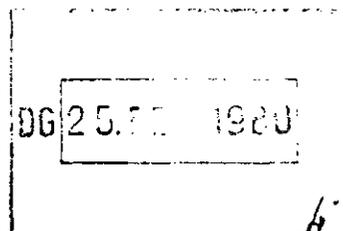


BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cédex - Tél. : (38) 63.80.01



MÉMENTO SUBSTANCES UTILES

(MATÉRIAUX DE CARRIÈRE)

CLINKER PORTLAND

(matières premières utilisées pour la fabrication du...)

par

A. PRAX



Département matériaux

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cédex - Tél. : (38) 63.80.01

79 SGN 148 MTX

1^{re} édition : décembre 1979

SOMMAIRE

Introduction et rappels généraux sur les liants hydrauliques et les ciments.....	p. 3
1 - <u>Economie et marché</u>	p. 7
1.1. France.....	p. 9
1.2. Etranger.....	p. 12
2 - <u>Géologie</u>	p. 15
3 - <u>Secteurs d'utilisation</u>	p. 18
3.1. Utilisateurs primaires.....	p. 18
3.2. Utilisateurs finaux (ouvrages).....	p. 18
4 - <u>Spécifications et critères de sélection</u>	p. 22
4.1. Spécifications.....	p. 22
4.1.1. Ciments Portland artificiels.....	p. 22
4.1.2. Clinkers.....	p. 24
4.2. Critères de sélection.....	p. 26
4.2.1. Critères liés aux caractéristiques des matériaux bruts.....	p. 26
4.2.2. Critères liés aux conditions de gisement.....	p. 28
5 - <u>Modalités de préparation et de traitement</u>	p. 29
6 - <u>Produits de substitution</u>	p. 30

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

- Annexe I : "données 1977 détaillées sur le marché mondial du ciment".....	p. 33
- Annexe II : "comparaison détaillée des caractéristiques chimiques imposées par les normes britanniques, américaines et françaises".....	p. 38
- Annexe III : "méthode de calcul simplifiée de la composition potentielle" (minéralogique) d'un clinker" - d'après ASTM - C 150.....	p. 39
- Annexe IV : "poids atomiques des principaux éléments".....	p. 40

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

<u>Tableau N° 1</u>	: "évolution de la consommation mondiale de ciment - période 1913 - 1977"	p. 8
<u>Tableau N° 2</u>	: "évolution du marché français - période 1960 - 1978"	p. 10
<u>Tableau N° 3</u>	: "liste des sociétés cimentières françaises - 1979"	p. 11
<u>Tableau N° 4</u>	: "ventilation du marché par utilisateur primaire - France"	p. 17
<u>Tableau N° 5</u>	: "ventilation du marché par utilisateur final (ouvrage) - France"	p. 19
<u>Tableau N° 6</u>	: "consommation moyenne de ciment par logement - France 1978" ..	p. 21
<u>Tableau N° 7</u>	: "ciments Portland artificiels - Spécifications des principaux pays producteurs mondiaux"	p. 23
<u>Tableau N° 8</u>	: "composition chimique des ciments Portland artificiels"	p. 24
<u>Tableau N° 9</u>	: "composition potentielle des clinkers Portland"	p. 26
<u>Tableau N° 10</u>	: "relations crus/clinkers"	p. 27
<u>Figure N° 1</u>	: France - "Evaluation de la consommation d'énergie de cuisson à la tonne produite"	p. 13
<u>Figure N° 2</u>	: "les différentes phases de préparation du ciment Portland artificiel"	p. 30

INTRODUCTION ET RAPPELS GENERAUX SUR LES LIANTS HYDRAULIQUES ET LES CEMENTS

Aux termes de la norme NFP 15.301 de décembre 1978, un liant hydraulique est une poudre minérale qui forme avec l'eau une pâte faisant prise, et durcissant progressivement, même à l'abri de l'air, et notamment sous l'eau.

