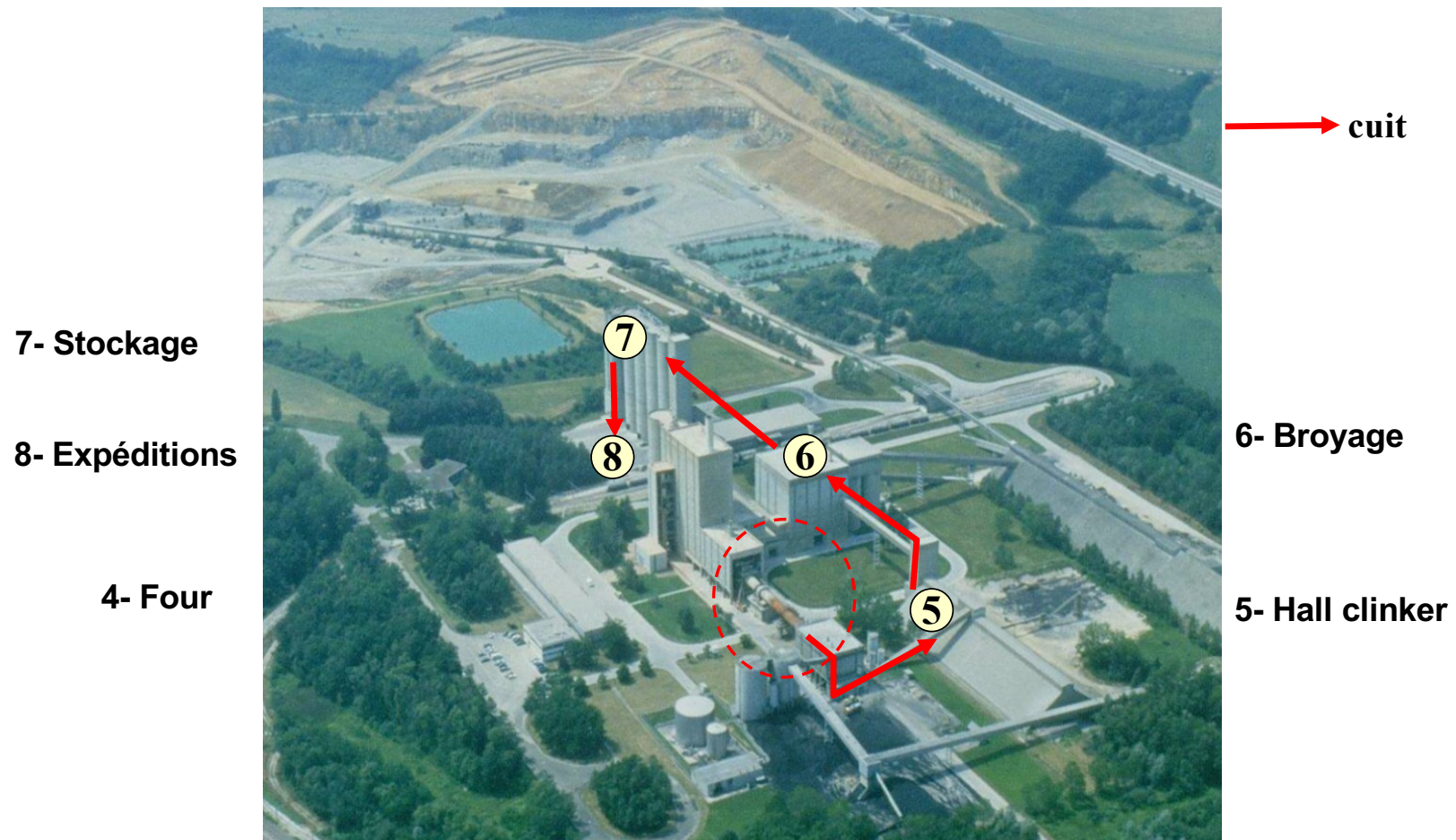
	BOGUE	QXDA
C_3S	59	67
C_2S	13	15
C_3A	9	5
« C_4AF »	9	6

Écarts typiques

Le schéma de production du ciment



2.3. Formation du clinker: broyage



2.4. Manufacture du ciment

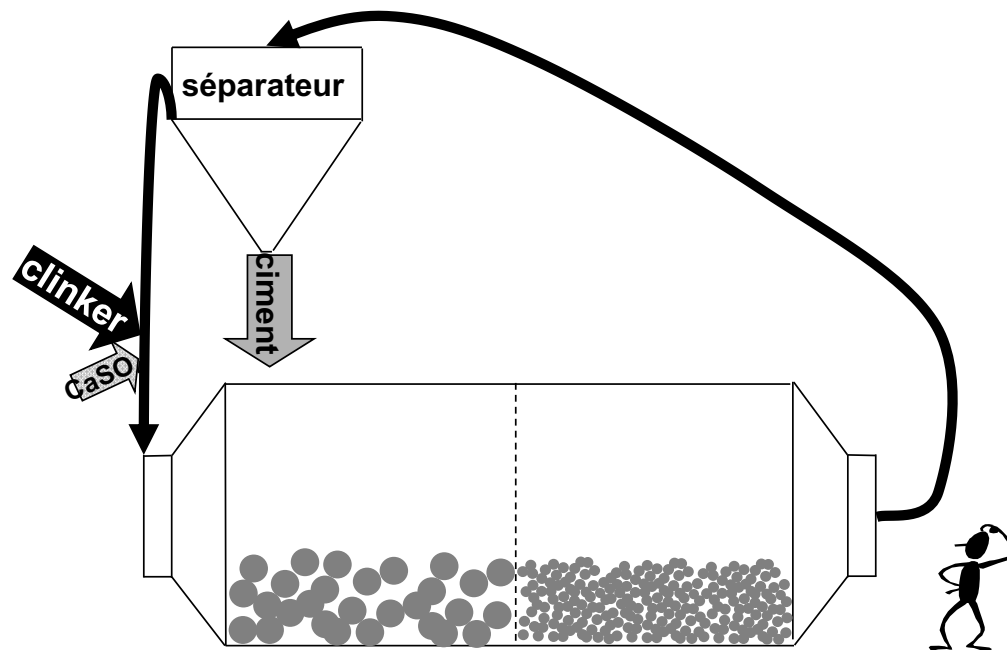


Clinker + Régulateur de prise + Autres constituants (éventuellement)

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



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



2 (ou 3) compartiments

Toujours
Ajout de CaSO_4H_x :
(4 – 8%)

