



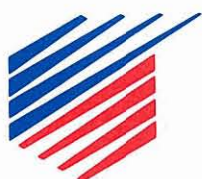
document public

mémento roches et minéraux industriels

matériaux pour ciment

C.H. Spencer

décembre 1990



Ministère de l'Industrie,
des Postes et Télécommunications
et du Commerce extérieur

Étude réalisée dans le cadre des
actions de Service public du BRGM



document public

mémento roches et minéraux industriels

matériaux pour ciment

C.H. Spencer

décembre 1990



Ministère de l'Industrie,
des Postes et Télécommunications
et du Commerce extérieur

Étude réalisée dans le cadre des
actions de Service public du BRGM

BRGM
Service Géologique National
Département Géologie
B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS CEDEX 2 - France
Tél. : (33) 38.64.34.34

Dans le cadre de ses activités de Service Public, sur crédits du Ministère de l'Industrie et de Commerce Extérieur, le Service Géologique National poursuit l'édition de mémentos dans une série dénommée Roches et Minéraux Industriels comportant les titres suivants :

ABRASIFS
AMIANTE
ANDALOUSITE
ARDOISE ET PIERRES ARDOISIÈRES
ARGILES COMMUNES POUR PRODUITS DE TERRE CUITE
ARGILES NOBLES POUR REFRACTAIRES ET CERAMIQUES FINES
ATTAPULGITES (PALYGORSKITES) ET SEPIOLITES
BARYTE
BENTONITE
BORATES
CARBONATES ET SULFATES DE SOUDE
CALCAIRES, CRAIES, MARBRES ET PRODUITS DERIVES A USAGE INDUSTRIEL ET
AGRICOLE
DIATOMITE
DISTHENE
DOLOMIE, MAGNESITE ET PRODUITS DERIVES A USAGE INDUSTRIEL
FELDSPATHS ET ROCHES A FELDSPATHOÏDES
GRAPHITE
GRANULATS
GRENAT
GYPSE ET ANHYDRITE
HALLOYSITE
KAOLIN
MARNE
MATERIAUX POUR CIMENT
MICAS
OLIVINE
PERLITE
PIERRES ORNEMENTALES
PIERRES PRECIEUSES ET SEMI-PRECIEUSES
PONCE
POUZZOLANE
SILICE
SILLIMANITE
SOUFRE
TALC
TOURBE
VERMICULITE
WOLLASTONITE
ZEOLITES
ZIRCON

Pour tous renseignements complémentaires veuillez contacter :

BRGM - Département Géologie
BP 6009 - 45060 ORLEANS Cédex 2
Tél. 38.64.35.93 (Mme J. BAUDOUIN) ou 38.64.35.47 (M. L. GALTIER)
Fax. 38.64.30.13

MATÉRIAUX POUR CIMENT

Le ciment, parfois dénommé de façon restrictive "ciment Portland artificiel", est une substance bon marché utilisée de manière universelle dans l'industrie de la construction. La production annuelle mondiale dépasse 1 milliard de tonnes en 1990. La production française, quant à elle, approche 30 millions de tonnes. Ce produit gris, mélangé à du sable, à des fragments rocheux et à de l'eau, forme une pâte facilement manipulable qui à son tour se transforme en béton.

Le ciment est produit à partir de roches facilement accessibles : calcaire, craie, marbre et argile. De façon générale, un mélange renfermant 80% de calcaire exempt de magnésie et 20% d'argile donne naissance à un produit chimiquement acceptable. Une quantité minimale de fer (1 à 3%) est généralement ajoutée pour augmenter la résistance du béton lors d'utilisation dans des conditions de sol chimiquement agressives.

Le mélange, finement broyé, est porté à 1450°C dans un four rotatif pour produire le clinker. Le ciment résulte d'un broyage très fin du clinker. Lors de la phase de broyage, du gypse (3%) est ajouté pour mieux maîtriser le temps de prise du béton. A ce niveau, le cimentier peut inclure 40% et davantage de matières pouzzolaniques de façon à diluer le ciment sans engendrer de notables modifications de ses propriétés intrinsèques, contribuant au contraire à améliorer sa résistance lors de l'utilisation dans des conditions de sols agressifs. Parmi les substances qui peuvent être aussi apportées figurent la pouzzolane, les cendres volantes ou les laitiers de hauts fourneaux.

MATERIALS FOR CEMENT

Cement, or more strictly (but misleadingly) termed "Artificial Portland Cement" is a cheap, everyday substance used universally in the construction industry. Current annual world consumption (1990) exceeds 1,000 million tonnes. French production is approaching 30 million tonnes. This grey powder, mixed with sand, rock fragments and water forms an easily handled slurry which in turn, sets to form concrete.

Cement is manufactured from commonly occurring rocks: limestone (which may be in the form of massive sedimentary limestone, chalk or marble) and clay. As a rule-of-thumb a mixture of 80% magnesia free limestone and 20% clay produces a chemically suitable raw mix. A minor proportion of iron ore is commonly added (1 to 3%) to enhance the concrete's resistance to certain chemically aggressive soil conditions.

The finely-ground raw mix is fired in a rotary kiln at 1,450 °C to produce a blocky slag-like "clinker" (term used in the industry). Cement is the very fine-grained powder issuing from the intense milling of the clinker. At the milling stage 3% gypsum is added to improve control over setting characteristics. Also at this stage up to 40% or more of so-called "pozzolanic" substances may be added to extend the cement with little detriment to the concrete's properties and indeed in some cases, improving resistance to certain aggressive soil conditions. These substances include natural pozzolan (certain volcanic ashes), fly ash or blast furnace slag.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	9
1 - ÉCONOMIE ET MARCHÉ	11
1.1 - Marché français	11
1.1.1 - Production et échanges	11
1.1.2 - Sociétés productrices	13
1.1.3 - Prix du ciment (en France)	14
1.1.4 - Marché intérieur	18
1.1.4.1 - Consommation par région	18
1.1.4.2 - Domaines d'utilisation en France	18
1.1.4.3 - Ventilation de la production du ciment	19
1.1.5 - Place de l'industrie cimentière dans l'économie nationale	19
1.2 - Marché mondial	20
2 - GÉOLOGIE ET GÉOCHIMIE	23
2.1 - Généralités	23
2.2 - Composants essentiels d'un mélange cru	24
2.2.1 - Calcaires	24
2.2.1.1 - Contraintes liées à la conjonction chimique	24
2.2.1.2 - Conditions de gisement	26
2.2.1.3 - Caractéristiques physiques	27
2.2.2 - Composants silico-alumineux	27
2.2.2.1 - Contraintes liées à la conjonction chimique	27
2.2.2.2 - Conditions de gisement	28
2.2.2.3 - Caractéristiques physiques	29
2.2.3 - Correcteurs	29
2.3 - Composants nuisibles dans le mélange cru	30
2.3.1 - Magnésie	30
2.3.2 - Alcalins	30
2.3.3 - Oxydes et anions menant à la création d'acides	30

2.4 - Additifs du ciment : gypse et anhydrite, pouzzolanes naturelles, laitiers, cendres volantes	31
2.4.1 - Gypse et anhydrite.....	31
2.4.2 - Pouzzolanes naturelles	31
2.4.3 - Laitiers et cendres volantes	33
3 - NORMES.....	35
3.1 - Normes françaises	35
3.1.1 - Généralités	35
3.1.2 - Classes de résistances	35
3.1.3 - Limites des classes et sous-classes	36
3.1.4 - Enoncé des garanties.....	36
3.1.5 - Valeurs garanties	37
3.1.6 - Autres ciments	38
3.2 - Normes internationales	39
4 - CHIMIE DU CIMENT	43
4.1 - Equations de base	43
4.2 - Exemple de calcul d'un mélange cru (à deux composants)	44
5 - TRAITEMENT	47
5.1 - Rappels historiques	47
5.2 - Processus de traitement dans une cimenterie moderne	48
5.2.1 - Abattage des matières premières	48
5.2.2 - Traitement du mélange cru	48
5.2.3 - Cuisson	49
5.2.4 - Traitement du clinker	49
6 - BIBLIOGRAPHIE ET RÉFÉRENCES	51

LISTE DES FIGURES

	Page
Fig.1 - Evolution de la production française de liants hydrauliques (1948-1989)	12
Fig. 2 - Situation et capacité des unités de production de ciment en France (1988)	15
Fig. hors texte - Schéma des processus de traitement dans une cimenterie moderne	h.t.

LISTE DES TABLEAUX

Tabl. 1 - Production et livraisons de liants hydrauliques en France (1979-1989)	12
Tabl. 2 - Commerce extérieur de l'industrie cimentière de la France	13
Tabl. 3 - Prix du ciment "départ usine" en France (janvier 1989 et avril 1990)	14
Tabl. 4 - Production et consommation de liants hydrauliques, en France, toutes entreprises confondues	17
Tabl. 5 - Répartition par type d'utilisation de la consommation de ciment en France	18
Tabl. 6 - Production de liants hydrauliques par catégorie	19
Tabl. 7 - Production mondiale de ciment par pays	20
Tabl. 8 - Production mondiale de ciment par continent (en 1988 et 1989)	20
Tabl. 9 - Liste des 25 premiers pays exportateurs de ciment en 1986, 1987 et 1989 (partiel)	21
Tabl. 10 - Liste des 25 premiers pays importateurs de ciment en 1986 et 1987	22

Tabl. 11 - Composition chimique de matières premières à caractère pouzzolanique d'origine volcanique	32
Tabl. 12 - Classes de résistance des ciments.....	36
Tabl. 13 - Valeurs minimales garanties relatives aux résistances à la compression d'un béton standard à ciment artificiel Portland	37
Tabl. 14 - Principaux types de ciments selon l'European Cement Association...	40
Tabl.15 - Liste de quelques ciments spéciaux selon l'European Cement Association	40
Tabl. 16 - Ciments Portland artificiels : Spécifications comparées des normes britanniques, américaines et françaises	41

INTRODUCTION

La mise au point du ciment Portland artificiel peut se classer parmi les grandes découvertes de l'humanité. A partir de substances très communes, le calcaire et l'argile, l'homme a réussi à fabriquer une poudre (le ciment), qui, mêlée à du sable, du gravier et de l'eau, durcit, donnant alors naissance à une véritable roche artificielle, le béton.

Par ses caractéristiques mécaniques, le béton est comparable aux matériaux de construction naturels, mais il présente sur eux l'avantage d'être mis en oeuvre sous la forme d'une pâte.

La fabrication du ciment Portland artificiel comporte trois étapes :

- **Le mélange cru** : cette phase comprend l'extraction, le transport, le broyage et l'homogénéisation des matières premières ; elle aboutit à l'élaboration d'une poudre de composition chimique précise.
- **Le clinker** : la poudre obtenue est cuite à 1450°C et se transforme en une scorie appelée "clinker". Celui-ci est inerte et peut être transporté ou stocké sans précautions particulières.
- **Le ciment Portland artificiel** : le broyage intense du "clinker" donne le ciment. Au cours du broyage, un peu de gypse est ajouté afin de mieux maîtriser le temps de prise du ciment. A ce stade, on peut également ajouter, parfois dans des proportions importantes, d'autres substances naturelles ou artificielles (pouzzolane, cendres volantes ou laitier). Ces matériaux, peu onéreux, contribuent à abaisser le prix de revient du ciment tout en améliorant les caractéristiques des bétons (résistance mécanique et aux eaux agressives...).

Le ciment Portland est **un liant hydraulique** : cette poudre, composée essentiellement de silicates de chaux, d'alumine et de fer, réagit avec l'eau pour former de nouveaux minéraux dont la recristallisation engendre la formation de liens et entraîne le durcissement du mélange.

Le ciment Portland artificiel n'est pas le seul liant hydraulique :

- **La chaux** est connue depuis l'antiquité. La réaction chimique de la "prise" est simple mais assez lente :

Chaux hydraulique $\text{CaOH} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

ou

Chaux vive $\text{CaO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$

- **Le ciment fondu “Lafarge” ou “ciment à haute teneur en alumine”** : les utilisations du ciment Portland et du ciment fondu se chevauchent. La composition de ce dernier ainsi que son mode de fabrication en font toutefois un produit particulier non décrit dans le présent mémento.
- **Le ciment blanc** est un ciment Portland artificiel dont les stades de fabrication sont identiques à ceux d'un ciment “gris” classique ; un grand soin est apporté aux niveaux de la sélection et du traitement des matières premières afin de garder la teneur en fer le plus bas possible ($<0,2\%$). Le prix du ciment blanc, destiné aux ouvrages décoratifs, est nettement plus élevé que celui du ciment gris.

L'invention du ciment Portland artificiel remonte à la première moitié du 19^{ème} siècle : travaux de L. VICAT, France (1818), travaux de J. ASPDIN, Grande Bretagne (1824). La première cimenterie a été construite par J. FROST en Grande Bretagne (1825), d'après les brevets de J. ASPDIN.

