

Fabrication du ciment

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.

Note historique, 1

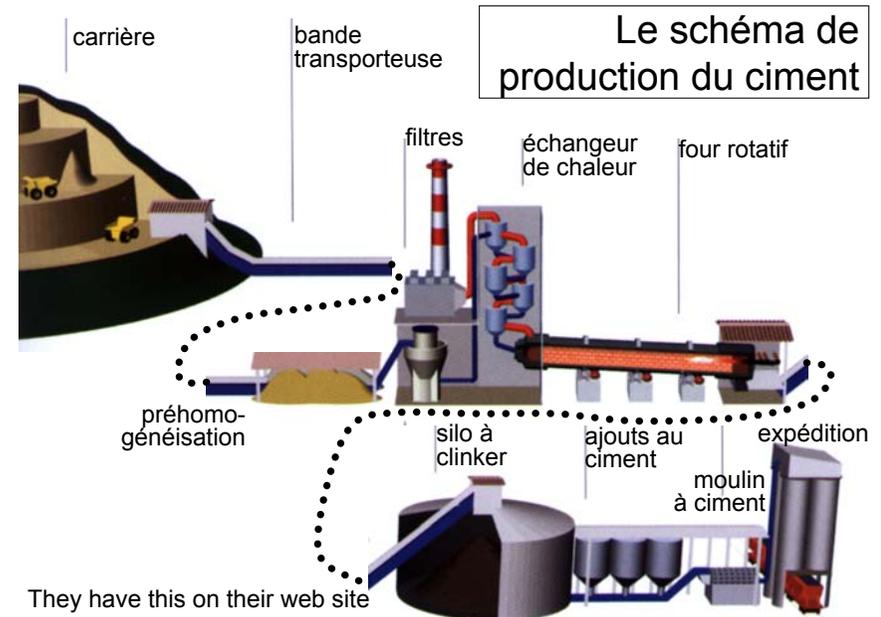
La chaux, connue depuis l'antiquité:
 $\text{CaCO}_3 \Rightarrow \text{CaO} \Rightarrow \text{Ca(OH)}_2 \Rightarrow \text{CaCO}_3$
Elle ne prend pas sous eau



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

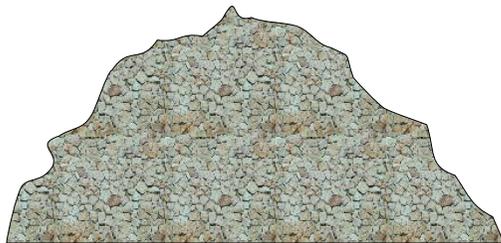
1813-28, Vicat en France, met en évidence le rôle de l'argile et fabrique un ciment à partir d'un mélange intime de calcaire et d'argile.





Pay back on investment
Choice of quarry
Presence of minor elements

Cru



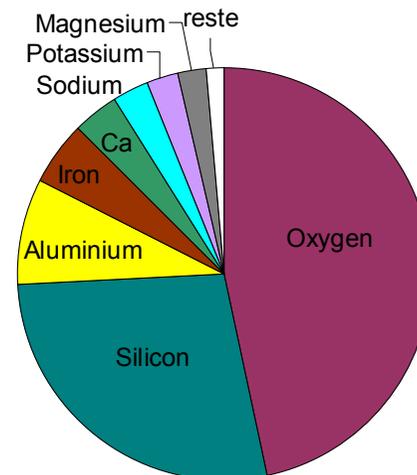
~80% roches calcaires
Jusqu'à 95% CaCO_3
~55% CaO
impuretés majeures MgO
bonne source de calcaire
détermine emplacements
des usines de ciment

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

Composition

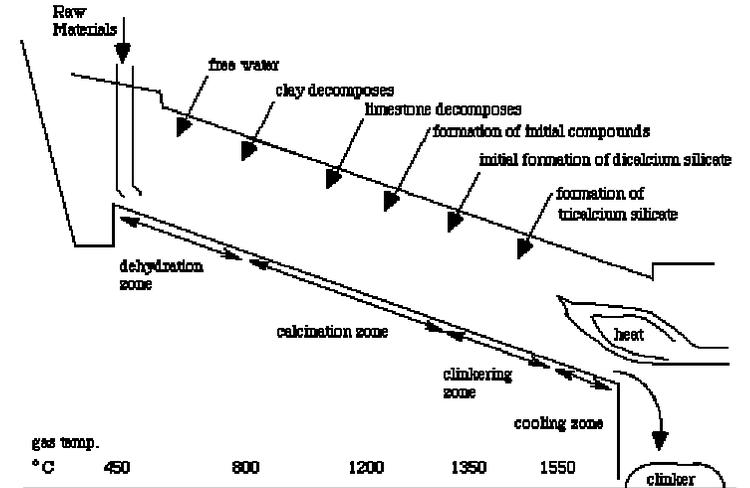
Les **éléments** constitutifs : O, Si, Ca, Al, Fe