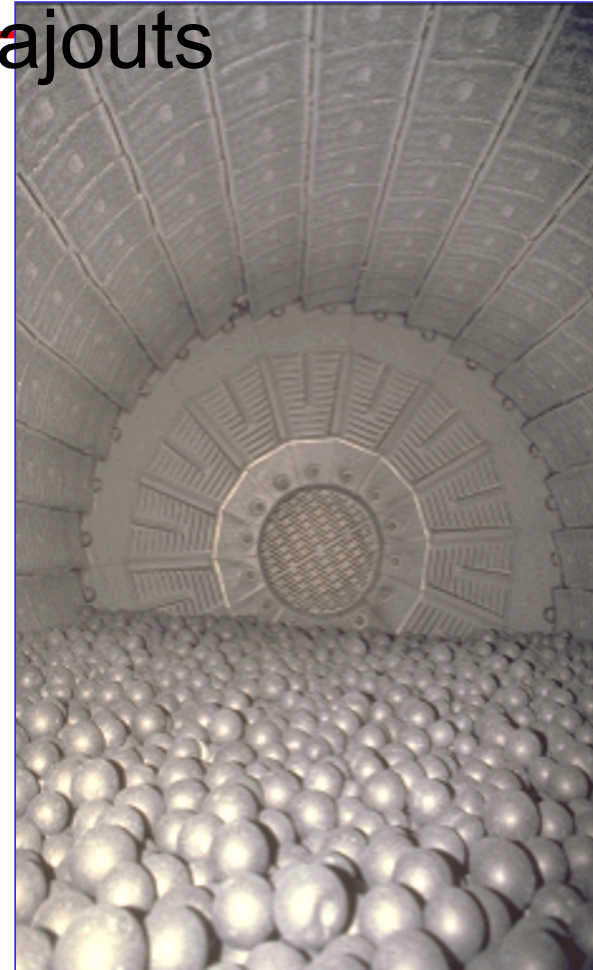
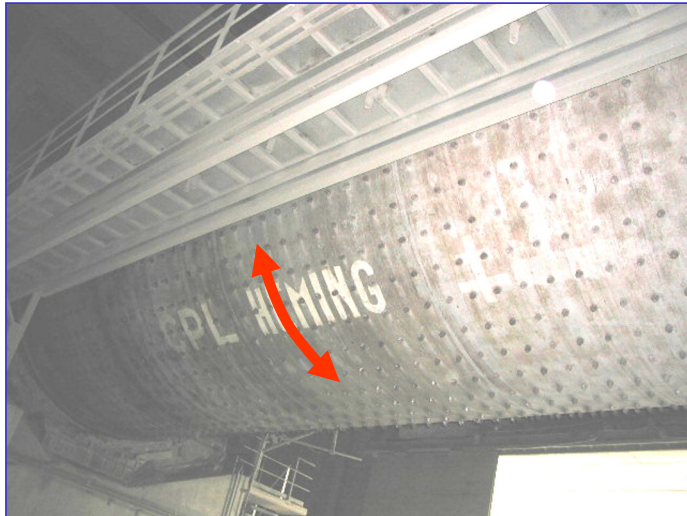
- gypse ($x=2$)
- anhydrite ($x=0$)

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

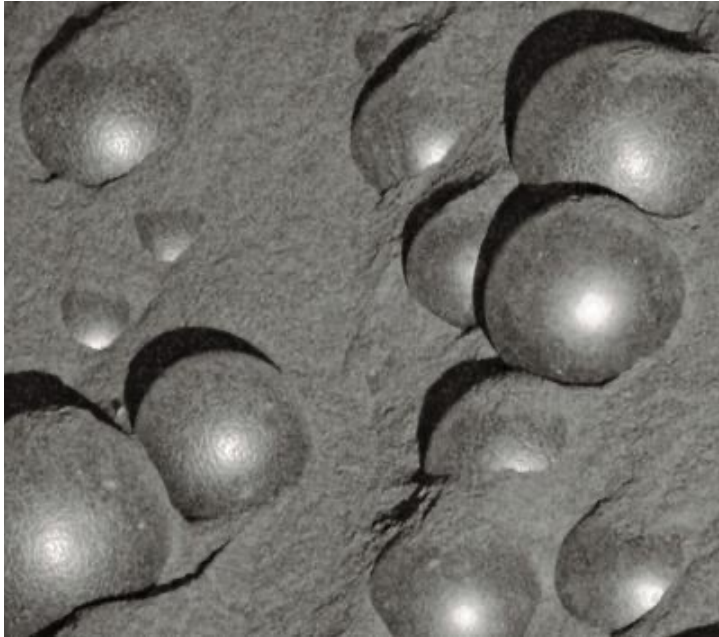
Souvent
Ajout de CaCO_3 fin:
(10-20%)
Filler fin

Aussi possible
Laitier (slag)
Cendres volantes (fly ash)
Fumée de silice (silica fume)