Les ciments sont des liants hydrauliques*, formés de constituants anhydres, cristallisés ou vitreux, renfermant essentiellement : de la silice (SiO_2), de l'alumine (Al_2O_3) et de la chaux (CaO), et dont le durcissement est principalement dû à la formation, par combinaison de ces constituants anhydres avec de l'eau, de silicates et d'aluminates de calcium hydratés, très peu solubles dans l'eau.

Le ciment est un mélange intime, réalisé soit avant, soit après broyage**, d'un ou plusieurs constituants, avec éventuellement, et en petite quantité, un ou plusieurs produits d'addition.

- Les constituants des ciments sont :

1) soit des produits spécialement fabriqués à cet effet (clinkers, pouzzolanes artificielles),

2) soit des sous-produits d'autres industries qui subissent, en vue de leur incorporation dans les ciments, une sélection et une préparation plus ou moins élaborée (laitier, cendres volantes),

3) soit des produits naturels qui, en vue de leur incorporation dans les ciments, ne subissent pas d'autre traitement qu'un séchage et une pulvérisation (fillers*** et pouzzolanes naturelles).

Ces divers constituants possèdent :

a) soit des propriétés hydrauliques : c'est-à-dire qu'ils forment, par réaction avec l'eau, des composés hydratés stables et peu solubles dans l'eau, présentant une forte adhérence entre eux et avec les granulats et créant ainsi progressivement une cohésion croissante des pâtes des mortiers et des bétons. Le déclenchement des propriétés hydrauliques nécessite en général l'intervention d'un catalyseur constitué par une base forte (chaux, ou chaux naissante libérée par la prise du clinker).

* Les liants hydrauliques sont essentiellement utilisés pour la confection des bétons (1), des mortiers et des enduits destinés à la réalisation des ouvrages de bâtiment et de génie civil.

(1) On assimile à des bétons "maigres", les sols et assises de chaussées traités avec des liants hydrauliques.

**Broyage à $\phi \leq 80 \mu$

***Fillers : roches broyées (ou cendres volantes) à un ϕ D maxi de 80μ .

b) soit des propriétés pouzzolaniques : c'est-à-dire qu'ils ont la faculté de former, à température ordinaire, en présence d'eau, par combinaison avec de la chaux, des composés hydratés, stables, analogues à ceux formés par les constituants hydrauliques, au cours de leur hydratation.

c) soit des propriétés physiques, qui améliorent certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité et de la compacité, diminution de la perméabilité).

Certains constituants peuvent posséder plusieurs de ces propriétés, à des degrés divers.

On distingue, suivant leur nature, les constituants suivants :

1) le clinker Portland (clinker)

Produit constitué en majeure partie de silicates et d'aluminates de calcium anhydres, obtenu par cuisson jusqu'à fusion partielle (clinkérisation → $\neq 1450^{\circ}\text{C}$) d'un mélange dosé et homogénéisé de matières crues, ayant principalement comme composants de la chaux (CaO), de la silice (SiO_2) et, en proportions moindres, de l'alumine (Al_2O_3) et de l'oxyde de fer (Fe_2O_3). Le clinker a des propriétés hydrauliques.

2) le laitier granulé (ou laitier pour cimenterie)

Obtenu par refroidissement brusque (trempage à l'eau en général) des scories de hauts-fourneaux en fusion ; le laitier doit avoir des propriétés hydrauliques pour convenir à l'emploi en cimenterie.

3) les pouzzolanes

Produits d'origine naturelle (volcanique) ou artificielle, essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer, et possédant naturellement, des propriétés pouzzolaniques.

4) Les cendre volantes de houille et de lignite

Produits pulvérulents, résidus de combustion de houille ou de lignite en centrale thermique, généralement entraînés dans les fumées.

Seules sont employées à ce titre les cendres volantes qui possèdent des propriétés pouzzolaniques (cendres de houille) ou hydrauliques (cendres de lignite).