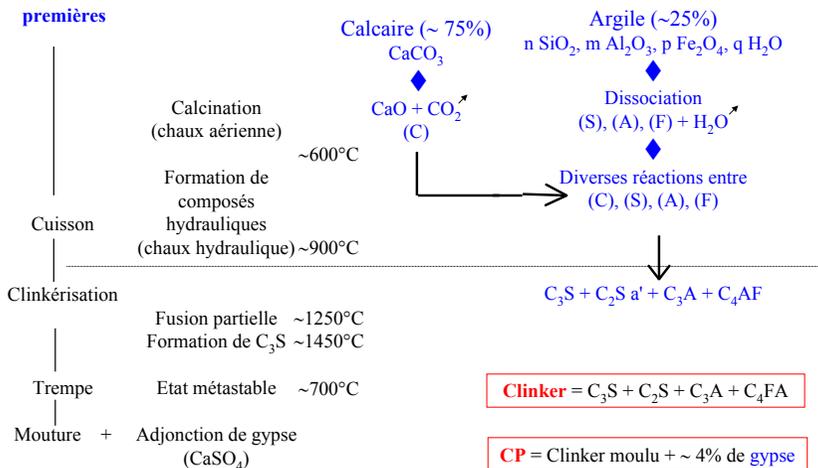
Les **oxydes** constitutifs : CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃
 Abréviations **C** **S** **A** **F**



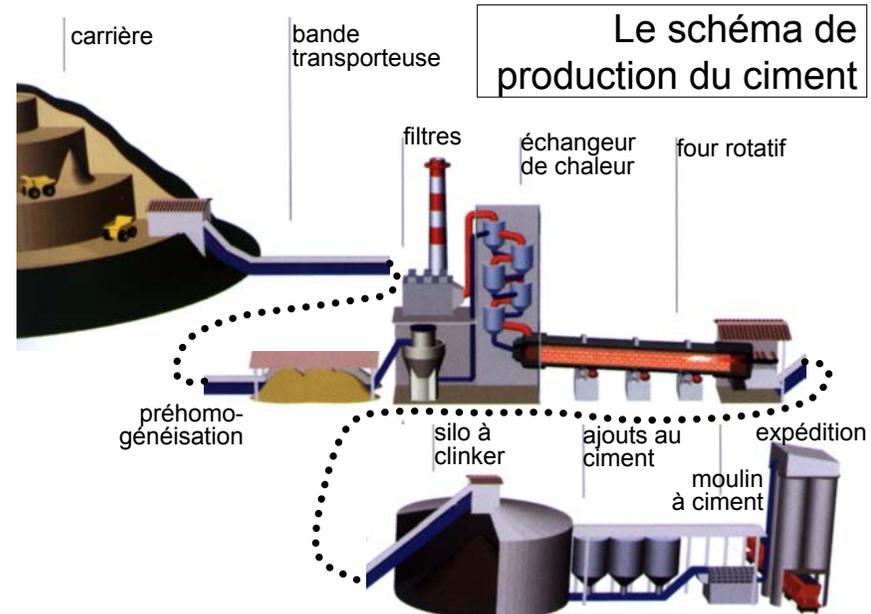
Les **phases** constituantes : **C₃S**, **C₂S**, **C₃A**, **C₄AF** (ferrite ss)
 Ca₃SiO₅, Ca₂SiO₄, Ca₃Al₂O₆, Ca₂(Al,Fe)O₅



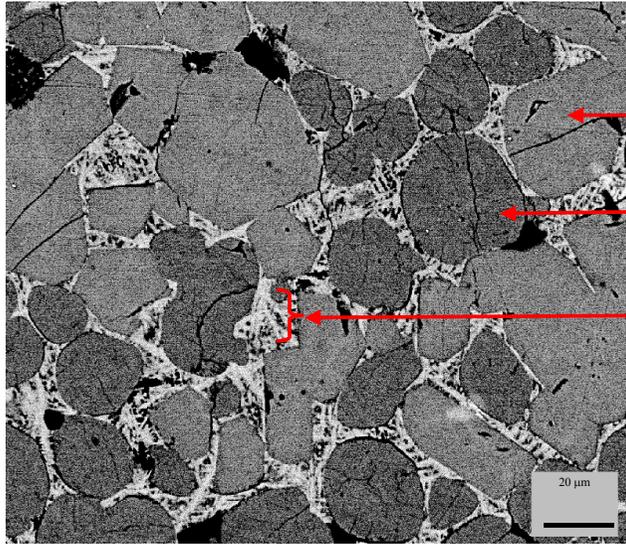
Matières premières



Le schéma de production du ciment



Microstructure de clinker « idéale »