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



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

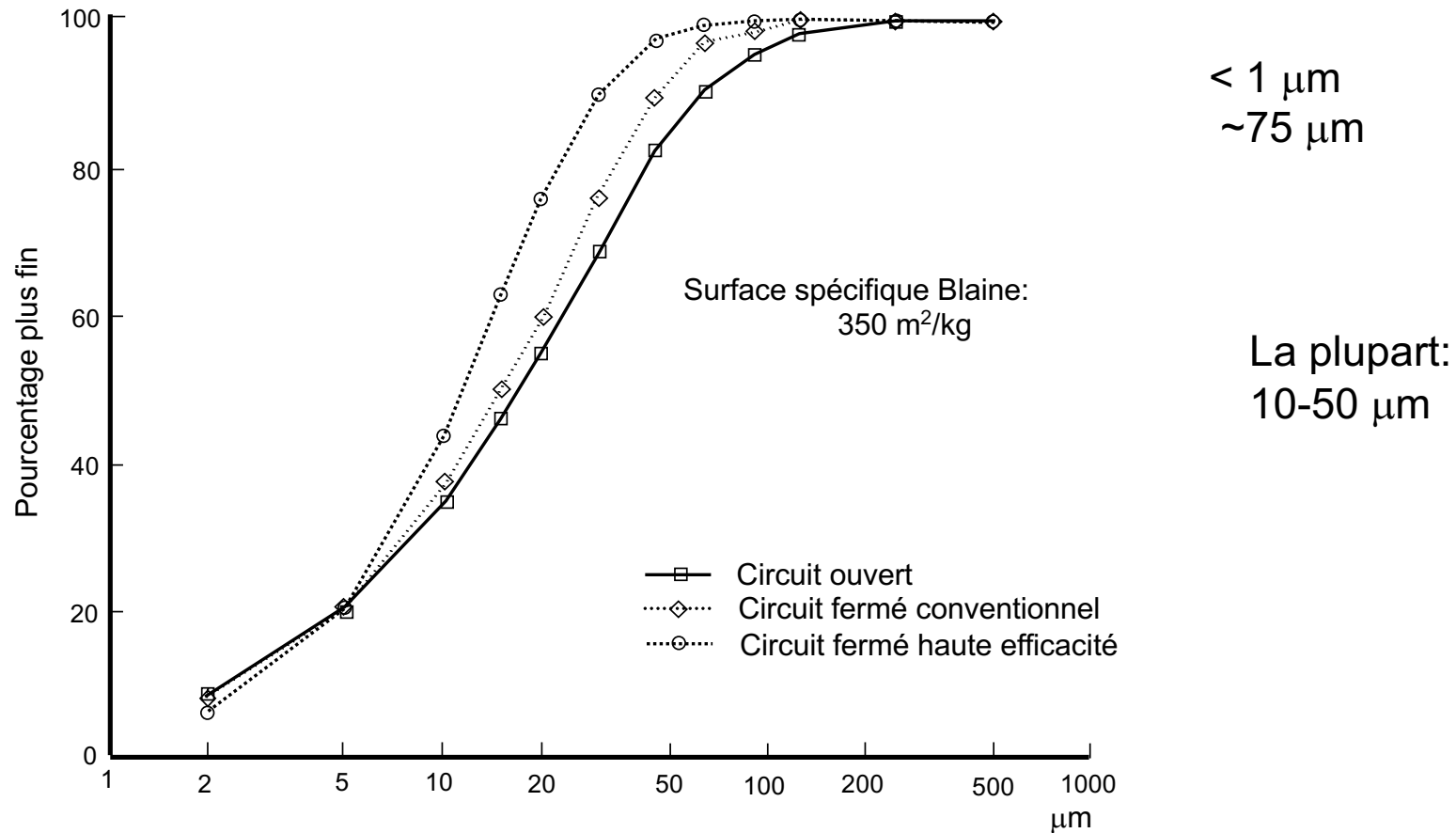


Agents de broyage



Pas d'agents de broyage

2.4. Manufacture du ciment: granulométrie



Source: Bye « Portland Cement », Thomas Telford 1999

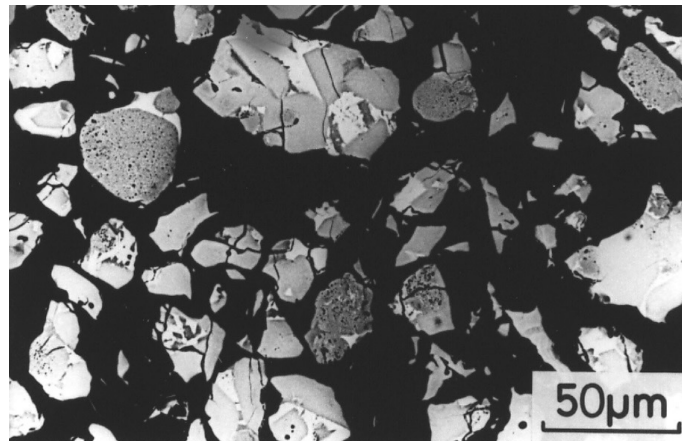
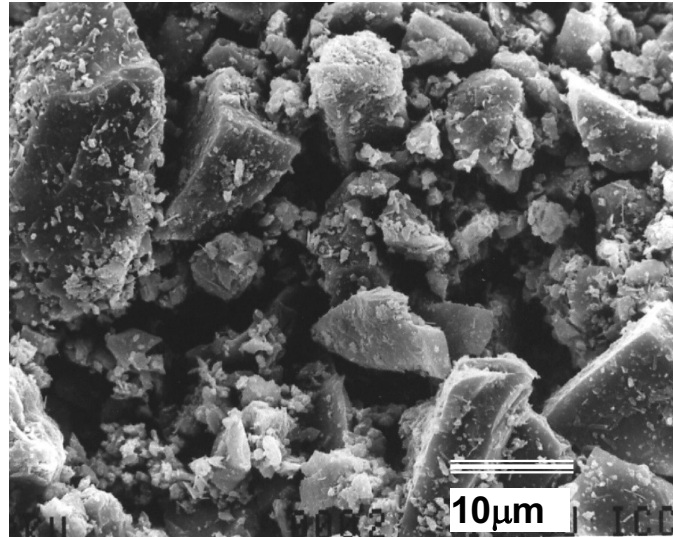
2.4. Manufacture du ciment: broyage du clinker et autres ajouts

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

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

2.4. Manufacture du ciment

Grains de ciment



2.5. Livraisons

Vrac
~80-90%

Sac
~<10%



Big bag
~2-3%



CEM I (>95% clinker)

Résistance précoce High early strength	Finesse , C_3S , C_3A , (alk)	R1j ~2x
Basse chaleur Low heat	Finesse ↓, 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	
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 III / B III / C	35-64 20-34 5-19	36-65 66-80 81-95	0-5 0-5 0-5
IV	Ciment pouzzolaniqu e	IV / A IV / B	65-89 45-64	11-35 36-55	0-5 0-5
V	Ciment composé (*)	V / A V / B	40-64 20-39	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	

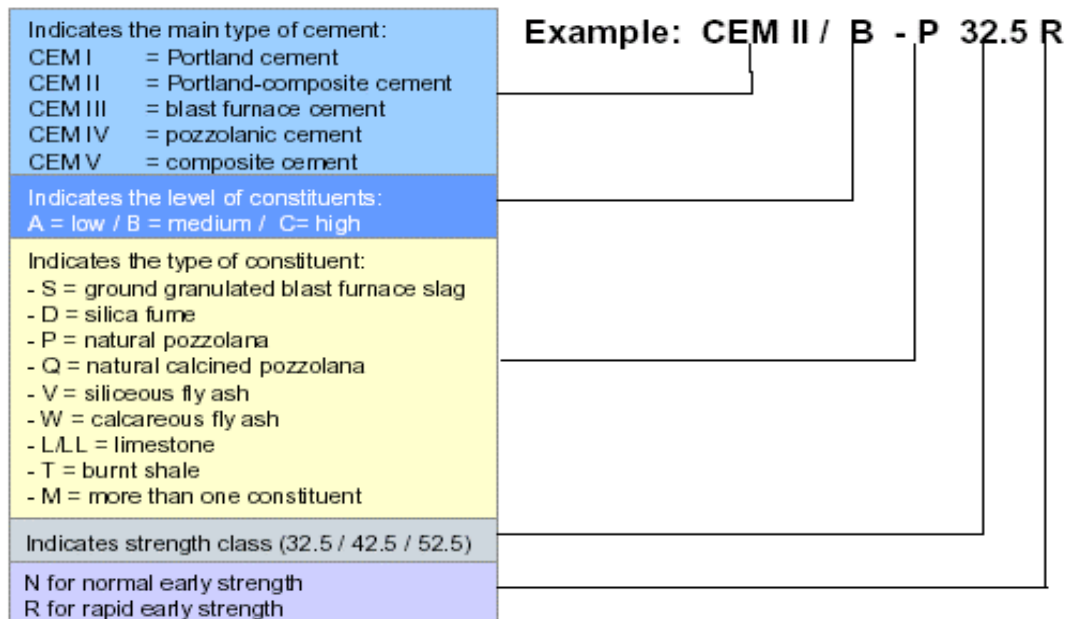
- **N**: Classe de résistance à court terme ordinaire
- **R**: Classe de résistance à court terme élevée