5) les fillers

Produits obtenus par broyage fin ($\leq 80 \mu$) ou pulvérisation de certaines roches ou produits, naturels ou artificiels (calcaire, basalte, diatomite, bentonite, cendres volantes) et agissant principalement, grâce à leur granularité appropriée et par leurs propriétés physiques sur certaines caractéristiques des ciments (accroissement de la maniabilité, diminution de la perméabilité et de la capillarité, réduction de la fissurabilité). Les fillers sont inertes s'ils n'ont aucune action sur les ciments en présence d'eau. Ils sont actifs s'ils possèdent, même partiellement des propriétés pouzzolaniques ou hydrauliques en présence de ciment et d'eau.

- Les principaux produits d'addition, pouvant être ajoutés*, en faible quantité, aux constituants, au cours de la fabrication du ciment sont les suivants :

a) Sulfate de calcium

- produit incorporé aux ciments, généralement en faibles quantités** sous forme de gypse ou d'anhydrite, pour régulariser la prise.

b) Sels solubles (CaCl₂ en général)

L'addition en est proscrite, en général, dans les ciments Portland purs.

Ils peuvent être tolérés, en faible pourcentage, dans les autres ciments.

c) Adjuvants divers (agents de mouture, entraîneurs d'air, accélérateurs de prise et durcissement...)

Ces divers adjuvants, incorporés en très faibles proportions*** ne doivent avoir aucune action nocive sensible ni sur les propriétés du ciment, ni sur les armatures.

Les ciments actuellement produits dans le monde peuvent être regroupés en deux grandes familles distinctes, suivant la nature de leur constituant principal :

- la famille des "ciments Portland"**** dont la teneur en clinker est au moins égale à 60 % (maxi ~~77~~ 100 % - hors produits d'addition).

- cette famille comprend les "ciments Portland artificiels" ou "ciments Portland ordinaires"**** dont la teneur en clinker est en général supérieur à 95 % et les "ciments Portland composés"***** contenant de 5 à 40 % de constituants secondaires variés : tels que laitier, cendres et pouzzolanes, et dont les dénominations locales sont variées à l'extrême.

*En proportion variable et suivant des pourcentages maxi normalisés, par type de ciment.

**N'est incorporé en plus grande quantité que dans les ciments spéciaux "sursulfatés".

***Pourcentages maxi normalisés par type de ciment.

****Allemand : Portlandzement
Anglo-saxon : Portland cement

*****Allemand : Portlandzement
Anglo-saxon : Ordinary Portland cement

*****Allemand : - Eisen portlandzement
- Trasszement
Anglo-saxon : - Portland Blastfurnace cement ou Slag cement
- Portland pozzolan cement

- la famille des "ciments de hauts-fourneaux" ou "ciments au laitier de clinker"^{**}: dont la teneur en laitier (granulé) est au moins égale à 60 % (maxi ~~77~~ 85 - 87 % hors produits d'addition - le clinker étant, en général, l'unique constituant secondaire).

Les ciments les plus utilisés, dans le monde entier, sont les ciments Portland, et plus particulièrement, les "ciments Portland artificiels" ou "ciments Portland ordinaires". Les ciments à base de laitier restent encore peu employés en dehors de l'Europe de l'Ouest (~~77~~ 30 à 40 % du marché en RFA - 10 % du marché en France).

Le clinker apparaît ainsi, qu'il soit utilisé comme constituant principal (CPA, CPJ) ou secondaire (CHF, CLK) comme le produit de base, le plus largement utilisé, dans l'industrie cimentière.

Essentiellement fabriqué à partir de substances naturelles (calcaires, marnes, argiles, schistes...) sa production est à l'origine d'une intense activité extractive (1 tonne de clinker nécessite 1 tonne 55 de matière brute sèche ou "cru")**

Dans le cadre de cette fiche, et du point de vue technique et valorisation matériaux de carrières, le "produit" ciment sera seulement abordé par le biais du clinker.