L'industrie cimentière en Europe et aux Etats-Unis a véritablement pris son essor à partir du milieu du XIX^{ème} siècle. Depuis lors, elle n'a cessé de se développer, le ciment étant devenu depuis le début du XX^{ème} siècle le principal liant hydraulique utilisé dans le monde pour la confection des mortiers et bétons destinés à l'industrie du bâtiment et du génie civil.

1 - ECONOMIE ET MARCHÉ

Type même de l'industrie lourde, l'industrie cimentière traite des matières premières généralement peu coûteuses, dans des installations de plus en plus puissantes et onéreuses, afin d'élaborer un produit dont la valeur unitaire est relativement faible.

Dans la mesure où il existe des ressources adéquates suffisantes, les unités de production sont établies au plus près des centres de consommation compte tenu du caractère pondéreux du ciment.

Aux Etats-Unis, les livraisons de ciment se font en général dans un rayon de moins de 250 km à partir des usines (60 % à moins de 150 km). Ces distances sont, en moyenne, sensiblement inférieures en Europe occidentale.

En l'absence de matières premières adéquates, et lorsque le niveau de la demande le justifie (marché local > 100 000 t/an de ciment), on a recours à des importations de clinker, transformé sur place en ciment, avec ajouts éventuels de constituants secondaires dans des centres de broyage : c'est le cas par exemple, en France, en Bretagne, aux Antilles, à la Réunion, en Nouvelle Calédonie ; c'est le cas également pour la Côte d'Ivoire et le Ghana en Afrique occidentale.

Provenant de cimenteries situées à proximité d'installations portuaires, le clinker est transporté par voie maritime ; il peut ainsi donner naissance à des courants de fret à très longue distance.

De tels courants interviennent également en zone continentale : le clinker est alors transporté par voie ferrée, mais sur de bien moindres distances : 150 à 500 km en Europe. Ces transferts sont justifiés, soit par une absence locale de ressources adéquates, soit par une politique, propre à certaines sociétés, visant à concentrer la production de clinker au niveau de très grosses unités (capacité supérieure à 1 million de tonnes/an).

1.1 - MARCHÉ FRANÇAIS

1.1.1 - PRODUCTION ET ÉCHANGES

En 1989, la production française de ciment Portland artificiel était de 25 880 000 tonnes. Après un déclin important entre 1974 et 1985, cette production est croissante pour la quatrième année consécutive (cf. tabl. 1 et fig. 1). Cependant, la production reste encore nettement en-dessous de celle des années 1970 à 1975, lorsque le seuil de 30 millions de tonnes était dépassé.

Mémento : matériaux pour ciment

(milliers de tonnes)

Année	Production	Livraisons (toutes destinations)	Consommation intérieure
1974	33 493	33 373	32 408
1975	30 646	30 671	29 666
1976	30 414	30 422	29 708
1977	29 835	29 785	28 877
1978	29 071	29 081	27 944
1979	28 825	28 768	27 872
1980	29 104	29 150	28 256
1981	28 229	28 210	27 182
1982	26 142	26 135	24 817
1983	24 504	24 433	23 010
1984	22 724	22 710	21 580
1985	22 219	22 186	21 162
1986	22 596	22 631	21 873
1987	23 556	23 578	22 483
1988	25 273	25 253	24 357
1989	25 995	25 876	25 014

(1) Ciments, chaux hydrauliques et liants assimilés (ciment naturel, ciment prompt..).

Tabl. 1 - Production et livraisons de liants hydrauliques en France entre 1979 et 1989 (milliers de tonnes) ; d'après Ciment et Chaux, n° 812, juin 1990.

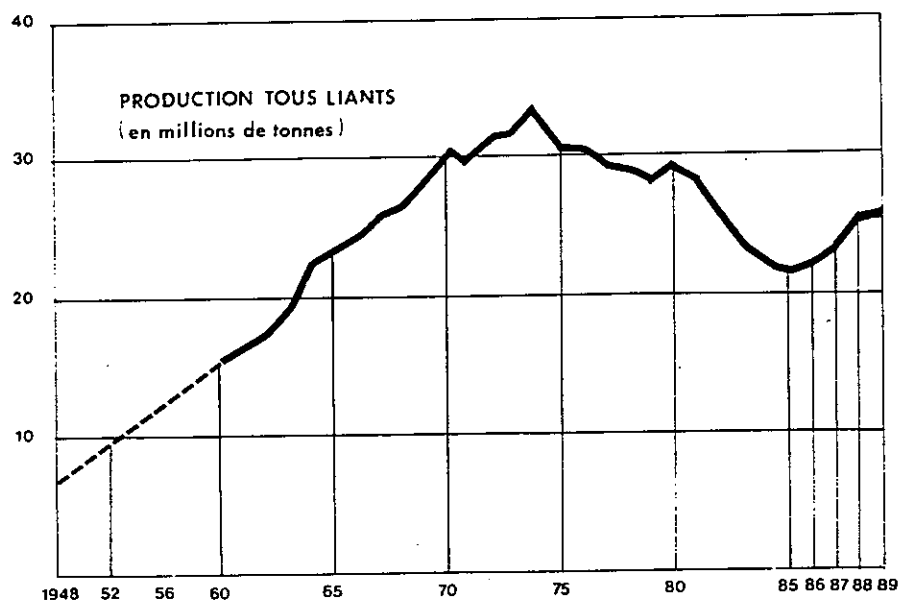


Fig. 1 - Evolution de la production française de liants hydrauliques, d'après Ciment et Chaux, n° 812, juin 1990.

Au plan du commerce extérieur (voir tabl. 2), la période 1979-1989 a vu une augmentation des tonnages de ciment d'importation, qui sont passés de 334 000 à 634 000 tonnes.

(en milliers de tonnes)

ANNEES	Consommation française (1)		IMPORTATIONS						EXPORTATIONS					
			Tous liants		Clinker		TOTAL		Tous liants		Clinker		TOTAL	
	t	Variation sur année précéd. %	t	Variation sur année précéd. %	t	Variation sur année précéd. %	t	Variation sur année précéd. %	t	Variation sur année précéd. %	t	Variation sur année précéd. %	t	Variation sur année précéd. %
1979	27 872	0,3	66	8,2	268	4,7	334	5,4	962	- 19,7	2 586	11,9	3 548	1,1
1980	28 256	1,4	73	10,6	335	25,0	408	22,2	967	0,5	1 626	- 37,1	2 593	- 26,9
1981	27 182	- 3,8	52	- 28,8	343	2,4	395	- 3,2	1 080	11,7	1 742	7,1	2 822	8,8
1982	24 817	- 8,7	51	- 1,9	341	- 0,6	392	- 0,8	1 369	26,8	1 690	- 3,0	3 059	8,4
1983	23 010	- 7,3	60	17,6	337	- 1,2	397	1,3	1 483	8,3	1 464	- 13,4	2 947	- 3,7
1984	21 580	- 6,2	99	65,0	312	- 7,4	411	3,5	1 229	- 17,1	1 454	- 0,7	2 683	- 9,0
1985	21 162	- 1,9	101	2,0	367	17,6	468	13,9	1 125	- 8,5	1 466	0,8	2 591	- 3,4
1986	21 873	3,4	105	4,0	321	- 12,5	426	- 9,0	863	- 23,3	1 202	- 18,0	2 065	- 20,3
1987	22 483	2,8	160	52,4	285	- 11,2	445	4,5	1 255	45,4	690	- 42,6	1 945	- 5,8
1988	24 268	7,9	168	5,0	379	33,0	547	22,9	1 153	- 8,1	878	27,2	2 031	4,4
1989	24 848	2,4	173	3,0	461	21,6	634	15,9	1 201	4,2	943	7,4	2 144	5,6

(1) Livraisons intérieures toutes entreprises + importations.

Tabl. 2 - Commerce extérieur de l'industrie cimentière de la France (milliers de tonnes). D'après Ciment et Chaux, n° 812, juin 1990.

De leur côté, les exportations de ciment et de clinker diminuent régulièrement depuis 1978, mais restent toutefois nettement supérieures aux importations. Cependant, ces échanges ne représentent que 10 % environ de la production française. En Europe, chaque pays fournit en effet préférentiellement son propre marché.

1.1.2 - SOCIÉTÉS PRODUCTRICES

Les ventes de ciment Portland artificiel en France peuvent être divisées en trois segments. Par accords tacites, ceux-ci sont restés d'ailleurs assez stables depuis 1975, afin que ne se développe pas une concurrence "sauvage" entre les différents producteurs.

Le marché se décompose donc ainsi :

- 33 % Société des Ciments Français ;
- 33 % Ciments Lafarge (filiale française de Lafarge Coppée) ;

– 34 % partagés entre :

- S.A. Vicat,
- Ciments d'Origny,
- Ciments de la Loire,
- Ciments de Champagnole,
- Ciments et Engrais de Dannes et de l'Est,
- Ciments de l'Adour.

S.A Vicat détient la plus grande partie du dernier tiers, assurant environ 16 % (statistiques 1985-86) de la production française.

Les unités de production : la carte de la figure 2 montre les emplacements et la capacité de chaque unité de production de ciment en France.

1.1.3 - LE PRIX DU CIMENT (EN FRANCE)

Les prix du ciment à la tonne (CPJ 45) pratiqués par les principales usines françaises en janvier 1989 sont les suivants :

Usine de	F/tonne 01/1989	F/tonne 04/1990
Origny	468,00	505,00
Cormeilles	491,00	518,00
Rombas	425,00	523,00
Couvrot	431,00	532,00
Altkirch	479,00	512,00
Val d'Aizergues	497,00	507,00
Contes	486,00	512,00
Beaucaire	433,00	533,00
Boussens	488,00	515,00
La Couronne	484,00	512,00
Airvault	443,00	544,00
Ranville	443,00	543,00

Tabl. 3 - Prix du ciment "départ usine" en France ; janvier 1989 et avril 1990, F/t, H.T. (source : Le Moniteur des Travaux Publics et du bâtiment, 28/09/1990, n° 4531).

En 1979, le prix moyen était de 205 F/t. On peut noter que l'industrie fournit un indice pondéré national pour le prix du ciment et publie régulièrement dans Le Moniteur. Cet indice était 103 pour avril 1990.

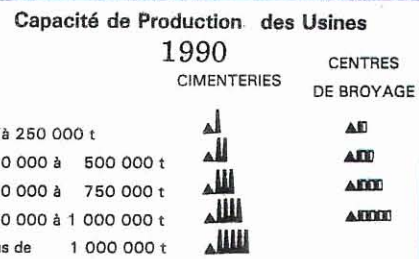


Fig. 2 - Situation et capacité des unités de production de ciment en France.
d'après Ciment et Chaux, L'annuaire du Syndicat National des
Fabriquants de Ciments et de Chaux (SNFCC), 1990.

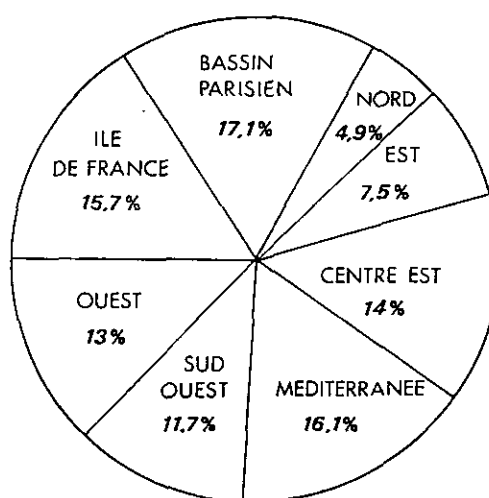
Mémento : matériaux pour ciment

(en milliers de tonnes)

Zones d'Etudes et d'Aménagement du Territoire	Circonscriptions d'Action Régionale	1988		1989		% 1989/1988	
		Production	Consommation	Production	Consommation	Production	Consommation
ILE-DE-FRANCE	Ile-de-France	1 695	3 588	1 737	3 866	2,5	7,7
BASSIN PARISIEN	Champagne-Ardenne						
	Picardie						
	Haute-Normandie	4 775	4 221	4 981	4 211	4,3	- 0,2
	Centre						
	Basse-Normandie						
	Bourgogne						
NORD	Nord-Pas-de-Calais	1 809	1 088	1 923	1 201	6,3	10,4
EST	Lorraine						
	Alsace	3 301	1 824	3 431	1 855	3,9	1,7
	Franche-Comté						
OUEST	Pays de la Loire						
	Bretagne	3 822	3 313	3 817	3 215	- 0,1	- 3,0
	Poitou-Charentes						
SUD-OUEST	Aquitaine						
	Midi-Pyrénées	2 106	2 865	2 162	2 938	2,7	2,5
	Limousin						
CENTRE-EST	Rhône-Alpes						
	Auvergne	3 953	3 234	4 108	3 428	3,9	6,0
MEDITERRANEE	Prov.-Alpes-C. d'Azur						
	Languedoc-Roussillon	3 812	3 967	3 836	3 961	0,6	- 0,2
	Corse						
	TOTAL GENERAL	25 273	24 100	25 995	24 675	2,9	2,4

Nota : les chiffres de consommation ne comprennent pas les tonnages importés (168 000 t en 1988 et 176 000 t en 1989).

