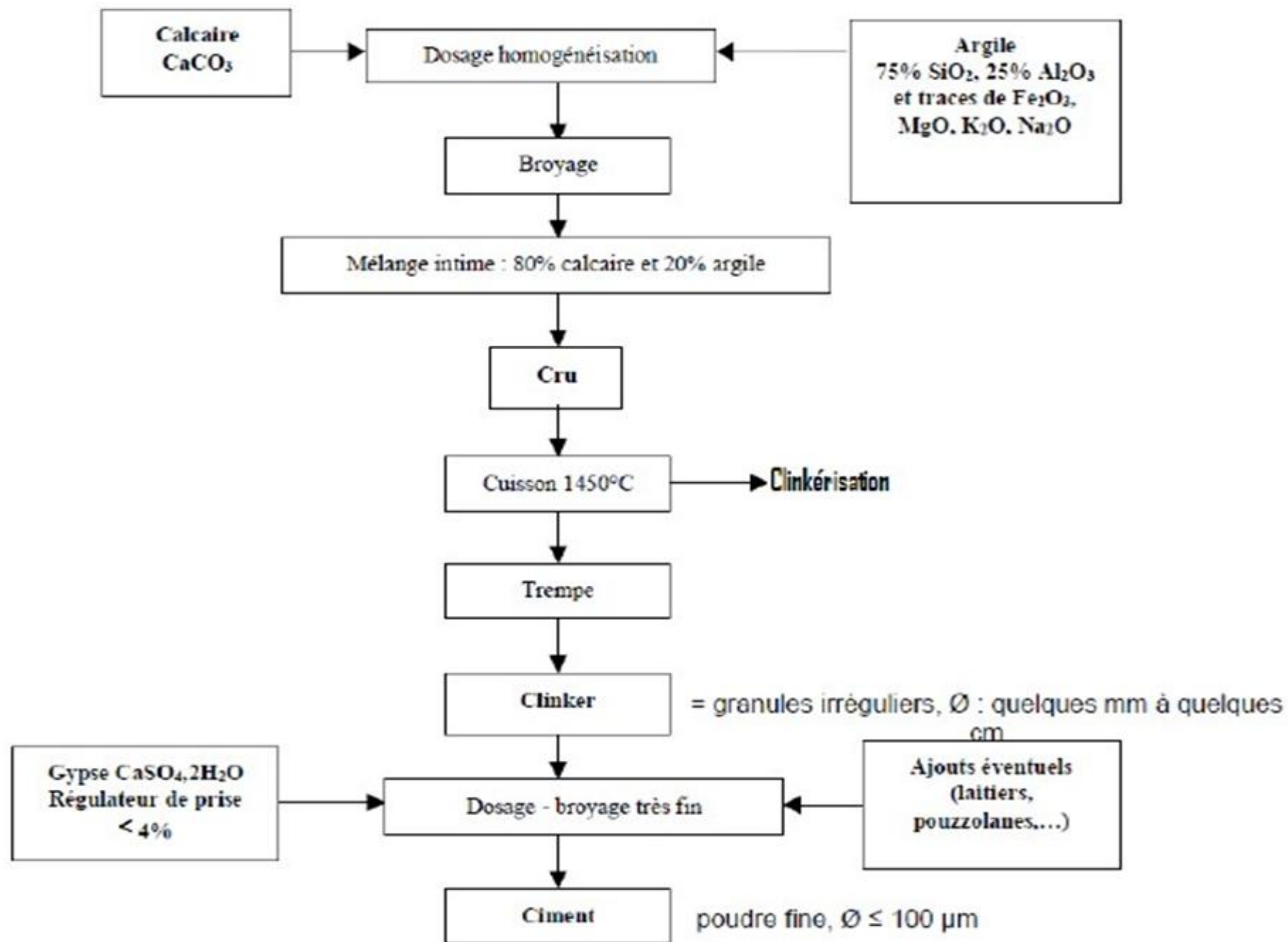


3^{ème} Chapitre

Le ciment «Liant hydraulique»