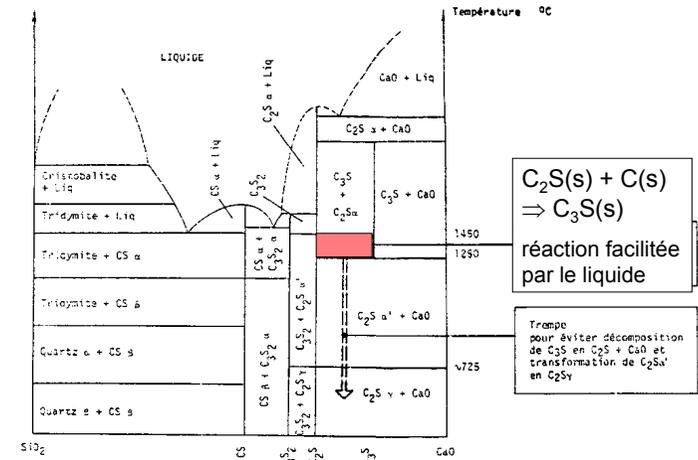


« alite »
C₃S, impure

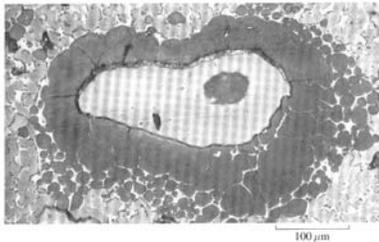
« belite »
C₂S, impure

phases
« interstitielles »
« celite »
C₃A, impure
+ solution
solide de ferrite
« C₄AF »,
liquide pendant
la cuisson

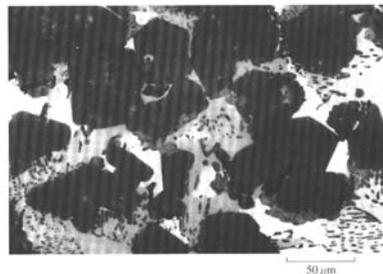
diagramme d'équilibre SiO₂ - CaO



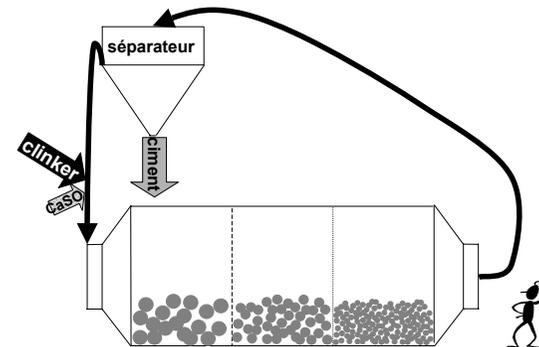
Problèmes possibles d'homogénéité et refroidissement trop lent



Put some labels



Broyage



2 ou 3 compartiments

Toujours
Ajout de CaSO₄H_x:
(4 – 8%)
• gypse (x=2)
• anhydrite (x=0)
déshydratation
à plâtre (x=0,5)
possible

Souvent
Ajout de CaCO₃ fin:
(10-20%)
Filler fin

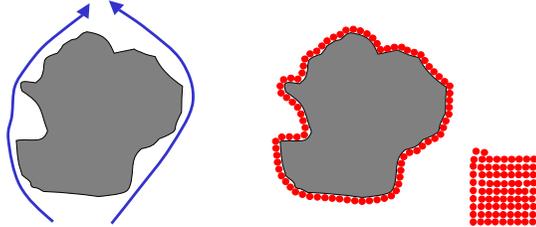
Aussi possible
Laitier (slag)
Cendres volantes (fly ash)
Fumée de silice (silica fume)

Broyage

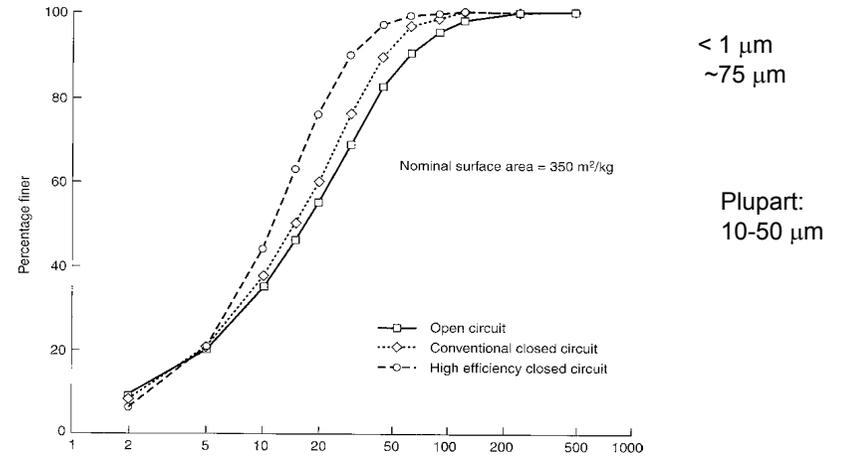
Controlé par surface spécifique « Blaine »
Perméabilité à l'air