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

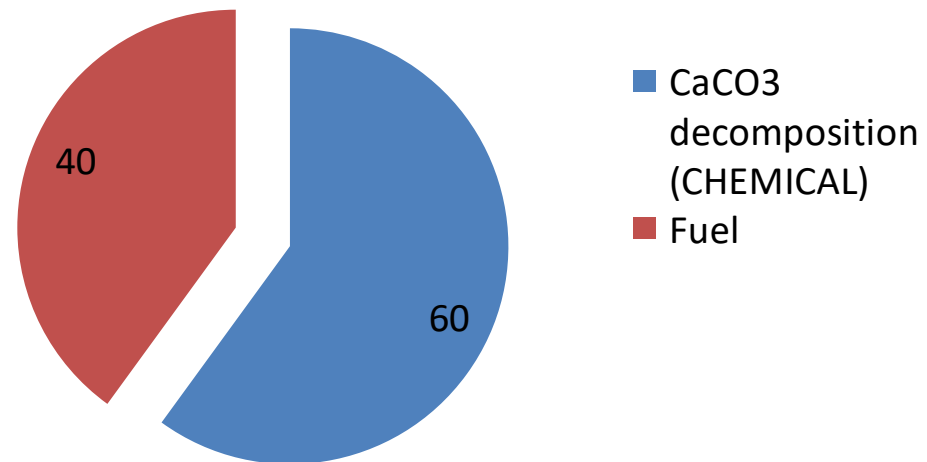
- **SR**: ciments à résistance élevée aux sulfates: extension
(CEM I et CEM III/B)

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

5. Impact sur l'environnement : CO₂



1 tonne of cement leads to the emission of 650 – 900 kg CO₂



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/Nm³

► DeSO_x



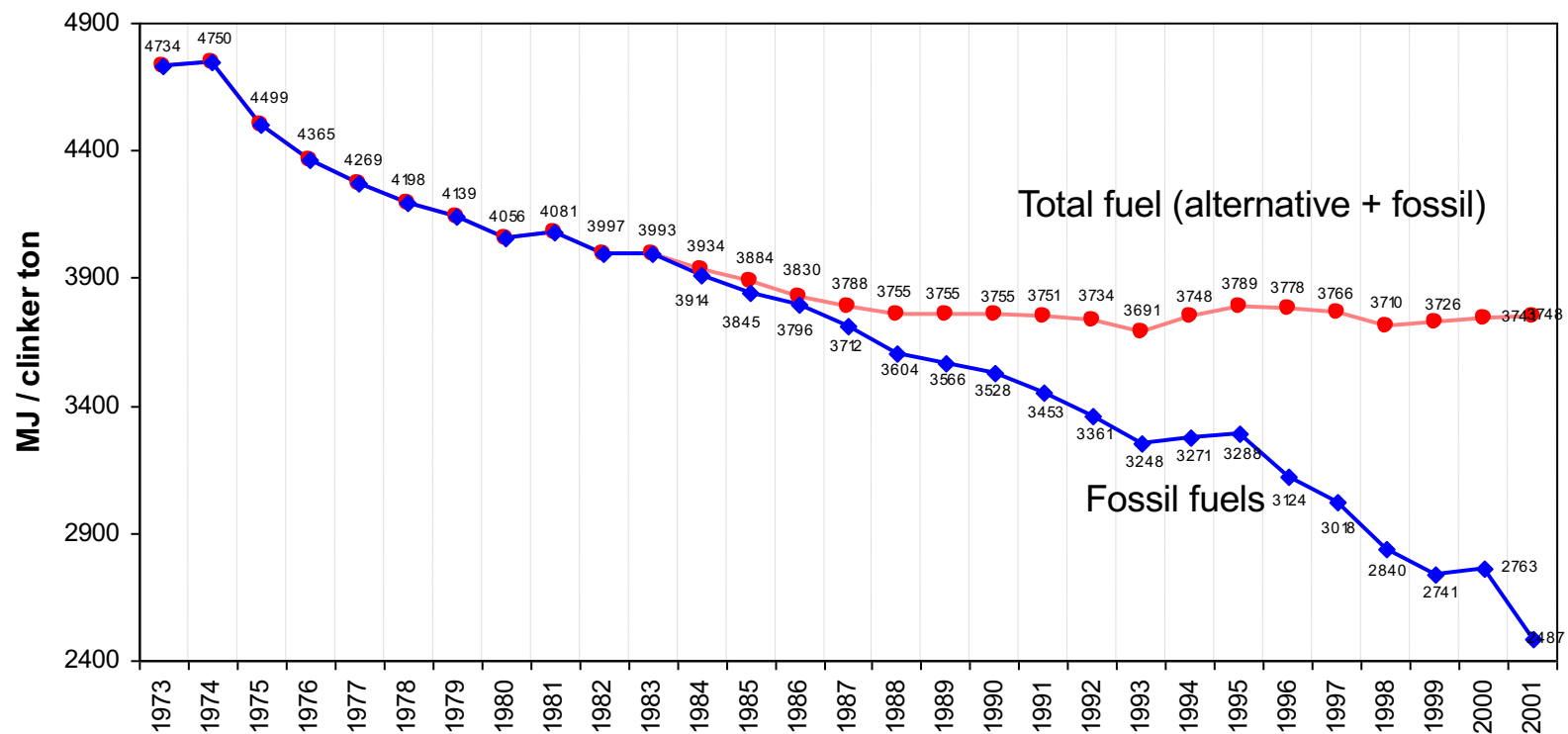
< 500 mg/Nm³

► AFR hall



5. Impact sur l'environnement : combustible

Evolution of the use of alternative fuels (France)

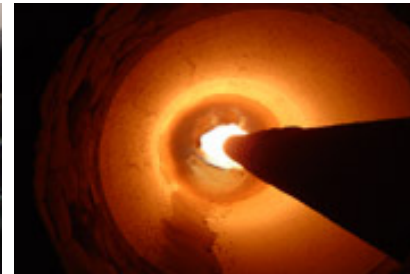


Source ATILH

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/>)