Processus de fabrication du ciment Portland

Calcaire

Argile



Clinker

Gypse



**Produits
d'addition**



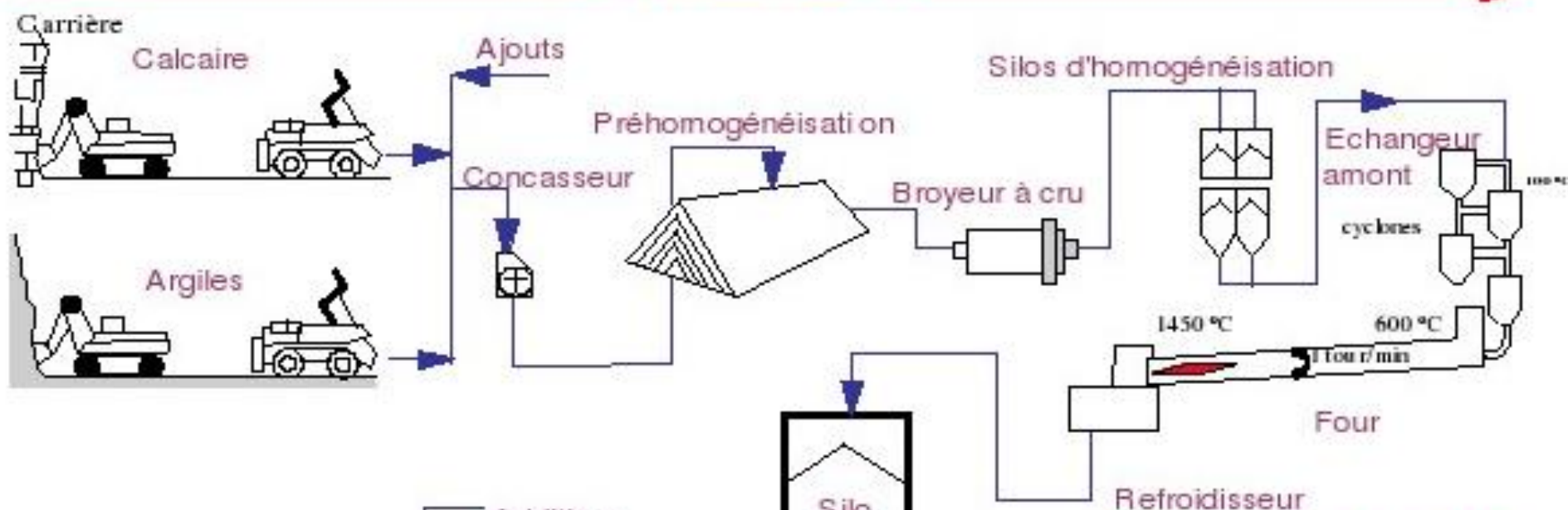
Ciment



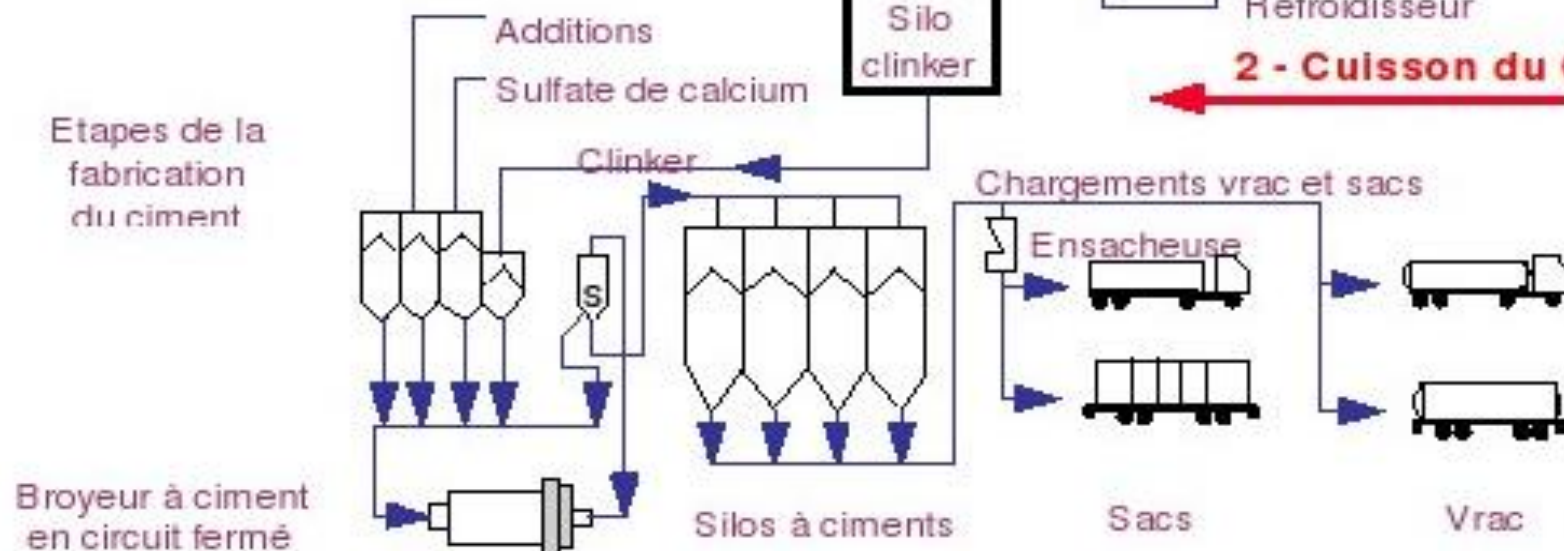
Fabrication du ciment

Amont

1 - Préparation du cru



2 - Cuisson du Clinker



3 - Elaboration du ciment

Matières premières minérales

- Le **calcaire** est la matière première prédominante dans le mélange cru (75 à 80%).
- Le calcaire ne contient pas les quantités d'oxydes nécessaires, pour assurer une composition adéquate des matières crues

On ajoute au calcaire **d'autres matières minérales** qui fourniront les quantités d'oxydes manquantes : **l'argile, le sable et le minerai de fer.**

Constituants principaux

- CLINKER
- Laitier granulé de haut fourneau (S)
- Pouzzolanes naturelles (Z) ou naturelles calcinées (Q)
- Cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W)
- Schistes calcinés (T)
- Calcaire (L, LL)
- Fumées de silice (D)

Sulfate de calcium : régulation de la prise

Joseph Aspdin (1778-1855) :

- Donne le nom de ciment Portland en référence à la pierre calcaire de l'île de Portland



Les ciments, liants hydrauliques

Source de CaO : calcite, aragonite, dolomite

Source de SiO_2 : quartz, feldspath, opale, argile, micas

Source de Al_2O_3 : argile, feldspath, gibbsite
($\text{Al}(\text{OH})_3$)

Source de Fe_2O_3 : hématite, magnétite, goethite, limonite, sidérite

Composition du « cru » :

- Chaux CaO produit de la décarbonatation du calcaire :