Part relative des régions dans les livraisons intérieures tous liants des cimenteries.



Tab. 4 - Production et consommation de liants hydrauliques en France, toutes entreprises confondues : années 1988 et 1989, valeurs en milliers de tonnes ; d'après Ciment et Chaux, mai 1990 (hors série).

1.1.4 - MARCHÉ INTÉRIEUR

1.1.4.1 - Consommation par région

Le tableau 4 (p. 17) donne les statistiques concernant la production et consommation des liants hydrauliques par région. On constate une nette prédominance de la région Ile de France et du Bassin parisien qui ont reçu 32,8% du total des livraisons sur le territoire métropolitain.

1.1.4.2 - Domaines d'utilisation en France

Le ciment trouve un débouché dans deux grands domaines :

- secteur du bâtiment : logements, bâtiments scolaires et industriels etc ;
- génie civil : routes, chemins de fer, ouvrages d'art, etc.

On peut constater qu'entre 1974 et 1987, la consommation de ciment dans le génie civil a augmenté de 10% par rapport à celle du secteur bâtiment (tabl. 5). Toutefois il faut noter que, globalement, la consommation française pour l'année 1989 est inférieure de près de 10 millions de tonnes à celle de 1974.

	(% arrondis)			
	1974	1987	1988	1989
Bâtiment				
Logements neufs	35,5	23	23	22
Bâtiments scolaires, universitaires et hospitaliers	5	2	1,5	1,5
Bâtiments industriels	6,5	6,5	6,5	6,5
Autres bâtiments	11	14	13,5	13,5
Entretien de bâtiments	16	21	21	20,5
Total bâtiment	74	66,5	65,5	64,0
Génie civil				
Génie civil industriel	1,5	0,5	0,5	0,5
Ouvrages d'art	3	3,5	4,0	5,0
Routes et autoroutes	3,5	11	12,5	13,0
Voies ferrées, Ouvrages maritimes et fluviaux	2	2	1,5	1,5
Eau, assainissement	1,5	2	2,5	2,5
Voirie, réseaux divers	4,5	3,5	3,5	3,5
Divers	10	11	10	10
Total Génie Civil	26,0	33,5	34,5	36,0

Tabl. 5 - Répartition par type d'utilisation de la consommation de ciment en France. Ciments et Chaux, mai 1990 (hors série).

1.1.4.3 - Ventilation de la production du ciment

Le tableau 6 fournit la répartition des liants hydrauliques par catégorie. On constate que le ciment Portland artificiel composé (CPJ 45 et 45R - cf. chapitre 3) représente plus de la moitié du marché.

(en % du total)

	1988	1989
CPA HPR et HP	9,5	11,3
CPA 55R et 55	17,9	19,6
CPJ 55R et 55	3,4	3,2
CPA 45R et 45	0,6	0,5
CPJ 45R et 45	54,5	51,9
CPJ 35	1,0	1,0
CLC 45	0,9	1,1
CHF - HP - 55 et 45	0,5	0,3
CLK 45R et 45	3,6	3,5
Ciments à maçonner	0,7	0,6
Ciments spéciaux	3,3	3,2
Ciments divers	2,2	2,1
Chaux hydrauliques	1,9	1,7
	100,0	100,0

Tabl. 6 - Production de liants hydrauliques par catégorie. Ciments et Chaux, mai 1990 (hors série).

1.1.5 - PLACE DE L'INDUSTRIE CIMENTIÈRE DANS L'ÉCONOMIE NATIONALE

L'industrie cimentière, de par les grandes sociétés françaises qui se sont constituées autour du produit de base, le ciment, se classent parmi les plus dynamiques et productives du pays. Lafarge Coppée et Ciments Français se situent en 1989 respectivement aux 31ème et 46ème rangs des sociétés françaises en terme de bénéfices. Si l'on fait référence aux marges réalisées, Ciments d'Origny, avec 9%, et Vicat, avec 8%, se situent aux 40ème et 50ème rangs. Avec un chiffre d'affaires de 18 milliards de francs réalisé en 1989, Lafarge Coppée demeure le premier cimentier français et occupe le 24ème rang parmi les plus grandes sociétés du pays.

Lafarge Coppée et Ciments Français sont caractérisés par leur diversification sur d'autres produits, généralement liée à l'industrie des matériaux de construction. Ainsi, en 1989, le chiffre d'affaires de Lafarge Coppée comme suit : ciment (42,4%), granulats (31,1%), plâtre (6,4%), matériaux divers (13,7%) et génie génétique (6,4%). De son côté, Ciments Français a réalisé en 1989 50% de son chiffre d'affaires dans le secteur des granulats.

1.2 - MARCHÉ MONDIAL

Parmi les pays producteurs (tabl. 7) la première place, occupée depuis deux décennies par l'Union Soviétique, a été prise à partir de 1985 par la République Populaire de Chine. La France se situait, en 1989, au dixième rang, derrière l'Espagne, la Corée du Sud et l'Italie. La production française était proche de celle du Brésil et de l'ancienne République Fédérale d'Allemagne (RFA).

(en millions de tonnes)

	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	% 89/88
TOTAL MONDE	808,1	881,1	884,0	884,0	917,0	937,2	951,5	1 000,0	1 035,0	1 106,0	1 141,1	3,2
1 CHINE	70,0	80,0	82,9	95,0	108,2	121,1	142,2	166,0	180,0	204,0	208,0	2,0
2 U.R.S.S.	123,0	124,8	127,2	124,0	128,0	129,9	131,0	134,0	136,0	138,5	140,1	1,2
3 JAPON	87,1	87,4	84,4	80,3	80,5	78,4	72,6	71,0	71,4	77,6	77,5	- 0,1
4 U.S.A.	76,7	68,2	65,0	57,5	63,9	70,5	70,7	71,3	71,1	69,7	70,3	0,9
5 INDE	18,2	17,8	20,9	20,4	25,4	29,1	31,8	33,6	36,5	42,9	42,1	- 1,9
6 ITALIE	39,4	41,9	42,8	41,5	40,1	38,9	37,2	35,9	36,9	38,5	40,4	4,9
7 COREE DU SUD	16,6	15,5	15,6	17,9	21,2	20,4	20,5	23,2	25,6	29,0	30,4	4,8
8 ESPAGNE	27,7	28,0	28,8	29,6	30,6	25,4	21,9	22,0	23,0	24,4	27,4	12,3
9 BRESIL	24,9	27,2	26,0	25,6	20,9	19,5	20,6	25,3	25,5	25,3	25,9	2,4
10 FRANCE	28,8	29,1	28,2	26,1	24,5	22,7	22,2	22,5	23,4	25,2	25,9	2,8
11 R.F.A.	34,6	33,1	29,9	27,5	27,9	26,2	22,9	24,4	23,0	24,2	25,9	7,0
12 TURQUIE	13,9	12,9	15,1	16,0	13,9	15,7	17,5	20,0	22,0	22,7	23,8	4,8
13 MEXIQUE	15,2	16,3	17,8	19,2	17,0	18,4	20,7	20,4	22,4	22,5	22,6	0,4
14 TAIWAN	11,9	14,1	14,4	13,6	14,8	13,3	13,6	14,0	14,9	17,3	18,2	5,2
15 POLOGNE	19,1	18,4	14,2	15,8	16,0	16,4	14,8	15,7	15,7	17,0	(16,7)	- 1,8

Tabl. 7 - Production de ciment dans les principaux pays producteurs (en millions de tonnes, non compris le clinker exporté). Ciment et Chaux, mai 1990 (Hors série)

Au niveau mondial, on constate (tabl. 8) que l'Asie et l'Europe produisent chacune environ 40% du marché mondial, l'Amérique 16 % et l'Afrique se contentent d'un très modeste 4,6 %.

(1 000 t)

	1988	1989	% 1989/1988	% de la production mondiale
Total Monde	1 112 550	1 141 500	+ 2,6	-
Asie	477 200	488 135	+ 2,3	42,7
Europe				
(URSS incluse)	411 800	421 400	+ 2,3	37
dont - CEE	164 517	171 840	+ 4,4	15
- Cembureau	199 305	208 152	+ 4,4	18,2
Amérique	167 000	172 545	+ 3,3	15
Afrique	51 000	53 220	+ 4,3	4,6
Océanie	7 550	8 000	+ 6	0,7

Tabl. 8 - Production mondiale de ciment par continent en 1988 et 1989. D'après Ciment et Chaux, 1990.

Mémento : matériaux pour ciment

En ce qui concerne le commerce international, les tableaux 9 et 10 indiquent pour les années 1986-87-89 les flux les plus significatifs.

<i>(en milliers de tonnes)</i>			
Classement 1988	1986	1987	1989
1 - Grèce	7 025	7 018	5 116
2 - Corée du Sud	4 405	4 837	349
3 - Espagne	5 771	4 748	3 342
4 - Mexique	3 964	4 569	4 000
5 - Japon	5 516	4 288	6 589
6 - Taïwan	3 599	3 773	2 230
7 - Canada	3 204	3 695	3 200
8 - URSS	2 771	2 423	1 800
9 - Roumanie	2 000	2 000	2 500
10 - France	2 065	1 945	3 375
11 - RDA	1 855	1 800	1 200
12 - Indonésie	1 743	1 800	4 112
13 - Belgique	1 875	1 786	
14 - RFA	1 380	1 271	2 149
15 - Vénézuëla	1 436	1 100	
16 - Colombie	1 165	1 096	
17 - Malaisie	538	934	
18 - Pologne	1 102	823	1 000
19 - Yougoslavie	862	740	
20 - Jordanie	182	739	
21 - Tunisie	618	700	
22 - Luxembourg	666	677	
23 - Corée du Nord	500	600	
24 - Irak	500	420	
25 - Honk-Kong	520	508	

Tabl. 9 - Liste des 25 premiers pays exportateurs de ciment en 1986, 1987 et 1989 (partiel). Ciments et Chaux, 1990.

Mémento : matériaux pour ciment

(en milliers de tonnes)		
Classement 1987	1986	1987
1 - USA	14 804	15 946
2 - Honk-Kong	4 130	4 453
3 - Egypte	5 363	4 000
4 - Pays-Bas	3 075	2 994
5 - Japon	1 196	2 254
6 - Turquie	71	2 037
7 - Chine	3 000	2 000
8 - Singapour	2 103	1 933
9 - Arabie Saoudite	4 500	1 922
10 - RDA	1 814	1 830
11 - Bangladesh	1 550	1 300
12 - Algérie	2 472	1 200
13 - Nigeria	810	923
14 - URSS	1 110	901
15 - Koweït	1 750	900
16 - Grande-Bretagne	511	851
17 - Côte-d'Ivoire	1 183	810
18 - Italie	319	765
19 - Hongrie	715	720
20 - Norvège	560	593
21 - Canada	490	586
22 - Macau	413	555
23 - Sri-Lanka	400	519
24 - Yemen Sud	500	500
25 - Ghana	249	500

Tabl. 10 - Liste des 25 premiers pays importateurs de ciment en 1986 et 1987.
D'après Ciments et Chaux, n° 810, mars 1990.

Les vingt dernières années ont vu une rationalisation du marché international : en effet, la concentration des sociétés ainsi que la construction de grosses usines ont permis une augmentation de la production totale de 210 %. En 1987 trois sociétés basées en Europe contrôlaient 10 % du marché mondial :

- Holderbank, Suisse ;
- Lafarge Coppée, France ;
- Blue Circle, Grande Bretagne.

En 1988, Ciments Français est passé au 4ème rang mondial, derrière les trois sociétés précédemment citées.

2 - GÉOLOGIE ET GÉOCHIMIE

2.1 - GÉNÉRALITÉS

Un mélange susceptible de fournir après cuisson un clinker "Portland" peut être réalisé à partir d'un large éventail de matières premières. La liste suivante indique celles qui se trouvent le plus couramment utilisées :

- calcaire ;
- calcaire marneux ;
- marbre ;
- marbre siliceux ;
- argile commune ;
- argile sableuse ;
- schiste métamorphique ;
- shale ;
- silt ;
- sable ;
- grès ;
- quartzite ;
- minerai de fer ;
- bauxite ;
- charbon.

Pour déterminer la proportion des différents composants, le cimentier fait appel à une série de paramètres chimiques (cf. chapitre 4, p. 43) ; les trois principaux sont les suivants :

- le coefficient de saturation en chaux d'après Kühl (Kühl en abrégé) ;
- le module silicique (M.S.) ;
- le module alumino-ferrique (M.A.F.).

La notion de brulabilité, paramètre quantifié par un indice, est importante, quoique secondaire, pour le cimentier car elle est étroitement liée à son désir de réduire la consommation énergétique de son unité de production. Des matières premières contenant les oxydes sous forme combinée, montrent une tendance à réagir plus rapidement dans le four que les oxydes non-combinés.

2.2. - COMPOSANTS ESSENTIELS D'UN MÉLANGE CRU

L'oxyde de calcium (chaux) est présent dans tous les minéraux artificiels des ciments Portland : c'est le constituant essentiel de ces produits. Le calcaire étant la substance renfermant le plus de chaux dans la nature, il va de soi que l'industrie cimentière s'est développée préférentiellement dans les régions du monde où cette ressource abonde.