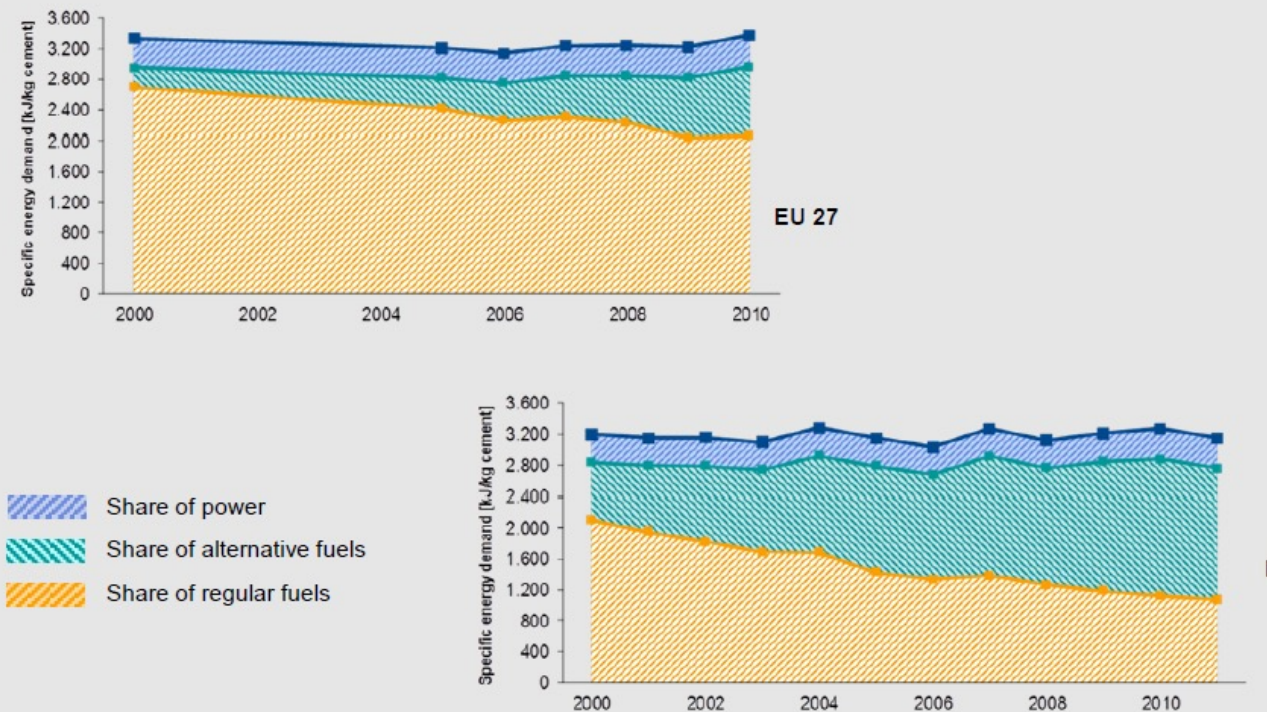


Alternative fuels

- 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

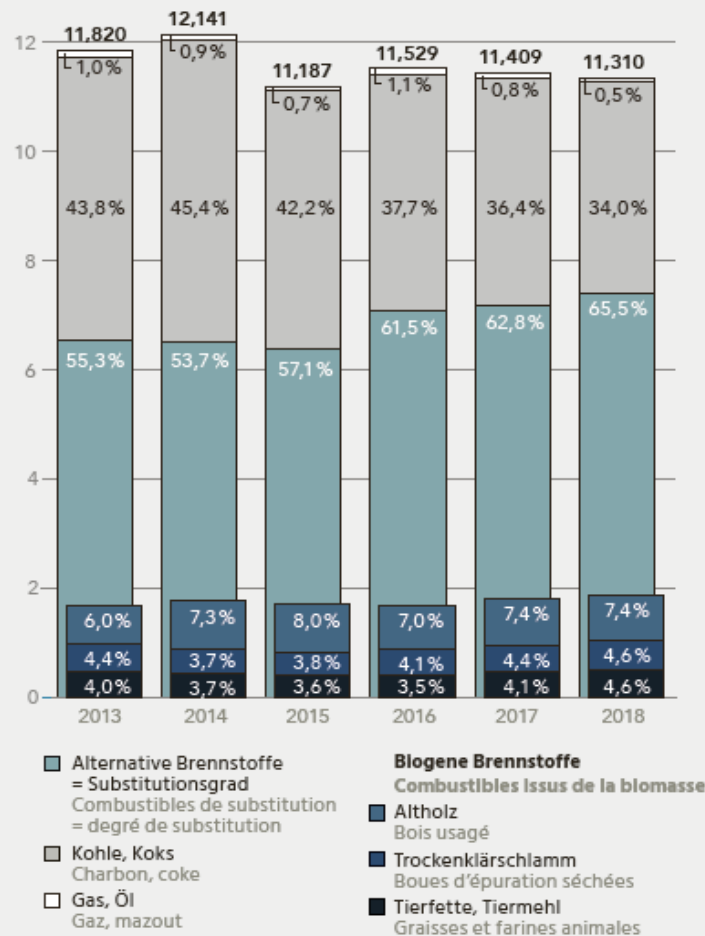
5. Impact sur l'environnement : combustible

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

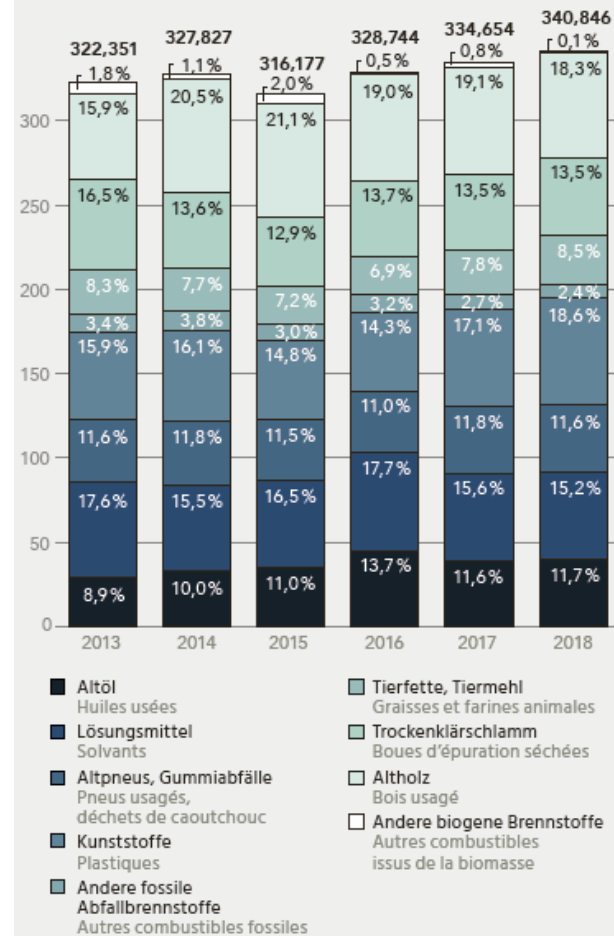


Breakdown of fuels in Switzerland

in Petajoules
en pétajoules



in 1000 Tonnen
en milliers de tonnes



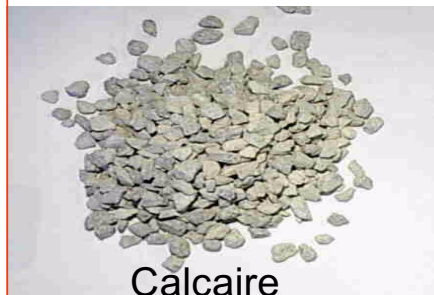
5. Impact sur l'environnement : eco-cement



Clinker +



Régulateur
de prise
(gypse)