Les autres constituants ou produits d'addition du ciment faisant déjà l'objet de fiches spécifiques (gypse, anhydrite...) s'ils sont d'origine naturelle, ou sortant du cadre du memento substances utiles s'ils sont d'origine artificielle (laitier, cendres volantes, ...)

* Allemand : 1 Hochofenzement

Anglo-saxon : Blastfurnace cement - Slag cement

** Perte en poids liée à l'évacuation, au cours de la cuisson des crus (matières premières), de leurs constituants volatils (essentiellement CO₂ des carbonates de chaux et eau d'hydratation) : "perte au feu".

1 - ECONOMIE ET MARCHÉ

L'invention du ciment Portland remonte à la première moitié du 19e siècle (travaux de L. VICAT - France - 1818, travaux de J. APSDIN - Grande Bretagne - 1824) et la première cimenterie a été montée en Grande Bretagne par J. FROST, en 1825, d'après les brevets d'APSDIN.

On peut situer le véritable démarrage de l'industrie cimentière, en Europe et aux Etats-Unis, vers la moitié du 19e siècle. Depuis lors, cette industrie n'a cessé de se développer, le ciment étant devenu depuis le début du 20e siècle le principal liant hydraulique utilisé dans le monde, pour la confection des mortiers et bétons destinés aux ouvrages de bâtiment et de génie civil. (cf : tableau N° 1 - 1913 - 1977 - Evolution de la consommation mondiale de ciment).

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 existent des ressources adéquates et 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 autour des usines (60 % à moins de 150 km). Ces distances sont, en moyenne, sensiblement inférieures en Europe occidentale.

En l'absence de ressources adéquates, et lorsque le niveau de la demande le justifie (marché local \geq 100 000 t/an 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 (côte Nord et Ouest de Bretagne, Antilles, Réunion, Nouvelle Calédonie, côte Ouest d'Afrique, ...). Transporté par voie maritime, et provenant des cimenteries situées dans des ports ou à proximité immédiate, le clinker peut donner naissance à des courants de frets à très longue distance***.

De tels courants de frets interviennent aussi en zone continentale, le clinker étant alors transporté par voie ferrée, mais sur de bien moindres distances (\neq 150 à 500 km en Europe). Ils sont alors justifiés, soit par une absence locale de ressources adéquates, soit par une politique (propre à certaines sociétés****) de concentration des productions de clinker au niveau de très grosses unités (\geq 1 million de tonnes/an).

*France : investissement moyen à la tonne de capacité installée \neq 600 F HT

Ratio : Investissement moyen à la tonne installée \neq 2,5 à 3

Prix de vente moyen à la tonne

**Transportable en vrac sans précautions particulières, le clinker se prête bien aux transports à longue distance, alors que les ciments, susceptibles de faire rapidement prise en atmosphère humide ne s'y prêtent pas.

***Boulogne : côte Ouest africaine - Bretagne Nord

Le Havre : Bretagne Ouest - Antilles...

Japon : Nouvelle Calédonie etc...

****Se traduisant simultanément par l'arrêt des "petites" cimenteries, qui ne conservent plus en activité que leur centre de broyage.

Tableau 1 : évaluation de la consommation mondiale de ciment (CEM Bureau)