- Silice SiO_2

- Alumine Al_2O_3

- Oxyde de fer Fe_2O_3

source : argile

- Alcalins : Na, K

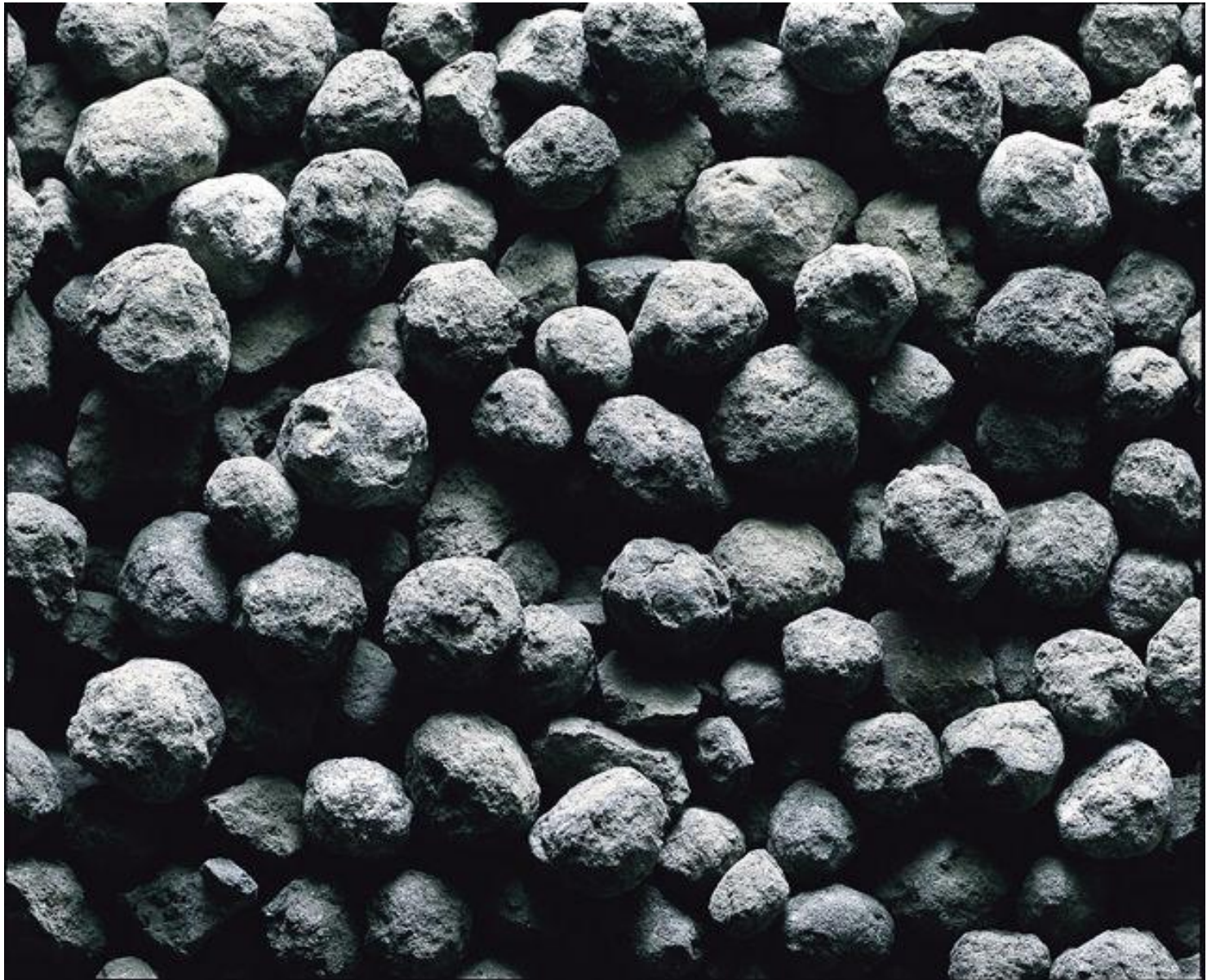
Composition du « cuit » :

- Silicate bicalcique Ca_2SiO_4 (= C_2S)
 - Silicate tricalcique Ca_3SiO_5 (= C_3S)
- } phase solide
- Aluminate tricalcique $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ (= C_3A)
 - Aluminoferrite tétracalcique
 $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$ (= C_4AF)
- } phase interstitielle
liquide à 1400°C
- Alcalins : Na, K

Composition moyenne du clinker Portland

Chaux CaO	60 - 70
Silice SiO_2	17 - 25
Alumine Al_2O_3	3 - 8
Oxyde de fer Fe_2O_3	1 - 6
Magnésium MgO	0,1 - 4
Trioxyde de soufre SO_3	1 - 3,5
Alcalis $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	0,5 - 1,3

Produit final: le clinker



Composition chimique du clinker

Les principaux constituants du clinker sont:

- Le silicate tricalcique $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$
- Le silicate bicalcique $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$
- L'aluminate tricalcique $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$
- Le ferroaluminate tétracalcique $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$