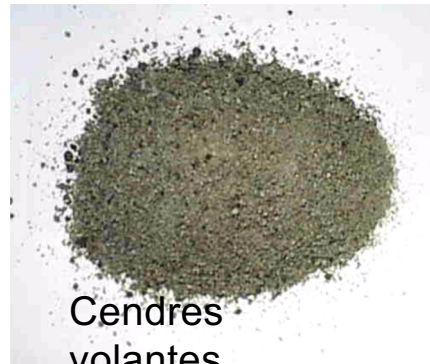
Calcaire



Laitier



Pozzolan naturel



Cendres
volantes

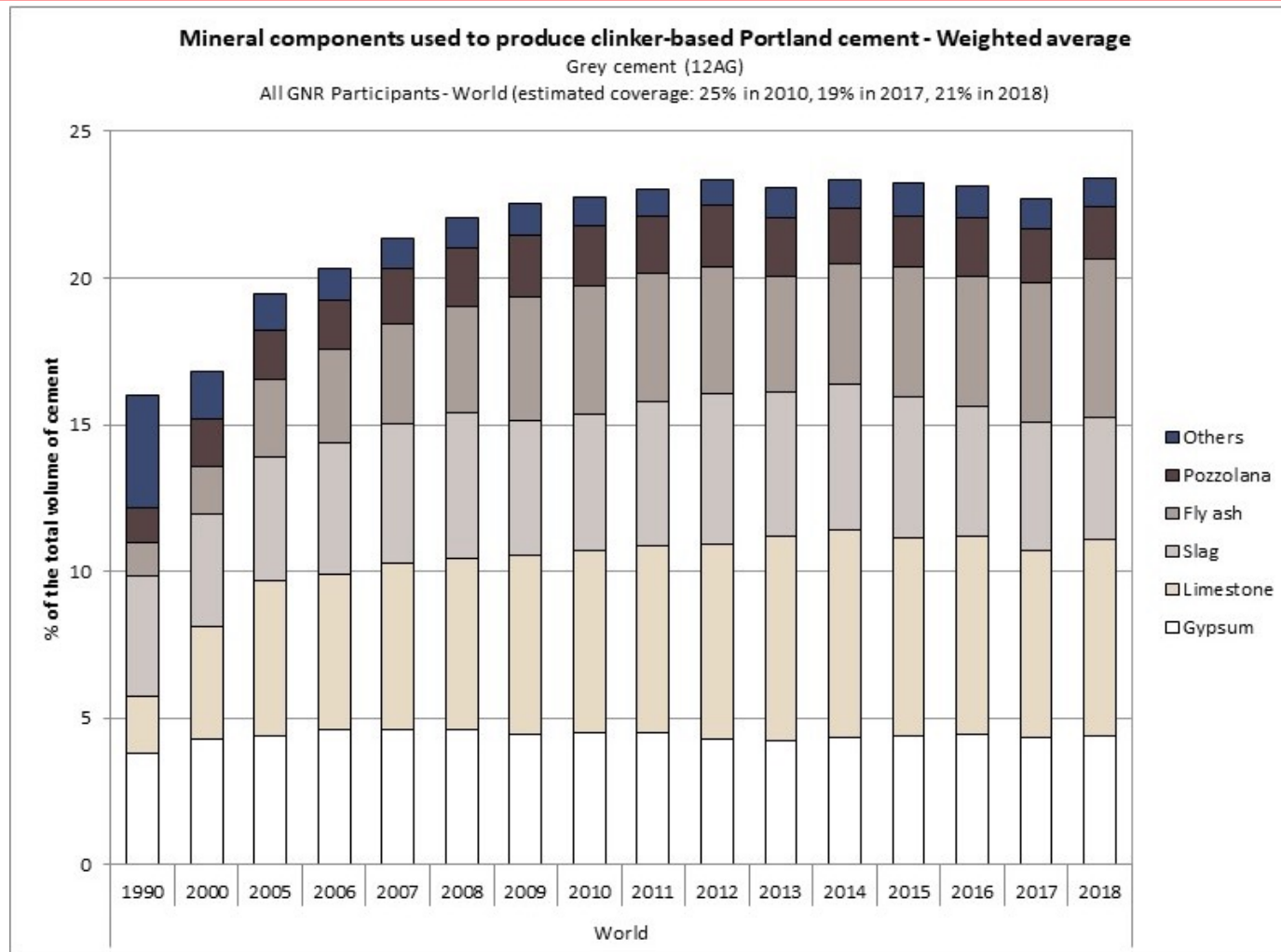


Argilles calcinée

Nouveaux constituants

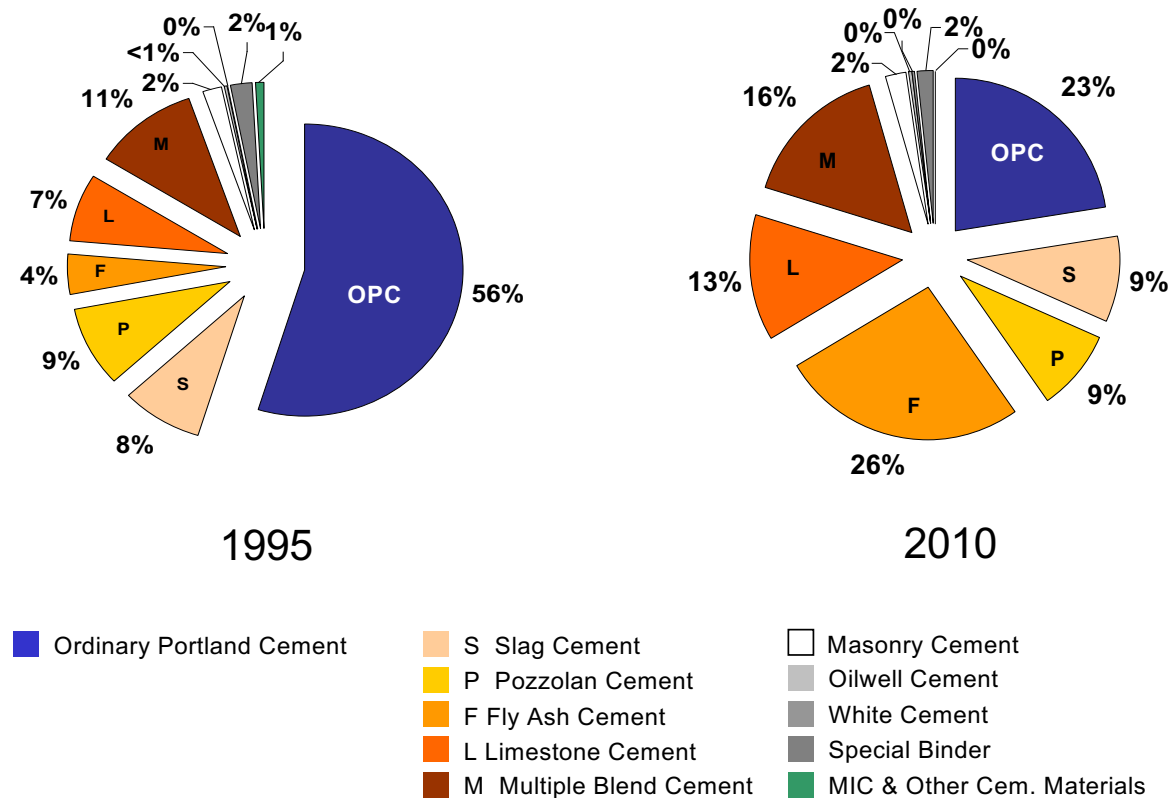
SCM: Supplementary Cementitious Materials