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

320m²/kg Blaine ~ 800-1000 m²/kg absorption azote

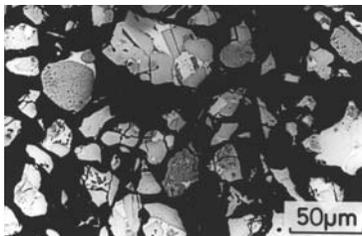
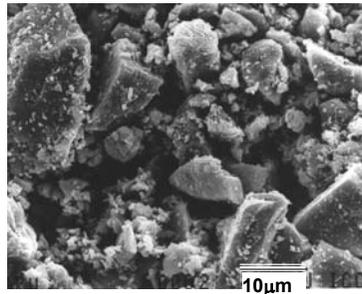


Granulométrie – psd (particle size distribution)



Source: Bye « Portland Cement », Thomas Telford 1999

Grains du ciment



Packaging

sac



Big bag



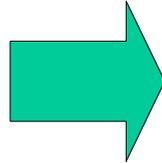
vrac



Caractérisation du ciment

Analyse oxyde (XRF)

SiO ₂	20,5	(19 - 21)
Al ₂ O ₃	6	(4-7)
Fe ₂ O ₃	2,5	(2-3)
CaO	64	(62-65)
* MgO	1,2	(1-4)
SO ₃	2,8	(2,5-3,2)
K ₂ O	0,5	(0,3-1)
Na ₂ O	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)



C3S	?
C2S	?
C3A	?
Fss	?

+Mn₂O₃, TiO₂, P₂O₅, CO₂

* Contrôle strict pour éviter le gonflement

Calcul « Bogue » composition des phases « potentielles »

Tous Fe₂O₃ comme C₄AF:
CaO et Al₂O₃ qui va avec



Al₂O₃ qui reste comme C₃A:
CaO qui va avec



CaO qui reste – CaO libre



Solution de deux
équations simultanées
pour C₃S et C₂S

C₄AF = 3,04Fe₂O₃
C₃A = 2,65Al₂O₃ – Fe₂O₃
C₃S = 8,60SiO₂ + 1,08Fe₂O₃ + 5,07Al₂O₃ – 3,07CaO
C₂S = 4,07CaO + 7,60SiO₂ – 1,43Fe₂O₃ – 6,72Al₂O₃

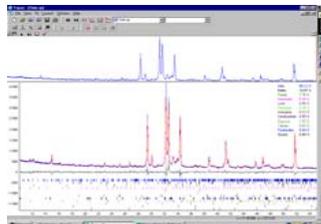
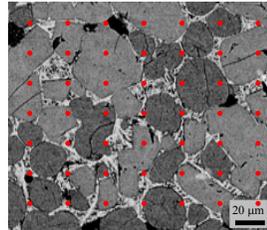
Mais: – Bogue = Bogus?

Solution solide
Réactions incomplètes

Quelles autres méthodes:

Microscopie, « point counting »
Très longue

Diffraction des rayons X,
-problème de solution solide
-Recouvrement des peaks



Solution solides

substitution atomique typique

C3S	ions Ca	2% Mg, 1% Fe, 0,5%Na
	ions Si	4% Al, 1% P
C2S	ions Ca	1% Mg, 1,5% K, 0,5% Na
	ions Si	7% Al, 2% Fe, 1% P
C3A	ions Ca	8% K, 3% Mg, 2% Na, 1%Ti
	ions Al	10% Fe, 10% Si
Ferrite	ions Ca	<1%(K,Na)
	ions (Al,Fe)	30-45% Fe, 35-50% Al,
		10% Mg, 7% Si, 3% Ti, 1% Mn

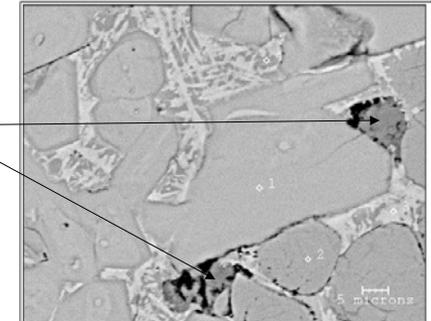
Écart types

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

Phases mineur

MgO, entre en solution solid, jusqu'à ~3-4%
 >3-4% formation du periclase, MgO, peut donner du gonflement

Les alcalis (K et Na),
 combine de préférence
 avec le sulfate (clinker)
 Dans les pores du
 clinker



Types de ciment

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

Gamme des ciments en Suisse romande

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