COMPOSITION CHIMIQUE DU CIMENT PORTLAND

COMPOSITION DU CLINKER

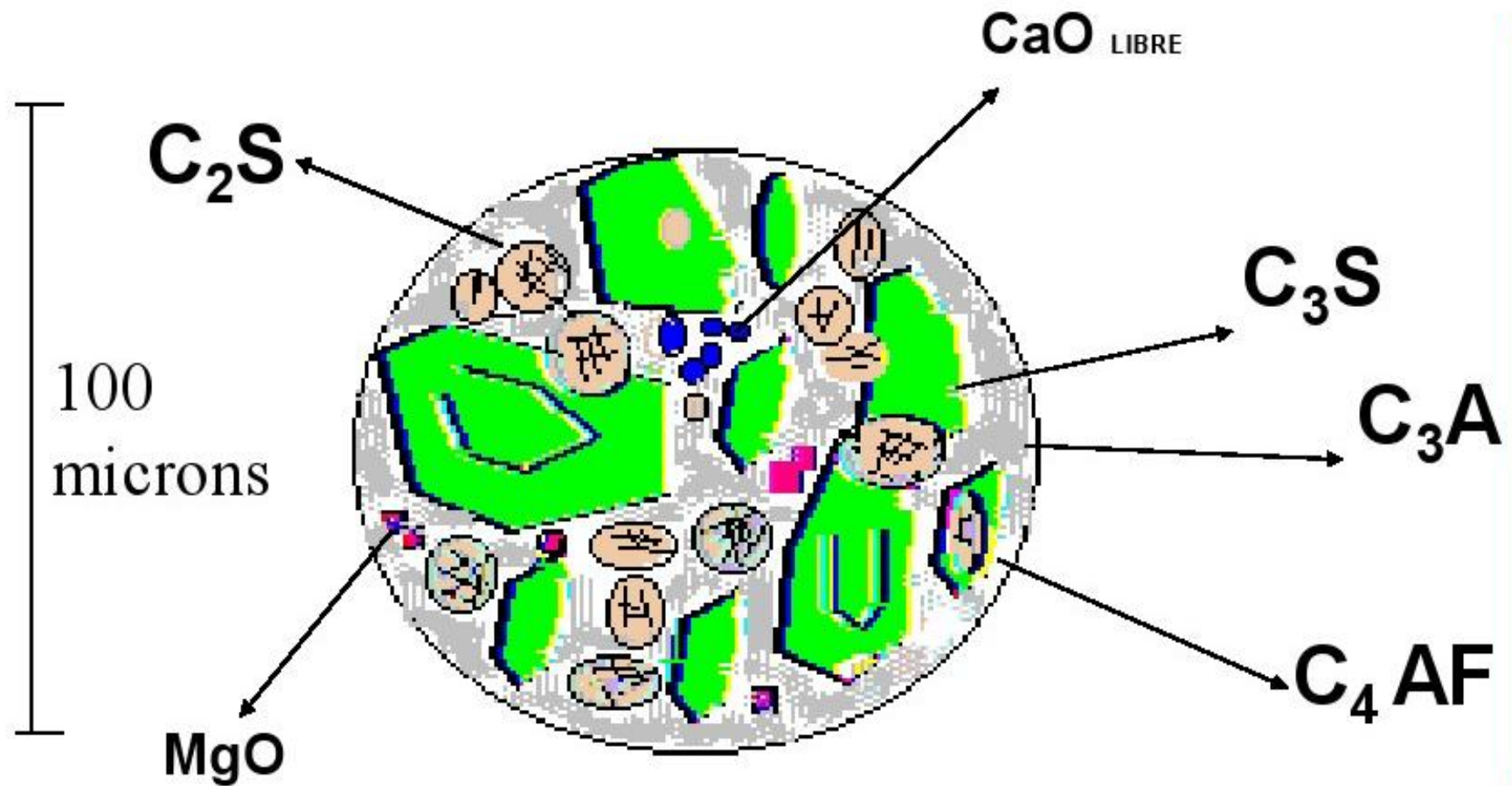
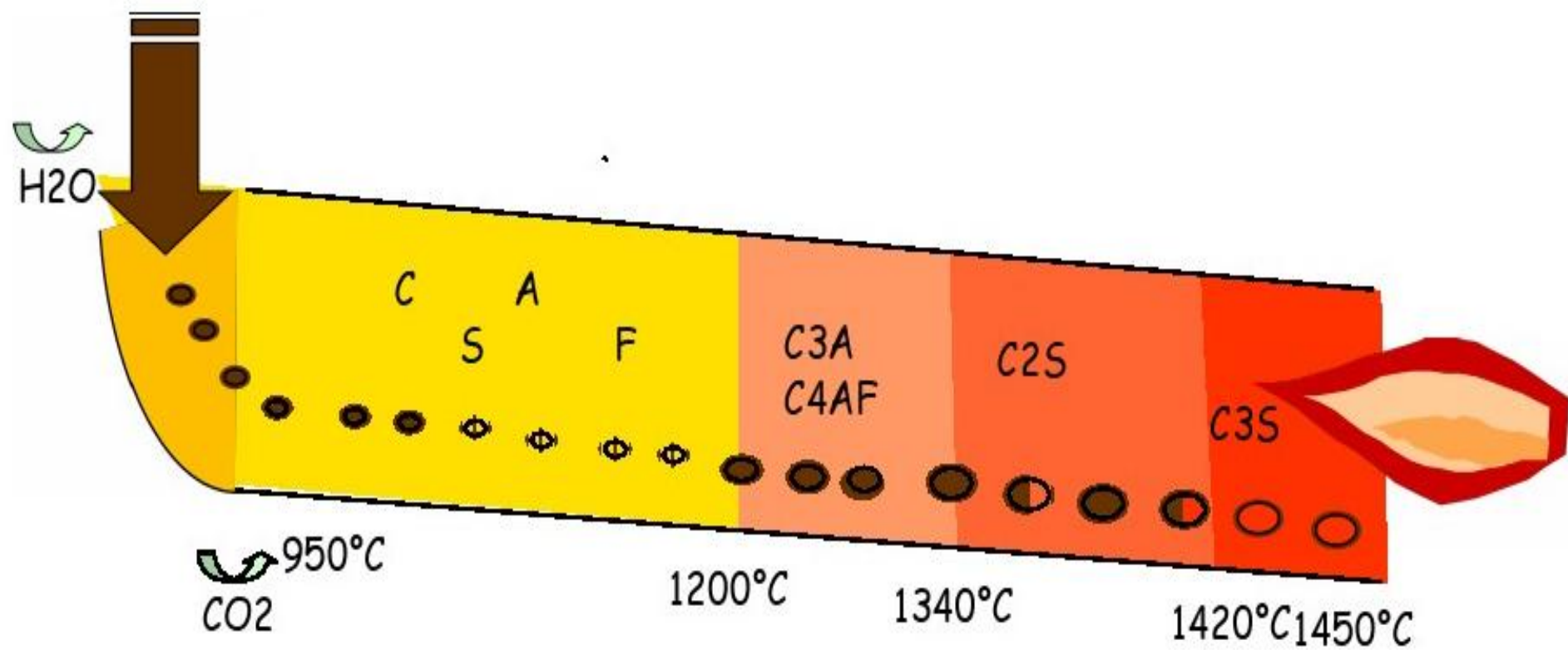