5. Impact sur l'environnement : eco-cement



5. Impact sur l'environnement : eco-cement

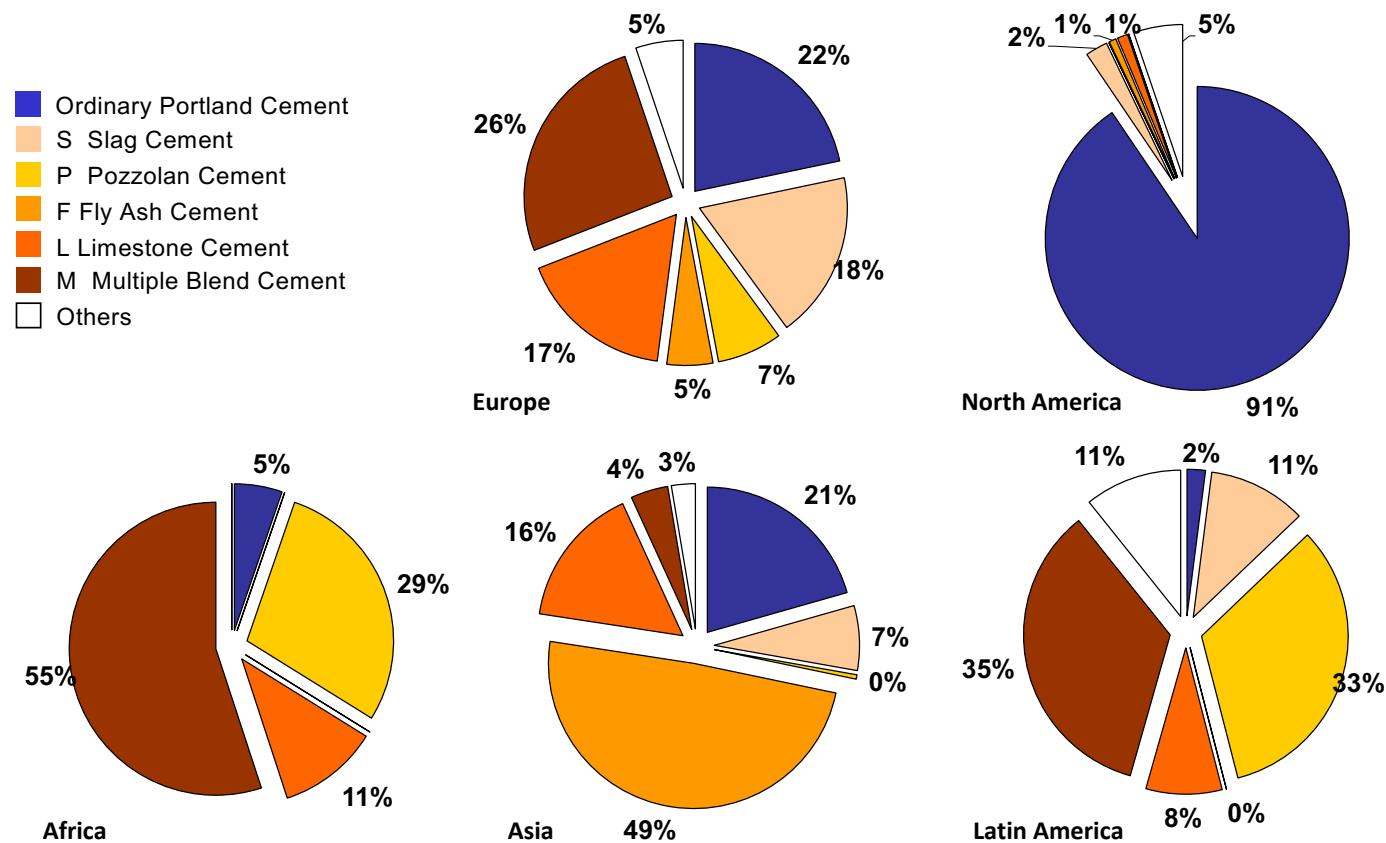
Cement types produced by Holcim 1995 - 2010



ATR data, only consolidated companies included

Source, Holcim

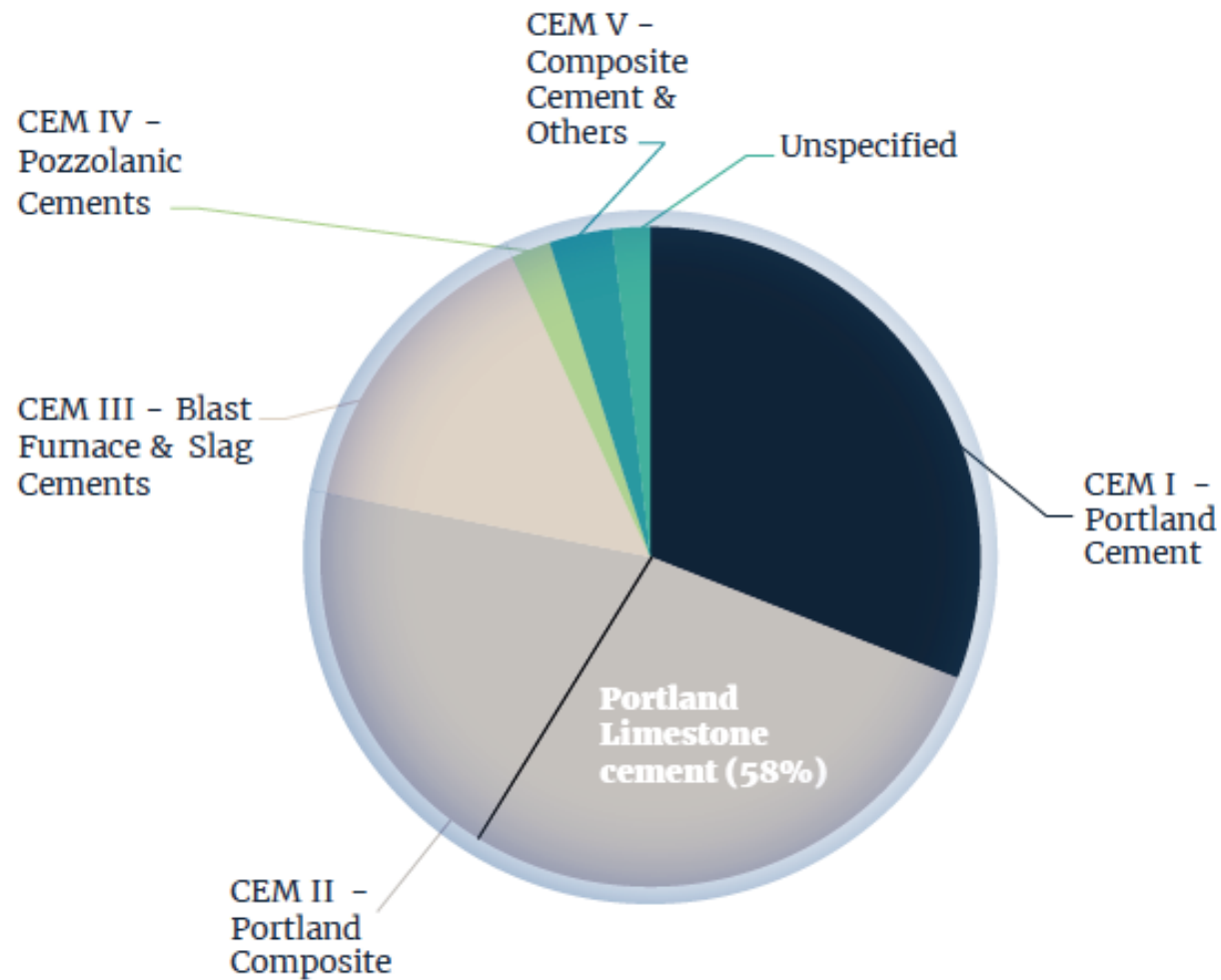
Holcim cement product portfolio per region shows high geographical diversity in 2010