Lors de la cuisson du calcaire d'un mélange cru pour ciment, le gaz carbonique dégagé sous forme gazeuse entraîne une perte de masse de 44 % de la molécule de calcite, comme l'indique l'équation chimique qui régit le processus :

Réaction	CaCO_3	$\rightarrow$	CaO	+	CO_2
Poids atomique des composants	$40 + 12 + (16 \times 3)$		$40 + 16$		$12 + (16 \times 2)$
Poids moléculaires	100		56		44
	Calcaire		Chaux		Gaz carbonique

Un cimentier considère donc que pour fabriquer une tonne de clinker il faut 1,55 à 1,60 tonne de matières premières, essentiellement du calcaire. Pour cette raison, *l'emplacement d'une cimenterie est presque toujours situé à proximité de la ressource carbonatée*, pour éviter le transport du CO_2 (et dans une moindre mesure l'humidité intrinsèque de la roche).

2.2.1 - CALCAIRES

2.2.2.1 - Contraintes liées à la conjonction chimique

En règle générale, tous les calcaires présentant des teneurs en CaO de 45 % et en MgO <2% conviennent pour la fabrication du ciment (cf. § 2.3).

La roche, dont le chimisme se rapproche le plus de la composition idéale pour la fabrication de ciment Portland (cf. chapitre 4), est appelée calcaire marneux : elle recèle environ 80 % de CaCO_3 et 20 % d'argile. Dans la nature, cette roche parfaite n'existe pas en quantités suffisantes. C'est la raison pour laquelle toutes les cimenteries mélangent des matières premières, même si, dans certains cas, elles se

contentent d'ajouter de petites quantités d'argile, d'oxyde de fer ou de bauxite. L'élaboration du mélange cru à partir de différentes roches permet au cimentier de mieux en contrôler la composition et lui donne la possibilité de fabriquer plusieurs types de ciment.

Exemple de la "pierre à ciment": carrière de la société VICAT S.A. à Sassenage, près de Grenoble (Isère, France) :

Dans cette carrière, le calcaire est connu sous le nom de "pierre à ciment" car la composition naturelle de certaines couches est proche de celle d'un mélange cru optimal. On observe dans la carrière cinq couches de calcaires argileux d'âge sénonien. Les teneurs en oxydes sont approximativement : $\text{CaO} = 44,63 \%$; $\text{SiO}_2 = 18,88 \%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 1,60 \%$ et $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,58 \%$. Le calcul du coefficient de saturation en chaux d'après Kühl (cf. chapitre 4) donne 0,81 ; l'idéal serait 0,95 à 0,97 ; cette pierre est donc légèrement sous-saturée en chaux. Il sera donc nécessaire pour fabriquer un ciment Portland artificiel d'ajouter quelques pour-cent de calcaire à haute teneur en CaO .

Les caractéristiques chimiques du gisement de Sassenage sont très proches, pour le cimentier, des conditions idéales mais sont assez exceptionnelles. Le cas le plus fréquemment rencontré dans les quelques 1500 cimenteries dans le monde comprend :

- une ressource calcaire, avec une teneur en $\text{CaO} > 48\%$,
- une ressource silico-alumineuse, presque toujours de l'argile.

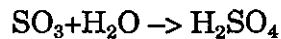
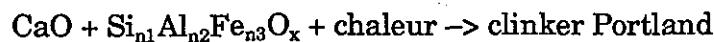
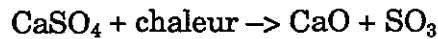
La chaux peut provenir de la plupart des roches composées de carbonate de calcium. De par leurs conditions de gisement, les calcaires d'âges secondaire et tertiaire d'Europe et d'Amérique du Nord, qui forment souvent sur de vastes étendues des couches épaisses, horizontales et homogènes, constituent de bonnes ressources. Dans les régions de socle cristallin, le marbre peut constituer le composant calcaire à condition de répondre aux exigences chimiques (en particulier en ce qui concerne MgO , cf. chapitre 4) ; c'est ainsi que de nombreuses cimenteries dans le monde exploitent le marbre, comme par exemple celles de Chingalume au Malawi.

L'utilisation de calcaires excessivement humides s'avère très indésirable dans les processus de traitement par voie sèche, développés depuis la deuxième guerre mondiale. L'utilisation de la craie, la matière première pour chaux et ciment, traditionnelle pour la région parisienne, a disparu.

En région parisienne, l'utilisation de la craie comme matière première, autrefois traditionnelle pour la fabrication de chaux et ciment, a maintenant disparu. En France, la Bretagne est dépourvue de tout gisement de calcaire. C'est pourquoi certains grands groupes cimentiers (Ciments Français, Ciments Lafarge) ont sérieusement songé, durant les années 70, à exploiter des dunes de sables coquilliers situées au large de Brest, par des tranches d'eau de 40 à 80 m.

Il peut être raisonnable dans certains cas d'envisager l'exploitation de sables calcaires de plage ou de sables oolitiques ; en Arabie Saoudite, les récifs coralliens ont fait l'objet d'études dans ce sens. Deux cimenteries dans ce pays exploitent actuellement du calcaire corallien quaternaire en bordure de la Mer Rouge, à quelques mètres du récif vivant (Yanbu-Al-Bahr et Duba).

Le gypse et l'anhydrite pourraient également fournir l'oxyde de calcium du ciment lorsqu'une demande parallèle d'acide sulfurique le justifie. Les réactions chimiques simplifiées sont les suivantes :



Cependant, les tentatives effectuées en Grande Bretagne et en URSS pendant les années 50 n'ont pas été satisfaisantes.

2.2.1.2 - Conditions de gisement

La taille minimum d'un gisement de calcaire destiné à assurer le fonctionnement d'une cimenterie est évidemment liée à la quantité de ciment que les promoteurs du projet envisagent de produire. Une cimenterie est une industrie lourde représentant des investissements importants. Il faut attendre 5 à 10 ans, parfois plus, pour un retour du capital investi. En conséquence, les réserves doivent correspondre à un minimum de 15 à 20 ans de production.

Une cimenterie utilisant une technologie moderne (four rotatif, cyclones etc...) est généralement conçue pour produire plus de 50 tonnes/ jour (ou 15 000 tonnes/an). Le besoin en calcaire d'une telle unité pendant 20 ans serait donc de l'ordre de 500 000 tonnes. Par exemple, un gisement d'une superficie de 3 hectares, avec une couche de calcaire de 10 m d'épaisseur, soit environ 660 000 tonnes, représenterait un schéma prudent pour ce cas de figure.

A l'opposé, la plus grande cimenterie du monde (5 fours à ciment sur le même site), possède une capacité annuelle de production de 6 459 000 tonnes. Elle appartient à la société japonaise MITSUBISHI MINING AND CEMENT et est située à Kanda préfecture du Fukuoka-Ken. Elle consomme environ 10 Mt de calcaire par an, soit en 25 ans 250 Mt. Si la couche de calcaire est épaisse de 30 m, l'emprise sur le terrain d'une exploitation nécessaire à l'approvisionnement d'une telle cimenterie représenterait une superficie de 4 km².

Géométrie et recouvrement

Les exigences des très grosses unités de production en Europe, en Amérique du Nord et au Japon, contraignent les exploitants à ne rechercher que des gisements exploitables à ciel ouvert et présentant un rapport découverte/minerai faible (0,1 à 0,5). Cependant, si les impératifs économiques le justifient, l'exploitation en galerie pourrait, dans de rares cas, être rentable.

2.2.1.3 - Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques intrinsèques d'un calcaire sont, d'une manière générale, d'une importance secondaire. La broyabilité du mélange cru importe davantage. Un calcaire riche en grains de silice grossiers et arrondis est beaucoup plus difficile à broyer qu'un calcaire pur ou un calcaire dont la silice est combinée, sous forme d'argile par exemple. Des problèmes semblables peuvent être rencontrés avec un calcaire oolitique. L'utilisation de telles matières premières implique une augmentation de la taille des ateliers de broyage et entraîne bien évidemment une élévation du coût énergétique de ce poste.

2.2.2 - COMPOSANTS SILICO-ALUMINEUX

2.2.2.1 - Contraintes liées à la conjonction chimique

La nature présente un éventail assez large de matières premières susceptibles de constituer le composant silico-alumineux d'un mélange cru. Mais dans chaque cas les teneurs en silice et en alumine du composant carbonaté sont le principal facteur de choix.

Si un calcaire **pur** est utilisé pour fournir la chaux du mélange cru, l'apport silico-alumineux et ferreux peut être assuré par la combinaison de roches très variées : argile, schistes métamorphiques, schistes argileux, sables, silts et grès. Par contre, l'utilisation d'un calcaire marneux (par exemple celui exploité par Vicat S.A. à Sassenage déjà mentionné) limite considérablement le choix car une partie des composants silico-alumineux sont déjà présents. Il s'agit alors d'apporter ce que le cimentier appelle "un correcteur", c'est-à-dire une substance contenant une haute teneur de l'oxyde requis (Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , CaO suivant les cas), mais qui ne représente que 2 ou 3 % du mélange cru (cf. § 2.1.4).

Sur le plan minéralogique, toutes les argiles riches en Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 sont utilisables. Même des modestes teneurs en K_2O (présent dans des illites par exemple) ne sont que rarement un handicap car dans un mélange cru contenant de l'illite, la potasse ne représente que 0,3 à 0,4 % (pour un seuil maximum

admissible de 1 %). Les argiles kaolinitiques conviennent bien, surtout pour le ciment blanc où on recherche à limiter la teneur en fer.

Par contre les argiles magnésiennes (attapulгите, sépiolite, saponite etc.) ne peuvent pas être admises en quantités importantes (cf. § 2.3).

Employé couramment dans les cimenteries européennes, le charbon pulvérisé utilisé comme combustible dans le four à ciment contient une proportion non négligeable de matières silico-alumineuses (les cendres). Cette fraction réagit dans le four avec la chaux, de la même façon que l'argile ou que les autres ajouts silico-alumineux. Le cimentier doit donc impérativement tenir compte de la composition des cendres s'il utilise du charbon comme combustible.

L'utilisation de charbon comme combustible dans les fours à ciment permet la valorisation de houilles de mauvaise qualité : la haute teneur en cendres de ces combustibles n'est pas une gêne pour le cimentier. Le charbon est ainsi entièrement valorisé, ce qui n'est pas le cas dans une centrale thermique où la manutention et le stockage des cendres sont onéreux.

2.2.2.2 - Conditions de gisement

a) Réserves

Il faut bien évidemment s'assurer que les réserves du gisement correspondent aux besoins de la cimenterie. D'une manière générale, la taille minimale d'un gisement d'argile, destinée à être mélangée avec des calcaires relativement purs, sera le cinquième du dépôt constituant la ressource la ressource en calcaire.

b) Géométrie et recouvrement

Dans la mesure où les matières silico-alumineuses représentent rarement plus de 20 % du mélange cru, on peut envisager leur transport sur des distances relativement importantes, ainsi que des conditions de gisements plus complexes et plus onéreuses que dans le cas du calcaire. Il n'est pas possible de définir un rapport D/E* maximum, car l'équation est essentiellement économique ; les conditions de rentabilité de l'unité de production dépendent beaucoup plus des problèmes rencontrés lors de l'exploitation de la fraction carbonatée.

* : D = découverte ; E = exploitable

2.2.2.3 - Caractéristiques physiques

Dans le chapitre précédent (cf. § 2.2.1.3) les problèmes de broyage liés à la présence de sable ou de calcaire oolitique dans un mélange cru ont été évoqués. La présence de sable dans un ajout argileux ou la nécessité d'augmenter le pourcentage en SiO_2 par ajout de sable entraînent les mêmes difficultés : le broyage de ces matières est plus onéreux tant sur le plan énergétique qu'au niveau de l'usure des installations. Devant la nécessité d'augmenter la teneur en silice du mélange cru, le cimentier préfère par exemple employer une diatomite, très facile à broyer et beaucoup plus réactive dans le four, qu'un sable.

Idéalement, le cimentier souhaite trouver la silice déjà combinée avec l'alumine et le fer dans le réseau argileux. L'indice de "brulabilité" est ainsi amélioré, c'est-à-dire que les minéraux hydrauliques se forment plus rapidement lors de la cuisson : en conséquence, l'énergie consommée par tonne de clinker fabriqué s'en trouve diminuée.

2.2.3 - CORRECTEURS

Dans l'industrie cimentière un correcteur est défini comme une substance contenant une haute teneur en un des oxydes nécessaires à la fabrication du ciment. Les substances naturelles utilisées habituellement sont :

- minerai de fer (apport de Fe_2O_3) ;
- bauxite (apport de Al_2O_3) ;
- calcaire pur (apport de CaO) ;
- sable, grès, diatomite (apport de SiO_2).