Image d'un clinker au microscope optique



Combustibles

■ Solide

- ▣ Charbon
- ▣ Déchets (pneus, plastique, bois, carcasses,...)

■ Liquide

- ▣ Huiles
- ▣ solvants

■ Gazeux

- ▣ Gaz naturel

Nomenclature

La nomenclature utilisée dans la chimie du ciment est la suivante:

La silice (SiO_2)	S
La chaux (CaO)	C
L'alumine (Al_2O_3)	A
La ferrite (Fe_2O_3)	F
L'eau (H_2O)	H
Le trioxyde de soufre (SO_3)	Š
La magnésie (MgO)	M
L'oxyde de potassium (K_2O)	K
L'oxyde de sodium (Na_2O)	N
Le dioxyde de carbone (CO_2)	Č

Les différentes phases minérales du clinker s'écrivent:



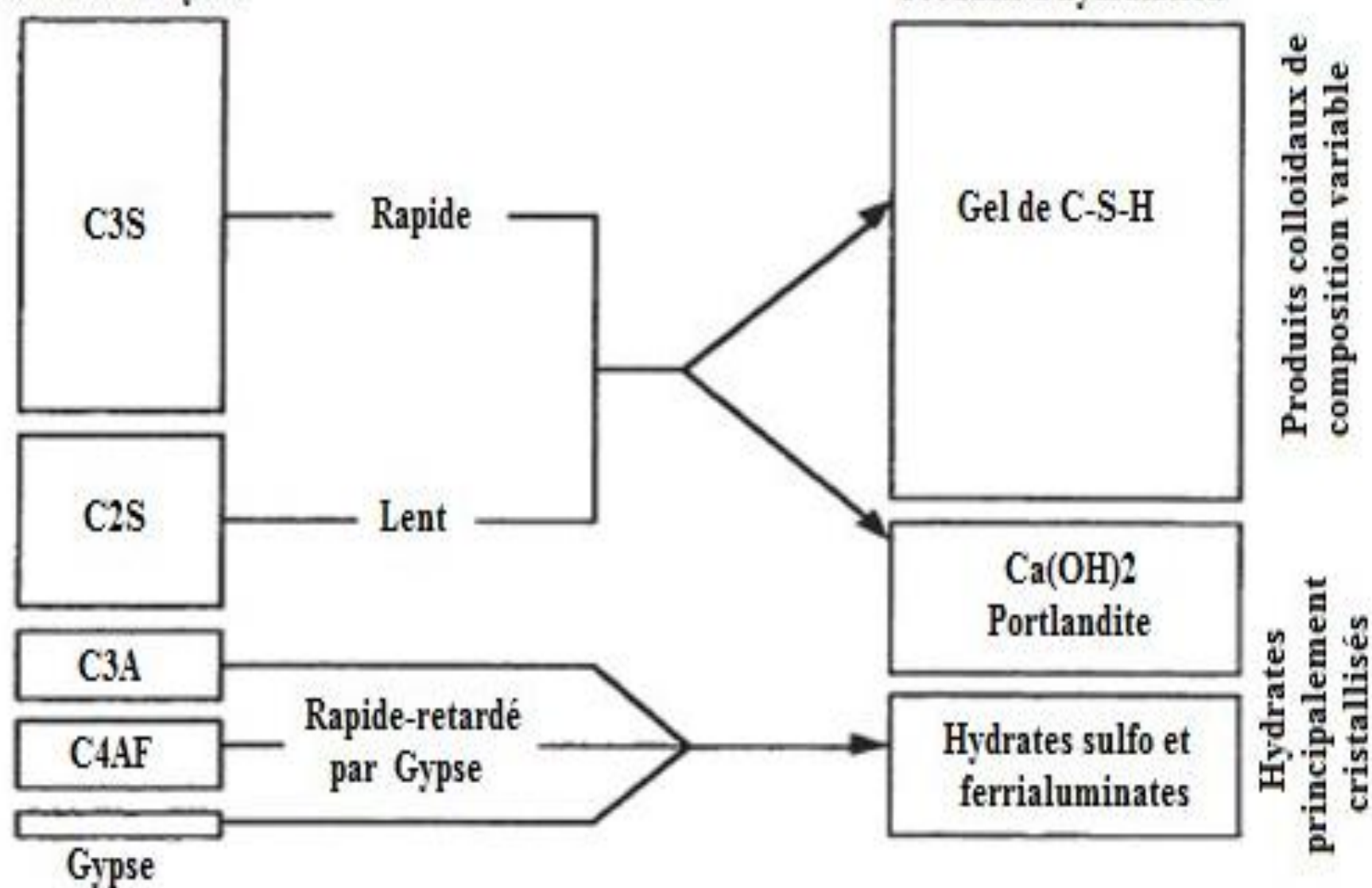
Les structures du C_3S et du C_2S comportent des impuretés. Les cimentiers les appellent, respectivement, **alite** et **bélite**.

Composition chimique (poids)			
Chaux (CaO)	Silice (SiO ₂)	Alumine (Al ₂ O ₃)	Oxyde ferrique (Fe ₂ O ₃)
65 à 70%	18 à 24%	4 à 8%	1 à 6%

4 phases cristallines principales			
Notation symbolique	Nom	Formule chimique	% en poids moyen
C ₃ S	Silicate tricalcique ou alite	3 CaO, SiO ₂	62
C ₂ S	Silicate bicalcique ou bélite	2 CaO, SiO ₂	22
C ₃ A	Aluminate tricalcique	3 CaO, Al ₂ O ₃	8
C ₄ AF	Alumino-ferrite tétracalcique	4 CaO, Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	8

Clinker anhydre

Produits d'hydratation



Représentation schématique des constituants anhydres du clinker et des produits d'hydratation.