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 (source: cemsuisse)	utilisation
CEM II / A-LL 42.5N	32%	Bâtiment standard
CEM II / B-M(T-LL) 42.5N (Optimo)	57.7%	Bâtiment standard (réduction de la teneur en clinker)
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)

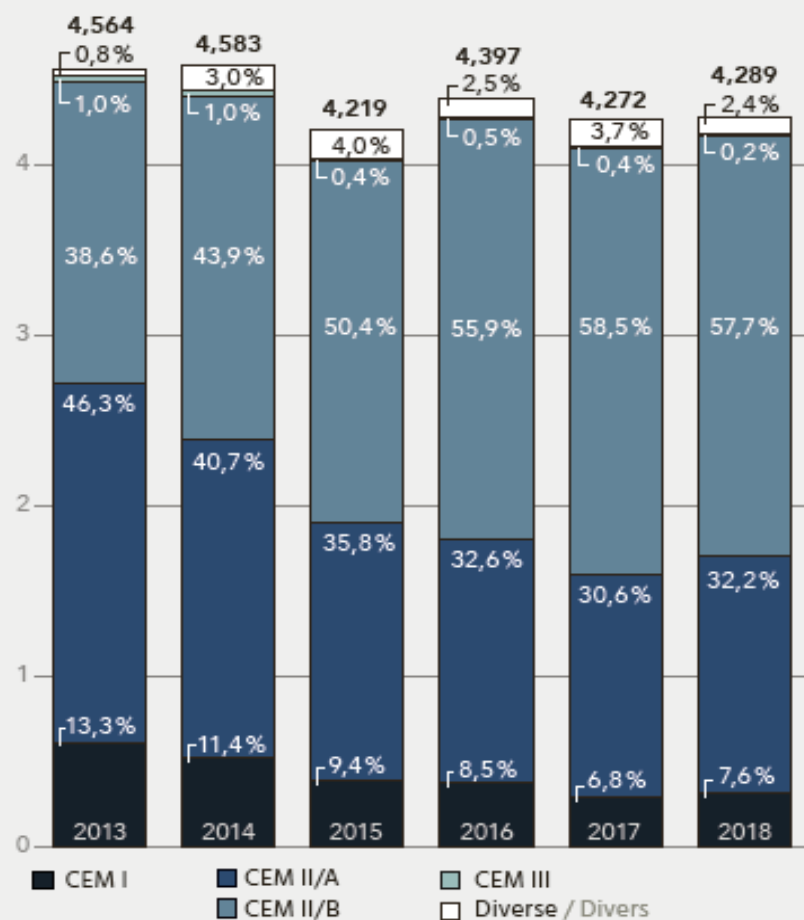
Holcim Susteno 4 est un ciment Portland composé suisse ZN/D 42,5 N certifié selon le cahier technique SIA 2049.

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%

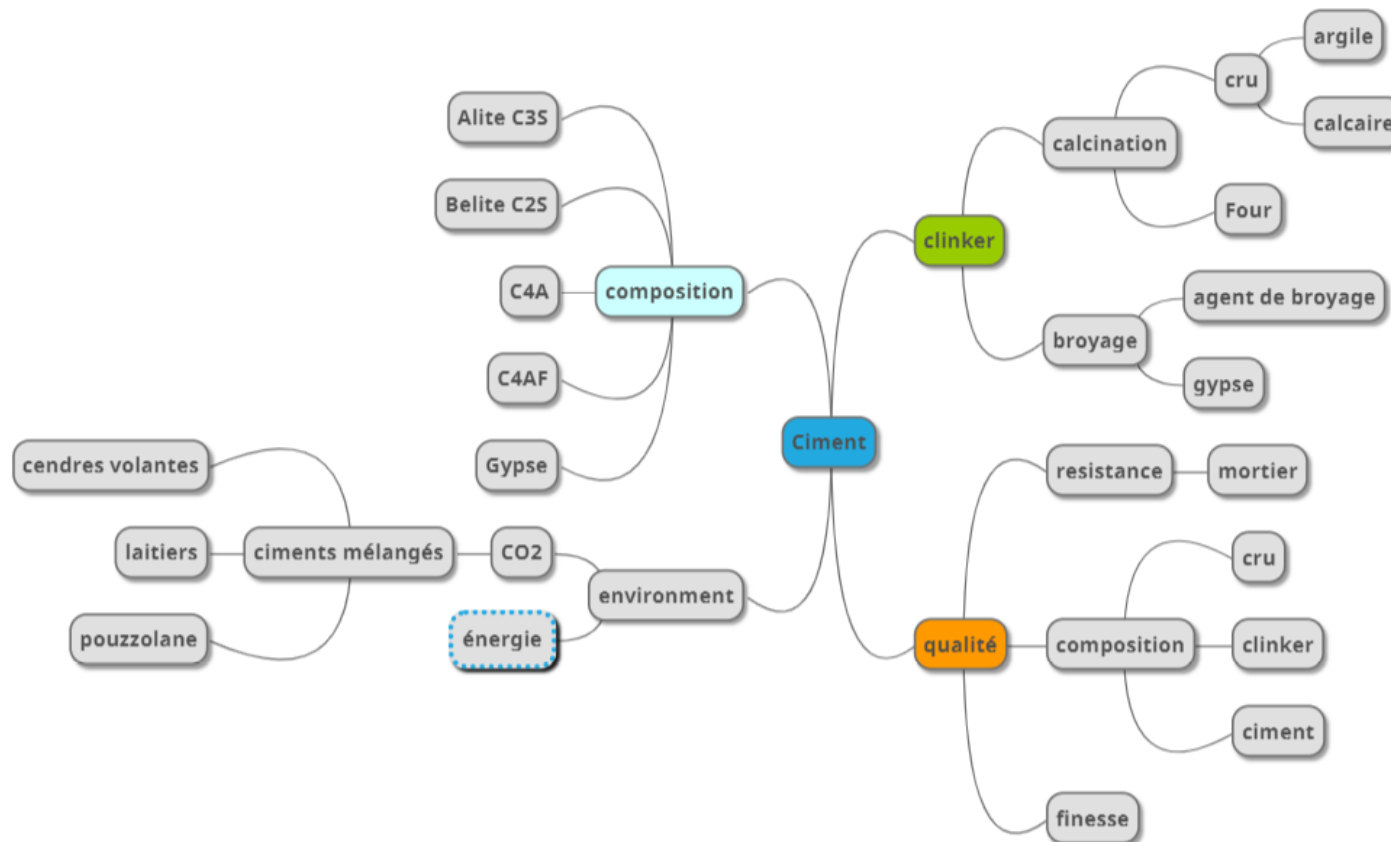
in Millionen Tonnen
en millions de tonnes



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 alcalis (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>