Les variations chimiques tolérées dans la composition d'un mélange cru d'un ciment sont très limitées. La présence de petits stocks de ces substances permet de modifier légèrement la composition du mélange afin d'assurer les corrections nécessaires. Cet ajout de petites quantités de correcteurs a lieu juste avant le broyage du mélange cru. Leur utilisation est soumise aux indications fournies par les laboratoires de l'usine en cas d'anomalies de composition, anomalies souvent dues soit à l'hétérogénéité des matières premières utilisées, soit parfois à des erreurs de manutention.

2.3 - COMPOSANTS NUISIBLES DANS LE MÉLANGE CRU

2.3.1 - MAGNÉSIE (MgO)

La présence de MgO, sous forme de dolomie [(Ca, Mg) CO₃], dans l'argile (sépiolite ou attapulgite), ou dans des ferro-magnésiens, est très nuisible. En effet, dans le four à ciment, MgO ne se combine pas à la silice pour former des minéraux hydrauliques artificiels. La magnésie reste isolée et se transforme en périclase (de composition chimique MgO), minéral instable qui, lorsqu'il se combine avec l'eau, augmente considérablement en volume. Ce processus correspond à la formation de brucite (hydro-périclase) dans le ciment. Dans un béton, la présence de ces minéraux entraînerait une chute brutale de la résistance mécanique due aux fissures créées par le gonflement du périclase.

Les teneurs maximales en MgO admissibles dans un ciment varient d'un pays à l'autre. En France le seuil maximal est de 5% dans le ciment, soit environ 3% dans les matières crues.

2.3.2 - ALCALINS (Na₂O, K₂O)

La nature caustique de ces oxydes fait qu'ils ne peuvent être admis qu'en petite quantité (<1%) dans le mélange cru.

2.3.3 - OXYDES ET ANIONS MENANT À LA CRÉATION D'ACIDES (Cl, SO₃, P₂O₅)

Admissibles seulement à des teneurs très faibles, le chlore (généralement sous forme de sel gemme ou halite), le soufre (généralement sous forme de gypse ou pyrite) et le phosphore, nécessitent une surveillance particulière pendant la sélection des matières premières. A 1450°C, dans le milieu oxydant du four à ciment, le chlore et le SO₃ provoquent la formation de concrétions qui bouchent le four, tandis que le phosphate rentre dans le clinker, nuisant fortement à la résistance du ciment.

Dans certains pays, le sel ou le gypse, précipités dans les fissures et diaclases des calcaires et des argiles, sont très répandus : le climat chaud désertique provoque fréquemment de tels phénomènes. Dans ce cas, une solution technique consiste à soutirer une partie des gaz du four pour neutraliser leur contenu acide. Ce processus entraîne une lourde augmentation de la consommation d'énergie, mais permet d'augmenter les seuils admissibles. Les teneurs admissibles sur cru pour ces trois substances sont approximativement :

Cl	0,015 % (150 ppm)
SO ₃	0,3 %
P ₂ O ₅	0,5 %

2.4 - ADDITIFS DU CIMENT : GYPSE ET ANHYDRITE, POZZOLANES NATURELLES, LAITIERS, CENDRES VOLANTES

2.4.1 - GYPSE ET ANHYDRITE

2 à 3 % de gypse sont systématiquement ajoutés au clinker dans le broyeur à ciment. Le gypse se comporte comme un régulateur de prise du ciment (cf. § 5.2.4).

Les exigences de qualité pour le gypse utilisé dans le ciment sont de loin les moins sévères parmi les différentes utilisations industrielles de ce minéral :

- la couleur n'a pas d'importance, hormis pour le gypse employé pour la fabrication de ciment blanc ;
- les impuretés, argileuses ou siliceuses peuvent atteindre 30%.

L'anhydrite n'est pas considérée comme une impureté ; elle présente au contraire un avantage par rapport au gypse. La température élevée atteinte dans les broyeurs à ciment peut en effet provoquer le départ d'une molécule d'eau du gypse. Ceci entraîne la formation de l'hémi-hydrate de sulfate de calcium, c'est-à-dire de plâtre. Le phénomène de "fausse-prise" du béton, qui consiste en un léger durcissement prématuré, est attribué à l'effet de plâtre qui prend en présence de l'eau. L'anhydrite, dépourvue d'eau, est très stable durant le broyage et permet d'éviter ce phénomène.

La quantité de gypse ou d'anhydrite employée dans la confection du ciment est très modeste (5% maximum) : lors de la recherche de matières premières, une importance secondaire est accordée à la prospection de ces minéraux.

2.4.2 - POZZOLANES NATURELLES

Cimentiers et géologues n'ont pas la même définition de la pouzzolane. Le cimentier regroupe sous cette appellation tous les matériaux ayant la propriété de fixer l'hydroxyde de chaux pour donner des composants stables ayant des propriétés hydrauliques. Cette définition comprend donc les cendres volantes et le laitier. Pour le géologue, la ville italienne de Pozzuoli, proche du Vésuve, lieu où ce produit était jadis exploité, évoque un contexte purement volcanique. Nous ne retiendrons ici que la définition géologique.

L'utilisation des pouzzolanes dans la construction remonte à plus de 2700 ans (Etrusques, Grecs de l'Ile de Santorin). Les Romains employèrent les tufs et roches volcaniques du Latium et des environs de Naples. Ils fabriquaient des bétons à l'aide d'un mélange de pouzzolane et de chaux. Certaines constructions romaines subsistent de nos jours (le port de Nérone à Anzio par exemple) et accusent encore des résistances élevées.

D'autres matériaux naturels sont dotés de propriétés pouzzolaniques, comme les terres à diatomées. Celles-ci ont été utilisées au XXème siècle mais leur rareté a conduit à abandonner cette pratique.

Prospection et identification

La propriété pouzzolanique d'une roche est liée à la présence de silice amorphe et métastable qui est très réactive et a la capacité de fixer la chaux libre dans le ciment. A l'échelle des temps géologiques, seuls les édifices volcaniques relativement récents peuvent être considérés comme des ressources potentielles. Des magmas de composition chimique acide ou basique peuvent fournir des ponces ou des cinérites à caractères pouzzolaniques. Le tableau 11 ci-dessous montre quelques compositions chimiques de matériaux à pouvoir pouzzolanique de diverses provenances en Europe.

Eléments	Latium Italie	Santorin (Grèce)	Pierre ponce de l'Eifel (Allemagne)
SiO ₂	48	65	55
Al ₂ O ₃	22	13	22
Fe ₂ O ₃	9	6	3
CaO	7	3	2
MgO	3	2	0,5
Na ₂ O+K ₂ O	5	6,5	11
SO ₃	0,5	0,5	-
Perte au feu	5	4	6

Tabl. 11 - Composition chimique de matières premières à caractère pouzzolanique d'origine volcanique (exprimé en %).

Contrôle

Les essais mentionnés ci-dessous sont à la fois valables pour les pouzzolanes, les cendres volantes et les laitiers de hauts fourneaux.

• *Essai Chapelle*

Cet essai consiste à faire bouillir dans 250 cm³ d'eau distillée, pendant 16 heures, 1 mg de la matière à tester et 1 g de chaux décarbonatée. La silice et l'alumine active et disponible se combinent à la chaux pour former des silicates et aluminates de calcium. La quantité de chaux fixée, qui varie par exemple de 20 à 40 % si la matière à tester est active, fournit des indications sur le potentiel pouzzolanique du matériau. Cet essai a l'avantage d'être rapide et peu onéreux mais s'éloigne des conditions pratiques.

• *Norme Italienne*

Elle consiste à conserver pendant 9 jours à 40 °C un échantillon de 20 g de liant dans 100 cm³ d'eau, puis à doser les quantités de chaux et d'alcalins restant dans le liquide après ce traitement. Les résultats obtenus avec un ciment témoin et avec divers pourcentages de cendre ou de pouzzolane sont reportés sur un graphique. Les liants essayés sont dits pouzzolaniques lorsque leurs points représentatifs sont situés en dessous de la courbe de saturation.

2.4.3 - LAITIERS ET CENDRES VOLANTES

Ces matières, d'origine industrielle, se comportent exactement comme les pouzzolanes naturelles, c'est-à-dire que la silice amorphe réagit avec la chaux libre dans le ciment pour former de nouveaux minéraux hydratés.

Le **laitier** de haut fourneau est un silico-aluminate de chaux qui provient de la fabrication de la fonte élaborée dans les hauts fourneaux des usines sidérurgiques. C'est sans doute le français Louis VICAT qui le premier a remarqué l'analogie existante entre les compositions chimiques des laitiers et des pouzzolanes et entrevu vers 1818 leur utilisation dans l'industrie.

Certaines caractéristiques chimiques du laitier permettent de savoir si celui-ci est ou non utilisable dans la fabrication de ciment :

- l'indice de basicité (rapport CaO/SiO_2) doit être compris entre 1,30 et 1,50 ;
- le rapport ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$) doit être compris entre 0,45 et 0,50 ;
- la mesure de l'indice de F. KEIL (FK):

$$\text{FK} = \frac{\text{CaO} + \text{CaSO}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \frac{1}{2}\text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{MnO}}$$

qualifie le laitier.

Si :

- | | |
|------------------|---|
| $FK = < 1,5$ | le laitier est considéré comme médiocre ; |
| $1,5 < FK < 1,9$ | le laitier est considéré comme acceptable ; |
| $FK > 1,9$ | le laitier est considéré comme excellent. |

Il faut en outre s'assurer que MnO soit inférieur à 2,5 %.

Suivant les normes françaises, on peut ajouter dans les ciments Portland composés (CPJ) jusqu'à 35 % de laitier ; mais il existe une gamme de ciment de laitier au clinker (CLK) qui contient 80 % de laitier et une gamme de ciment de haut fourneau (CHF) avec 40 à 75 % de laitier, le reste étant du clinker.

Les **cendres volantes**, produites par les centrales thermiques à charbon, se présentent habituellement sous forme d'une poudre gris-noirâtre, plus sombre que le ciment mais d'une finesse analogue.

Les gammes d'utilisation dans le ciment sont plus limitées que celles du laitier : en effet, les normes françaises ne tolèrent pas un pourcentage supérieur à 35 % dans le ciment (CPJ, ciments Portland composés).

Les avantages des cendres volantes sont :

- une réduction du prix du liant ;
- une résistance mécanique finale supérieure ;
- une plasticité améliorée ;
- une diminution du retrait et de la chaleur d'hydratation initiale ;
- une résistance accrue aux eaux pures ou sulfatées.

Leurs inconvénients sont :

- un affaiblissement des résistances initiales (2 à 7 jours) ;
- une vitesse de durcissement abaissée par le froid.

3 - NORMES

3.1 - NORMES FRANÇAISES

3.1.1 - GÉNÉRALITÉS

Sous le terme général de "ciments Portland" sont englobées les deux catégories de ciments suivantes :

- le ciment Portland artificiel (C.P.A.) ;
- le ciment Portland composé (C.P.J.).

Le **ciment Portland artificiel (C.P.A.)** contient au moins 97 % de clinker, le reste étant représenté par l'un ou plusieurs des constituants énumérés au paragraphe 2.4.

Ciment Portland composé :

On peut signaler l'existence de ciments suivants qui ne contiennent qu'une proportion mineure de clinker Portland :

- **Ciment de haut-fourneau (C.H.F.)** : ce ciment contient entre 40 et 75 % de laitier, le reste des constituants étant du clinker, avec éventuellement un produit de charge dans la limite de 3 % de l'ensemble des constituants.
- **Ciment de laitier au clinker (C.L.K.)** : ce ciment contient au moins 80 % de laitier, le reste des constituants étant du clinker, avec éventuellement un filler* dans la limite de 3 % de l'ensemble des constituants.
- **Ciment au laitier et aux cendres (C.L.C.)** : ce ciment contient 25 à 60 % de clinker, 20 à 54 % de cendres volantes et 20 à 45 % de laitier, avec éventuellement un filler* dans la limite de 3 % de l'ensemble des constituants.

3.1.2 - CLASSES DE RÉSISTANCES

Institution de classes et de sous-classes de résistance

Les ciments des catégories définies au chapitre 3-1 sont répartis en quatre classes, suivant leur résistance à la compression, mesurée à 28 jours d'âge (tabl. 12).

Des sous-classes sont prévues, dans certaines classes, selon la résistance à la compression à 2 jours. Ces résistances sont exprimées en mégapascals (1 MPa = 10 daN/cm²).

Les résistances sont mesurées conformément à la norme NF P 15-451.

* Filler : charge inerte.

Désignation de la classe	Sous- classe éventuelle	Résistances à la compression		
		à 2 jours	à 28 jours	
		limite inférieure nominale	limite inférieure nominale	limite supérieure nominale
35	—	—	25,0	45,0
45	— R (Rapide)	— 15,0	35,0 35,0	55,0 55,0
55	— R (Rapide)	— 22,5	45,0 45,0	65,0 65,0
H.P. (Hautes performances)	R (Rapide)	27,0	55,0 55,0	— —

Tabl. 12 - Classes de résistances des ciments (Source: Annuaire SNFCC 1988)

3.1.3 - LIMITES DES CLASSES ET SOUS-CLASSES

Les limites de ces classes et sous-classes sont indiquées dans le tableau 12.