Anhydres	Hydrates
C_3S, C_2S	$C-S-H, CH$
C_3A	C_3AH_6, C_4AH_{13} En présence de sulfate de calcium : $C_3A.3CaSO_4.32H_2O$ (Ettringite, TSA) $C_3A.CaSO_4.12H_2O$ (Monosulfoaluminate de calcium hydraté, MSA) En présence de $CaCO_3$: $C_3A.CaCO_3.11H_2O$ (Monocarboaluminate de calcium hydraté)
C_4AF	$C_3(A,F)H_6, C_4(A,F)H_{13}$ En présence de sulfate de calcium : $C_3(A,F).3CaSO_4.32H_2O$ $C_3(A,F).CaSO_4.12H_2O$ En présence de $CaCO_3$: $C_3(A,F).CaCO_3.11H_2O$

Principales caractéristiques du ciment

Caractéristiques de la poudre

Surface spécifique / finesse blaine : 2 800 à 5 000 cm^2/g

Masse volumique apparente : 1 000 kg/m^3

Masse volumique absolue : 3 000 à 3 200 kg/m^3



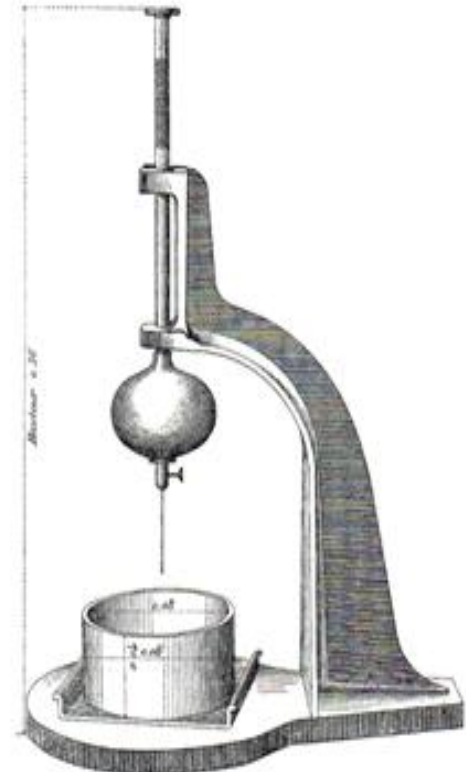
Caractéristiques sur pâte ou mortier

Début de prise : aiguille de Vicat

Expansion : aiguille de Le Chatelier

Résistances mécaniques : 2 jours/7 jours/28 jours

Chaleur d'hydratation : 250 à 400 J/g



Différents ciments

Ciments courants

- Ciments **Portland** : CEM I
- Ciments **Portland composés** : CEM II / A ou B
- Ciments de **haut fourneau** : CEM III / A, B ou C
- Ciments **pouzzolaniques** : CEM IV / A ou B
- Ciments **composés** : CEM V / A ou B

Ciments à usage spécifique

- Ciment **prompt naturel**
- Ciment d'**aluminates de calcium**
- Ciment à **maçonner**

Ciments à caractéristiques complémentaires

- Ciment pour **travaux à la mer** : PM
- Ciment pour travaux en **eaux à haute teneur en sulfates** : ES
- Ciment à teneur limitée en **sulfures** : CP

Provenance des ajouts cimentaires

Cendres volantes: Centrales thermiques au charbon

Laitiers: Industrie sidérurgique (hauts fourneaux)

Fumées de silice: Industrie du silicium et ferro-silicium

Pouzzolanes naturelles: Argiles et schistes calcinés, etc...

Type de Ciment

- Le ciment Portland Artificiel (CPA-CEMI)
- Le ciment Portland Composé (CPI – CEMII)
- Ciment de haut fourneau – CHF – CEMIII
- Ciment pouzzolanique – CPZ – CEMIV
- Les ciments de laitier et aux cendres CLC – CEM V/A et B

Classification des principaux types de ciments

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	80-94	6-20	0-5
		II / B-S	65-79	21-35	0-5
	Portland à la F.S.	II / A-D	90-94	6-10	0-5
	Portland au calcaire	II / A-L	80-94	6-20	0-5
		II / B-L	65-79	21-35	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 pouzzolanique	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

Domaines d'emploi des ciments

Ciments



Bétons*
Mortiers
Coulis



Bâtiments
Routes
**Ouvrages
de génie civil**

(*) **BÉTONS :**
Béton non armé
Béton armé
Béton précontraint