La conformité du ciment produit aux classes et éventuellement aux sous-classes du tableau 12, est contrôlée régulièrement par des essais effectués par le fabricant.

Les résistances à la compression font l'objet d'un contrôle statistique faisant apparaître que, dans l'hypothèse d'une distribution gaussienne, les limites du tableau sont respectées avec les probabilités suivantes :

- 90 % pour les valeurs minimales à 2 jours ;
- 99 % pour les valeurs minimales à 28 jours ;
- 90 % pour les valeurs maximales à 28 jours.

3.1.4 - ENONCÉ DES GARANTIES

En premier lieu, le fabricant garantit que son ciment est contrôlé régulièrement et que les résultats des essais de contrôle satisfont statistiquement aux spécifications. De plus, le fabricant garantit dans les valeurs fixées les caractéristiques suivantes :

- les résistances minimales à la compression ;
- la vitesse de prise ;

- le retrait de certains ciments Portland ;
- l'expansion ;
- la teneur en SO_3 ;
- la teneur en magnésie du ciment Portland C.P.A. ;
- la teneur en chlore des ciments Portland.

3.1.5 - VALEURS GARANTIES

Les valeurs minimales garanties relatives aux résistances à la compression sont indiquées dans le tableau 13.

Vitesse de prise : les ciments doivent satisfaire, en ce qui concerne le début de prise mesurée sur pâte pure conformément à la norme NF P 15-431, aux spécifications ci-après :

- les ciments de classes 35 et 45 ont, à 20°C, un temps de début de prise supérieur à 1 h 30 mn ;
- les ciments des classes 55 et T.H.R. ont, à 20°C, un temps de début de prise supérieur à 1 h.

Classes	2 jours	7 jours	28 jours
35	—	10,0	25,0
45	—	17,5	35,0
45 R	12,0	—	35,0
55	10,0	—	45,0
55 R	17,0	—	45,0
HP	15,0	—	55,0
H.P.R.	22,0	—	55,0

Tabl. 13 - Valeurs minimales garanties relatives aux résistances à la compression d'un béton standard à ciment artificiel Portland (Source : Annuaire SNFCC 1988).

Retrait : les ciments Portland des classes et sous classes indiquées ci-après doivent avoir, à 28 jours d'âge, des retraits mesurés conformément à la norme NF P 15-433, inférieurs aux valeurs ci-dessous exprimées en micromètres par mètre :

- classes 35 à 45 (non rapide) : 800,
- classe 46 Rapide et classe 55 : 1000.

Expansion : l'expansion mesurée à chaud et à froid, sur éprouvette de pâte pure, conformément à la norme NF P 15-432, doit être, pour tous les ciments, inférieure à 10 mm.

Teneur en SO_3 : la proportion de SO_3 dans le ciment doit être inférieure à 5 % pour le C.L.K. et à 4 % pour les autres ciments. Toutefois, certains ciments peuvent contenir des proportions de SO_3 supérieures, à condition que des mesures de gonflement à 28 jours sur éprouvettes immergées dans l'eau douce à $5^\circ C \pm 1^\circ C$, effectuées conformément à la norme NF P 15-433, donnent des résultats inférieurs à 250 μm .

Teneur en magnésie : la teneur en magnésie (MgO) du ciment C.P.A. ne doit pas dépasser 5 % de la masse de celui-ci.

Teneur en chlore : la teneur en chlore des ciments Portland doit être inférieure à 0,05 % (cinq dix millièmes).

3.1.6 - AUTRES CEMENTS

Les ciments autres que ceux définis au paragraphe 3.1.1 sont rappelés pour mémoire ci-dessous. Pour ceux qui font l'objet de normes, les références sont indiquées. Les spécifications imposées par ces normes restent actuellement en vigueur mais sont susceptibles d'être révisées dans l'optique d'une standardisation européenne.

Ciment de laitier à la chaux (C.L.X) NF P 15-306 : ce ciment est un mélange de deux constituants : (100-N) parties de chaux hydraulique et (N) parties de laitier granulé de haut-fourneau, N étant ≥ 70 (avec éventuellement des charges ou des cendres volantes dans la limite de 3 % du produit).

Ciment à maçonner (C.M.) NF P 15-307 : ce ciment contient en proportions moindres les mêmes éléments actifs que le ciment Portland artificiel ; ses propriétés et son comportement dans les milieux courants sont analogues à ceux de ce ciment, mais sa résistance est moins élevée que celle de ce produit.

Ciment naturel (C.N.) NF P 15-308 : ce ciment résulte de la mouture de roches clinkérisées, obtenues par la cuisson de calcaires marneux de composition très régulière et voisine de celle des mélanges d'argile et de calcaire servant à la fabrication du ciment Portland artificiel.

Chaux hydraulique naturelle (X.H.N.) NF P 15-310 : ce liant hydraulique résulte de la cuisson de calcaires naturels plus ou moins argileux suivie d'une réduction en poudre par extinction accompagnée ou non de mouture, avec possibilité, au cours de cette dernière, d'ajouts de grappiers ou autres constituants (clinker, laitier, pouzzolane) ou addition de fillers généralement calcaires.

Chaux hydraulique artificielle (X.H.A.) NF P 15-312 : ce liant hydraulique est à base de clinker ou de ciment Portland artificiel additionné de charges généralement calcaires, et dont les autres éléments sont choisis et traités de façon à leur conférer une grande plasticité, une faible fissurabilité et des résistances mécaniques de valeur moyenne.

Ce produit peut recevoir l'addition d'un adjuvant entraîneur d'air, agréé par le Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie et mentionné sur les sacs ou étiquettes.

Ciment pouzzolanique : ce ciment, qui satisfait à l'essai de pouzzolanicité (voir norme NF P 15-462), résulte du mélange de deux constituants moulus ensemble ou séparément : (100-N) parties de clinker Portland et N parties de pouzzolane ou de cendres volantes de houille, N étant compris entre 30 et 40.

Ciment au laitier et à la pouzzolane : ce ciment résulte du mélange de deux constituants moulus ensemble ou séparément : (100-N) partie de clinker Portland et N parties de laitier granulé de pouzzolane, N étant supérieur à 35.

Ciment alumineux fondu : ce ciment résulte de la mouture, après cuisson jusqu'à fusion, d'un mélange composé principalement d'alumine, de chaux, d'oxydes de fer et de silice, sous forme de bauxite et de calcaire, dans des proportions telles que le ciment obtenu renferme au moins 30 % de sa masse d'alumine et, au plus, un pour mille de soufre et quatre pour mille d'oxyde de potassium et d'oxyde de sodium réunis ($K_2O + Na_2O$).

Ciment prompt : ce ciment à prise rapide (début de prise inférieur à 8 minutes) ou demi-lente (début de prise compris entre 8 et 30 minutes) à 20°C résulte de la mouture de produits de composition régulière obtenue par cuisson à température modérée de roches naturelles ou reconstituées artificiellement.

3.2 - NORMES INTERNATIONALES

Normes européennes

En prélude à l'ouverture du grand marché européen de 1993, les différents organismes nationaux (pour la France ATILH - Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques) procèdent actuellement au choix de standards européens. L' "European Cement Association" a publié les grandes lignes de cette nouvelle normalisation. Deux catégories majeures sont reconnues :

- les ciments principaux (tabl. 14) ;
- les ciments spéciaux (tabl. 15).

Abréviation	Type	Composition
P	Portland	≥95% clinker
PCo	Composite Portland	≥65% clinker
PSI	Portland slag	≥65% clinker, ≤35% slag
	Iron Portland	70% clinker, 30% slag
*1 BLF	Blast furnace slag	≤65% clinker, ≥35% slag
*2 PF1	Portland fly-ash	≥65% clinker, ≤35% fly-ash (Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , SiO ₂).
PPo(POZ)	Portland pozzolan	≥65% clinker, ≤35% natural pozzolans eg diatomite, cherts, tuff clays, shales

Tabl. 14 - Principaux types de ciments, selon l'European Cement Association.

Abréviation	Type	Abréviation	Type
*3 W	White	Poli	Pozzolan with lime
SR	Sulphate resisting	AR	Alkali resisting
LH	Low Heat	E	Expansive
SS	Super sulphated	*5 R	Road and runway
*4 OW	Oil well	As	Asbestos
AL	Aluminous	C	Coloured
M	Masonry	*6 SILi	Slag with lime

Tabl. 15 - Liste de quelques ciments spéciaux, selon l'European Cement Association.

- *1 - Ciment au laitier
- *2 - Ciment aux cendres volantes
- *3 - Ciment blanc
- *4 - Ciment pour forage pétrolier
- *5 - Ciment pour routes
- *6 - Laitier avec chaux.

Normes américaines

Les normes américaines, définies par l'ASTM *, classent le ciment en cinq grandes catégories. De nombreux pays du Moyen Orient et de l'Extrême Orient ont établi leurs normes sur la base des normes ASTM (Arabie Saoudite, Philippines par exemple).

Les 5 types de ciments sont les suivants :

Type I : ciment pour utilisations généralisées et courantes (essentiellement pour la construction).

Type II : ciment pour la construction ayant une résistance modérée aux sulfates et une chaleur d'hydratation faible.

Type III : ciments à durcissement rapide.

Type IV : ciments à faible chaleur d'hydratation.

Type V : ciments avec une résistance élevée aux conditions sulfatées.

Normes anglaises

On peut trouver également des normes inspirées des normes britanniques dans les anciennes colonies de ce pays (Inde, Pakistan, Nigéria, Australie). Ce sont des normes qui répondent aux spécifications du British Standards (B.S.). Le tableau 16 permet de comparer les spécifications des ciments Portland artificiels en Grande-Bretagne, aux Etats-Unis et en France.

Pays, norme	GB (BS)				USA (ASTM)					F (AFNOR)					
	OPC	RHPC	LHPC	SRPC	I	II	III	IV	V	CPA35	45	45R	55	55R	THR
produit															
indice chimique															
de saturation															
en chaux	+	+	+	+											
SiO ₂ min.						21,0									
Al ₂ O ₃ max.						6,0									
Fe ₂ O ₃ max.						6,0									
MgO max.	4	4	4	4	6	6	6	6	6	5	5	5	5	5	5
SO ₃ max.	3	3,5	3	2,5	3,5	3	4,5	2,3	2,3	4	4	4	4	4	4
Cl max 1/10 000										5	5	5	5	5	5
insoluble max.	1,5	1,5	1,5	1,5	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75						
p. feu max.	3	3	3	3	3	3	3	2,5	3						
C ₂ S max.								40							
C ₃ S max.								35							
C ₃ A max.						8	15	7	5						
C ₄ AF+2 C ₃ A max.									20						
additions ou fillers	pas	pas	pas	pas	pas	pas	pas	pas	pas	3	3	3	3	3	3

Tabl. 16 - Ciments Portland artificiels :

Spécifications comparées et caractéristiques chimiques des normes britanniques, américaines et françaises.

* American Society for Testing Materials.

La signification des sigles et abréviations utilisés par la Grande- Bretagne est la suivante :

OPC - BS = ciment Portland ordinaire ;
RHPC - BS = ciment Portland à durcissement rapide ;
LHP - BS = ciment Portland à faible chaleur d'hydratation ;
SRPC - BS = ciment Portland résistant aux sulfates.

Les *documents de base* sont les *normes suivantes* :

G.B. = BS.12.1978
BS.1370.1974 part 2.
BS.4027.1972 part 2.

U.S.A. = ASTM.C.150.78.a.

France = NF P 15-301.

4 - CHIMIE DU CIMENT

L'ouvrage de R.H. BOGUE (1952) constitue toujours un document de référence indispensable pour la compréhension de ce sujet vaste et complexe, auquel il convient de se référer pour plus de détails. Les paragraphes ci-dessous ont pour objectif d'en présenter les grandes lignes.

4.1 - EQUATIONS DE BASE

Le cimentier dispose d'une série d'équations permettant d'évaluer et d'ajuster son mélange lorsqu'il s'agit de la matière première ou du mélange cru. A partir d'une analyse chimique classique on peut calculer différents paramètres :

$$\text{- Module hydraulique} = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

$$\text{- Module silicique} = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

On peut admettre des valeurs de 1,2 à 4,0.

$$\text{- Module alumino-ferrique} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3}$$

On peut admettre des valeurs > 10 dans un ciment blanc.

On peut y associer le degré de saturation en chaux d'après la formule de KUHL :

$$\text{KUHL} = \frac{\text{CaO}}{(2,8 \times \text{SiO}_2) + (1,1 \times \text{Al}_2\text{O}_3) + (0,7 \times \text{Fe}_2\text{O}_3)}$$

Un mélange cru destiné à la fabrication d'un ciment Portland doit impérativement présenter un "KUHL" entre 0,94 et 0,98 et se conformer aux limites fixées pour les modules silicique et alumino-ferrique.

On peut ensuite procéder au calcul de la "composition potentielle" du clinker. Le clinker est une substance composée d'une série complexe de minéraux artificiels comprenant souvent des solutions solides. L'expérience empirique acquise par les spécialistes a permis de simplifier les formulations; on définit ainsi quatre minéraux imaginaires qui se créent successivement et qui en déterminent les performances techniques :

- Silicate tricalcique 3CaO SiO_2 (abrégié : C_3S) : ce minéral contribue à la résistance initiale du ciment ;

- Silicate bicalcique 2CaO SiO_2 (abrégé : C_2S) : ce minéral contribue à la résistance à long terme ;
- Alumate tricalcique $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$ (abrégé : C_3A) : ce minéral donne des résistances à très court terme mais dégage une forte chaleur d'hydratation et a une mauvaise tenue aux eaux agressives ;
- Alumino-ferrite tétracalcique $4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$ (abrégé : C_4AF) : contribue à la résistance du ciment aux eaux agressives.

Les normes de certains pays, notamment les normes ASTM (Etats-Unis, cf. § 3.2) sont basées sur les calculs théoriques de la composition potentielle. Il est donc possible à partir des analyses chimiques réalisées sur un site de savoir s'il est théoriquement possible de fabriquer du ciment à partir des roches échantillonnées, ainsi que d'évaluer les classes des ciments obtenus. L'ajout de certains correcteurs (cf. § 2.3) peut aussi être envisagé.

4.2 - EXEMPLE DE CALCUL D'UN MÉLANGE CRU (à deux composants)

Dans cet exemple de calcul, on dispose de ressources en calcaire (x) et en argiles (y) ; les analyses chimiques sont les suivantes :

	Ressources x Calcaire	Ressources y Argile
SiO_2	4,40	49,85
Al_2O_3	0,90	15,78
Fe_2O_3	0,39	10,05
CaO	51,24	3,39
MgO	1,83	2,49
Na_2O	0,30	0,63
SO_3	0,01	1,00
CI	0,01	0,05
Pertes au feu (PAF)	41,84	17,04
Total	100,92	100,28
KUHL = degré de saturation	3,77	0,04
Module silicique	3,41	1,92
Module Alumino ferrique	2,30	1,57

Avec deux composants, on peut fixer le KUHL à 0,96 :

$$0,96 = \frac{(51,24x + 3,39y)}{[2,8(4,40x + 49,85y)] + [1,1(0,9x + 15,78y)] + [0,7(0,39x + 10,05y)]}$$

On sait que $x + y = 100 \%$

On résout les deux équations à deux inconnues : x = la proportion du calcaire ;
 y = la proportion d'argile.

$$154,024 y = 38,20028 x$$

Proportion d'argile $y = 19,87 \%$

Proportion de calcaire $x = 80,13 \%$

La composition du mélange cru et du clinker sera :

	Mélange cru	Clinker
SiO ₂	13,58	21,52
Al ₂ O ₃	3,85	6,10
Fe ₂ O ₃	2,31	3,66
CaO	41,73	66,15
MgO	1,96	3,10
Na ₂ O	0,36	0,57
SO ₃	0,20	0,31
Cl	0,0179	0,03
PAF	36,91	

La composition théorique du clinker est calculée de la façon suivante :

$$C_3S = (4,071 \times \%CaO) - (7,600 \times \%SiO_2) - (6,718 \times \%Al_2O_3) - (1,430 \times \%Fe_2O_3) - (2,852 \times \%SO_3)$$

$$C_2S = (2,867 \times \%SiO_2) - (0,7544 \times C_3S)$$

$$C_3A = (2,650 \times \%Al_2O_3) - (1,692 \times \%Fe_2O_3)$$

$$C_4AF = 3,043 \times \%Fe_2O_3.$$

Dans ce cas, à partir de la composition chimique du clinker on calcule :

$$C_3S = 58,64$$

$$C_2S = 17,45$$

$$C_3A = 9,97$$

$$C_4AF = 11,14.$$

Selon les critères exposés en 3.2, la composition théorique du clinker conviendrait pour des ciments ASTM de types I à III mais contient trop de C_3A pour les types IV et V. Dans ce cas, l'ajout de minerai de fer permettrait de diminuer la proportion de C_3A .

5 - TRAITEMENT

5.1 - RAPPELS HISTORIQUES

La cimenterie moderne comprend une série d'installations qui n'ont que peu évolué depuis le début du siècle. L'innovation la plus importante depuis la découverte du ciment PORTLAND artificiel est probablement l'utilisation du four rotatif, qui permet une alimentation en continu du mélange cru. Auparavant, le four vertical était utilisé ; ce type de four est encore mis en oeuvre pour la fabrication de chaux, ainsi que dans de rares cas pour le ciment (Inde, Chine...). L'alimentation en continu d'un four vertical pose de nombreux problèmes techniques.

Une autre innovation, plus récente, est l'adoption par l'industrie cimentière de la voie sèche au détriment de la voie humide : dans cette dernière, le broyage des matières premières était effectué avec de l'eau puis elles étaient stockées sous forme de pâte dans de vastes bacs. Le contrôle de la composition de ce mélange était relativement facile ; après l'ajout d'un correcteur, un bon niveau d'homogénéisation était rapidement obtenu. Mais l'énergie consommée pour l'évaporation de l'eau pénalise cette méthode.

Pendant les années 50 deux sociétés allemandes, Polysius et Klöckner Humbolt Deutz développèrent des systèmes moins gourmands en énergie.

La première innovation fut le Lepôld Grille, un système semi-humide où la pâte de cru était comprimée sous forme de boulettes. Ceci permettait le broyage et l'homogénéisation en voie humide mais diminuait la teneur en eau du mélange cru qui entraînait dans le four.

L'évolution vers un circuit de fabrication sans eau (voie sèche) posait, sur le plan technologique, le problème de l'homogénéisation du mélange cru broyé et en particulier des corrections de composition. Les solutions mises en oeuvre sont les suivantes :

- nombreux contrôles chimiques depuis la carrière jusqu'au broyage,
- séjour final dans le silo d'homogénéisation où de l'air comprimé brasse constamment la poudre.

5-2 - PROCESSUS DE TRAITEMENT DANS LA CIMENTERIE MODERNE

Les différents stades de traitement sont illustrés par la figure hors texte.

5.2.1 - ABATTAGE DES MATIÈRES PREMIÈRES

Les phases d'abattage, d'extraction et de transport depuis la carrière jusqu'au concassage primaire (étape 1 de la figure hors texte) ne figurent pas dans le schéma. Ces processus sont généralement effectués de façon classique. L'abattage se fait par tir de mines ou, dans le cas des argiles ou du calcaire tendre, par ripage. La roche est chargée dans des camions-bennes dont certains modèles peuvent transporter jusqu'à 70 tonnes. Un marteau pneumatique permet de réduire la taille des blocs de calcaire avant l'envoi au concasseur primaire.

5.2.2 - TRAITEMENT DU MÉLANGE CRU

Le stade de concassage constitue la première étape dans l'élaboration du mélange cru. Afin de parvenir à une première homogénéisation, le calcaire et l'argile passent alternativement dans le concasseur primaire, généralement par godets entiers de dumpers (étape 1).

Ce mélange est échantillonné et analysé en continu afin, éventuellement, d'ajuster l'alimentation (étape 2).

Dans la halle de pré-mélange (étape 3) ou de pré-homogénéisation, les matières premières sont réparties sur un tas par saupoudrage, à l'aide d'un bras en déplacement permanent. L'échantillonnage préalable permet de corriger l'alimentation du concasseur primaire en l'un ou l'autre des constituants afin d'ajuster en cas de besoin la composition générale du tas. La reprise du tas par la tranche assure un premier mélange convenable.

Un mélange complémentaire est effectué au niveau de la station de dosage (étape 4). Souvent, un stock de correcteurs tel que du minerai de fer, de la bauxite, du calcaire pur ou de la silice offre la possibilité de corriger la composition.

L'énergie générée par le broyage du mélange au cours de l'étape suivante (étape 5) est souvent suffisante pour son séchage. Dans certaines cimenteries alimentées par des matières plus humides, les gaz chauds du circuit de cuisson sont récupérés et canalisés vers le broyeur pour accélérer le séchage. Le broyage réduit les matières à une granulométrie de moins de 80 μm (95 % < 80 μm).

Par des moyens pneumatiques, le mélange cru broyé est expédié dans le silo de stockage puis dans la colonne de cyclones où la cuisson commence.

5.2.3 - CUISSON

Les cyclones sont disposés verticalement, de façon à ce que le mélange cru descende vers le four rotatif à contre courant des gaz chauds, assurant ainsi un échange de chaleur efficace. A l'entrée du four rotatif (étape 7), la température du mélange cru est déjà de 900°C. Il commence à s'agglomérer au niveau de la zone de température maximale (1450°C) qui se situe à proximité de la flamme du brûleur, en tête du four.

Le clinker ainsi formé tombe sur une grille (étape 8) à travers laquelle passe l'air qui va alimenter le four. La température du clinker est donc ramenée de plus de 1000°C à 80°C, permettant ainsi son transport par bandes jusqu'à la halle de stockage (étape 9).

5.2.4 - TRAITEMENT DU CLINKER

Après le stockage du clinker, deux possibilités se présentent :

- broyage sur place (voir schéma, étapes 10, 11, 12), puis transport du ciment jusqu'au lieu de consommation. C'est pratiquement le cas général en France ;
- transport du clinker : c'est la solution adoptée par les cimenteries axées vers l'exportation (comme par exemple de nombreuses cimenteries en Grèce et en Espagne). Le broyage et l'ensachage du ciment sont effectués dans le pays destinataire. Le clinker est inerte, ce qui permet son transport sans précautions particulières.

Lors du broyage du clinker, on dispose de la possibilité d'ajouter différents additifs permettant la confection de différentes classes de ciment. Pour la fabrication de ciment Portland, on ajoute systématiquement 2 à 3% de gypse qui se comporte comme un retardateur de prise. Ceci permet un meilleur contrôle de la prise du béton, la chaleur d'hydratation se dégageant plus lentement. L'ajout de pouzzolanes, de laitiers de hauts fourneaux ou de cendres volantes (cf. § 2.4) est également réalisé à ce stade.

Le broyage, nécessaire pour la fabrication d'un ciment, est assez poussé. On contrôle généralement la qualité du broyage par la mesure de la surface spécifique selon la méthode Blaine. Par exemple, la répartition granulométrique d'un ciment dont la surface spécifique d'un ciment dépasse 3000 cm²/g est approximativement : 80% <50 µ et 50 %<15 µ.

Le transport du ciment s'effectue :

- en vrac par camions ou par wagons de chemin de fer spécialement aménagés ;
- pour la grande distribution, le ciment est ensaché en sacs de 50 kg, plus rarement de 25 kg, chargés sur palettes.

Il va de soi que le ciment, composé de minéraux fortement hydrophiles, doit être protégé de l'humidité.

6 - BIBLIOGRAPHIE ET RÉFÉRENCES

DOCUMENTS FRANÇAIS DE RÉFÉRENCE GÉNÉRAUX

BOGUE R.H. (1952) - La chimie du ciment Portland, Editions Eyrolles : ouvrage traduit de l'anglais par le Centre d'études et de Recherches des liants Hydrauliques, 586 p.

LABAHN O. (1964) - Mémento de l'Ingénieur en cimenterie. Editions Eyrolles, 189 p.

MAUBERT F. (1987) - Mémento Roches et Minéraux Industriels : le gypse et l'anhydrite. Rap. BRGM 87 SGN 587 GEO, 31 p.

PAPADAKIS M. et VENUAT M. (1966) - Fabrication et utilisation des liants hydrauliques. Editions Eyrolles, 239 p.

* * * * *

REVUES ET PUBLICATIONS FRANÇAISES SUR LE CIMENT

CIMENTS et CHAUX - Revue mensuelle éditée par le Syndicat National des fabricants de ciments et de chaux : 41 avenue de Friedland, 75008 PARIS.

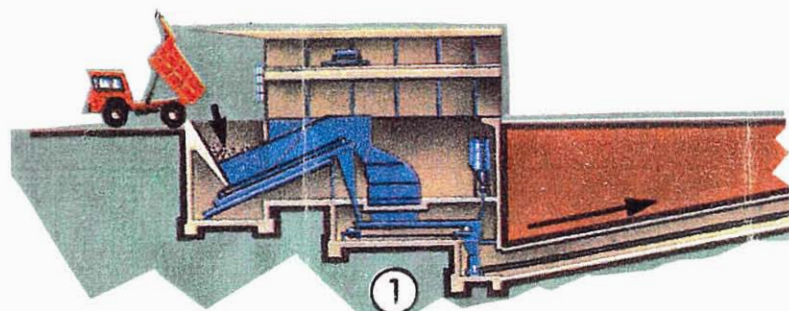
ANNUAIRE 1990 du Syndicat national des fabricants de ciment et chaux.

* * * * *

ORGANISMES PROFESSIONNELS

ASSOCIATION TECHNIQUE DE L'INDUSTRIE DES LIANTS HYDRAULIQUES (A.T.I.L.H.), 8 rue Villot, 75012 Paris.

CEMBUREAU (Association Européenne du Ciment), 55 rue d'Arlon, 1014 BRUXELLES.



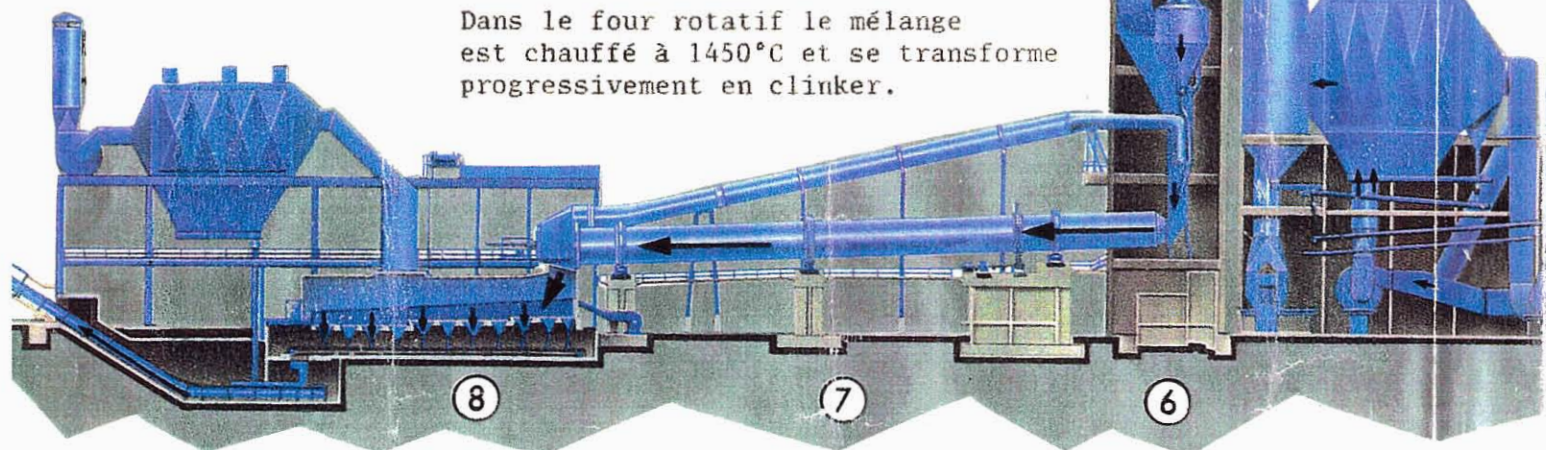
1 CONCASSAGE

Les matières premières (calcaire et argile) en provenance des carrières sont concassées.

KRUPP POLYSIUS

7 CUISSON

Dans le four rotatif le mélange est chauffé à 1450°C et se transforme progressivement en clinker.

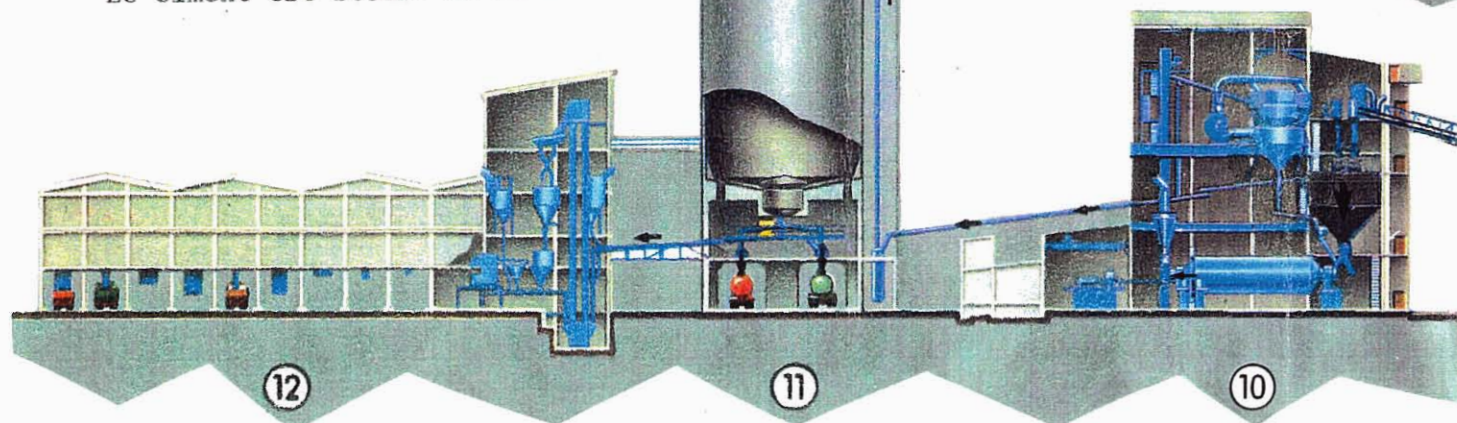


8 REFROIDISSEMENT

Dans un courant d'air froid le clinker est ramené à une température autorisant son transport sur bande. La chaleur récupérée est renvoyée dans le four.

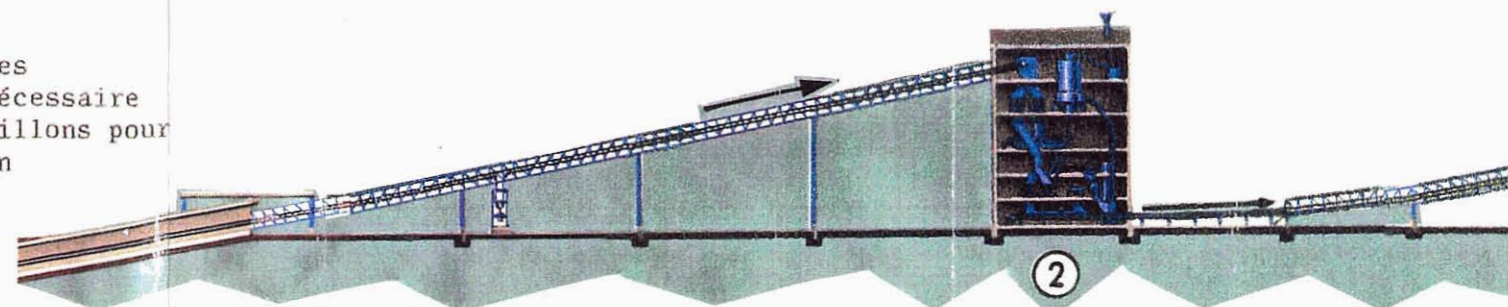
11 STOCKAGE DE CIMENT

Le ciment est stocké en silo.



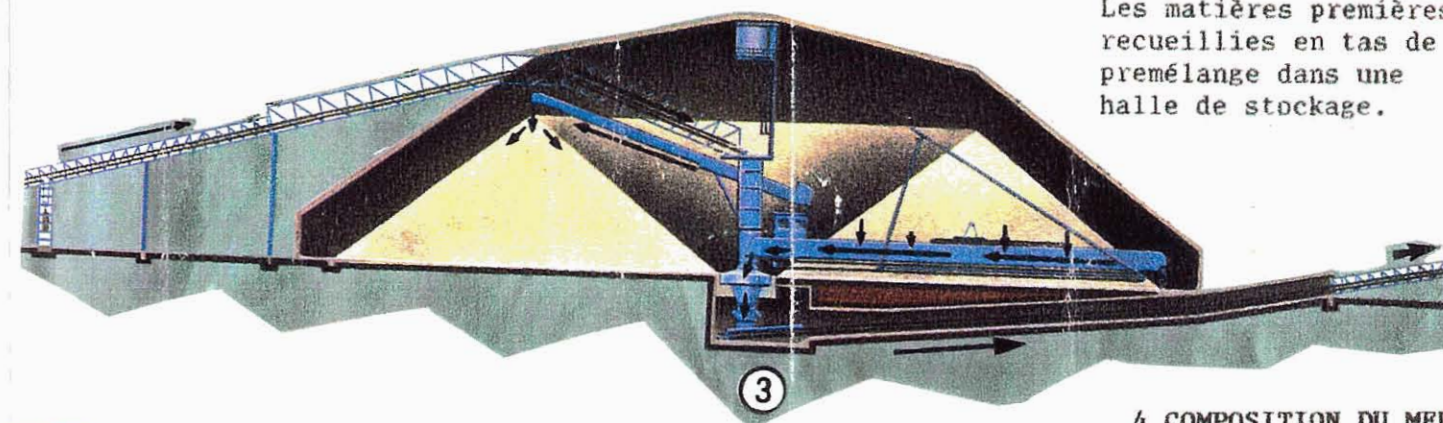
2 ECHANTILLONNAGE

Durant toutes les étapes de production il est nécessaire de prélever des échantillons pour analyses de contrôle en laboratoire



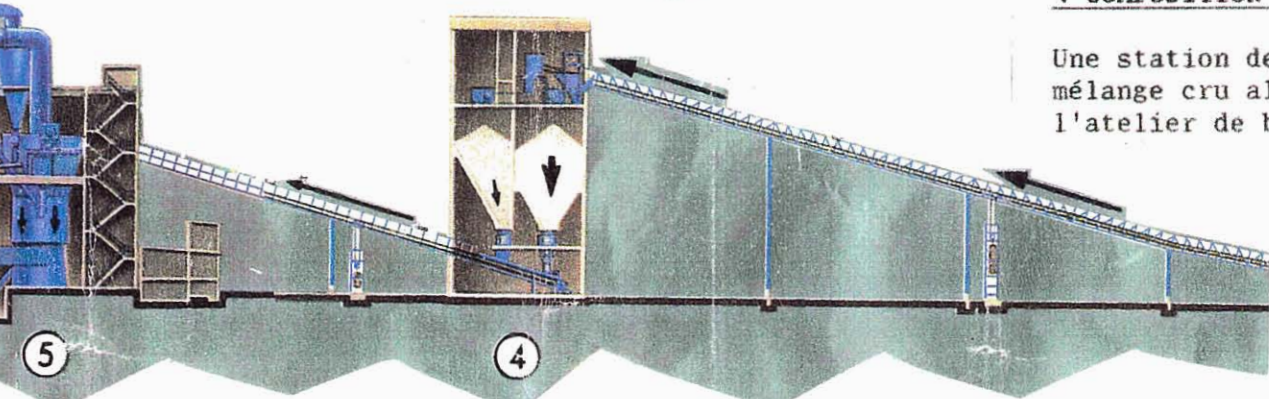
3 STOCKAGE ET PREMELANGE

Les matières premières sont recueillies en tas de premélange dans une halle de stockage.



4 COMPOSITION DU MELANGE

Une station de dosage du mélange cru alimente l'atelier de broyage

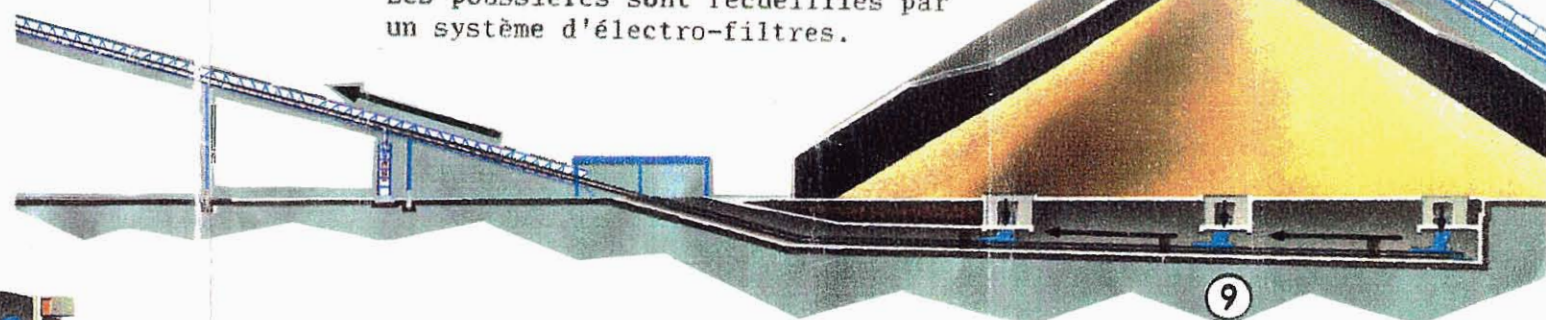


6 PRECHAUFFAGE ET CALCINATION

Le mélange broyé est préchauffé et calciné au fur et à mesure qu'il descend la colonne de cyclones.

5 BROyage

Le mélange cru est broyé et séché simultanément, puis expédié au silo d'homogénéisation. Les poussières sont recueillies par un système d'électro-filtres.



10 BROEUR A CIMENT

Le clinker et les additifs (gypse, pouzzolanes, cendres volantes etc.) sont broyés simultanément afin d'obtenir un ciment de la classe désirée.

12 ENSACHAGE ET CHARGEMENT

Le ciment est, soit chargé en vrac par voie pneumatique dans des camions spéciaux, soit ensaché automatiquement.

9 STOCKAGE DE CLINKER

Figure hors texte - Schéma des processus de traitement dans une cimenterie moderne.