	MONDE *		AFRIQUE *		AMERIQUES *		ASIE *		AUSTRALASIE*		EUROPE OUEST*		EUROPE EST*	
	Totale	per capita	Totale	per capita	Totale	per capita	Totale	per capita	Totale	per capita	Totale	per capita	Totale	per capita
1913	39,5	24	0,65	5	17,9	63	1,6	2	0,4	(60)	15,1	54	1,5	21
1920	32,2	19	0,74	6	18,1	87	2,4	3	0,5	(70)	0,7	36	0,7	10
1930	73,4	38	2,25	16	32,4	134	6,2	6	0,7	(100)	26,3	90	2,8	35
1938	86,7	40	2,8	18	22,8	75	10,7	9	1,1	(128)	38,9	127	4,2	48
1950	133,0	55	6,0	30	50,1	153	12,6	8	1,7	(170)	44,2	146	7,7	86
1960	314,2	104	10,9	40	77,4	188	62,2	35	3,5	(270)	94,5	289	22,7	230
1970	589,5	158	19,9	59	109,7	218	131,9	67	5,9	306	176,1	475	48,4	386
1973	717,5	188	25,3	67	133,5	249	180,2	79	6,8	396	214	527	59,6	465
1977	794,0	189	36,4	90	138,4	240	215,7	94	6,4	352	188,4	485	71,5	541

* { Consommation totale : 10⁶ tonnes
 * { Consommation per capita : kg/habitant

1.1. France

La capacité de production française, après avoir cru jusqu'en 1974 aux alentours de 34 millions de tonnes, est actuellement stabilisée aux alentours de 32 millions de tonnes. La consommation intérieure française, en récession légère mais continue depuis 1975 (cf tableau N° 2) a conduit l'industrie cimentière à s'assurer de nouveaux débouchés à l'exportation (2/3 des produits exportés sous forme de clinker). Cette politique a jusqu'à présent réussi à permettre de maintenir un niveau global de production stable, depuis 1975, calé aux alentours de 30,5 millions de tonnes.

- Le niveau moyen de consommation de ciment par habitant en France est redevenu en 1978 (505 kg/an) voisin de ce qu'il était en 1968 (493 kg/an +) légèrement supérieur à la moyenne européenne (cf tableaux N° 1 et 2).

- Les prix moyens ont évolué comme suit en France au cours des trois dernières années (ciment CPJ 45 - Prix rendu HT/tonne vrac - Gros utilisateurs : BPE ou BM) :

ANNEES	1977	1978	1979
Prix moyens F/T HT	## 158 F	## 175 F	## 200-210 F

- L'industrie cimentière française est particulièrement concentrée, ce processus s'est accéléré au cours des dernières années, une soixantaine de cimenteries* sont en production en 1979 (cf : tableau N° 3). Deux groupes importants, dont un d'importance internationale (groupe Lafarge) dominent la profession, disposant chacun d'une capacité de production supérieure à 10 millions de tonnes/an.

Une quinzaine d'usines récentes, dont la capacité moyenne est \geq 1 Mio t/an assurent 50 % de la production nationale. Les 50 % restants sont assurés par des unités plus anciennes, généralement, dont la capacité de production moyenne annuelle est ## 300 000 t/an.

Trois pour cent de la production nationale (## 0,9 Mio t) est assurée par des fours verticaux (26) dont les capacités de production sont les suivantes :

- moyenne ## 35 000 t/an/four,
- mini ## 15 000 t/an/four,
- maxi ## 100 000 t/an/four.

Le restant de la production est assurée par des fours rotatifs (## 95), dont les capacités de production sont les suivantes :

- moyenne ## 325 000 t/an/four

*Cimenteries : prises en compte en tant qu'unités de production de clinker Portland

Tableau N° 2 : évolution du marché français du ciment - Période 1960 - 1978

ANNEES	PRODUCTION (1)	IMPORTATION (1)	EXPORTATION (1)	CONSOMMATION APPARENTE	
				Totale (2)	Per capita.(2)
1960	14 173	11	1 351	13 173	289
1968	25 637	100	868	24 806	493
1970	29 325	48	1 317	27 965	551
1972	31 230	37	1 891	29 278	566
1974	33 597	32	2 220	31 288	593
1975	30 657	31	2 103	28 634	543
1976	30 567	77	1 901	28 712	523
1977	30 352	152	2 501	27 893	523
1978	30 164	317	3 508	26 973	505

(données CEM Bureau)

(1) Ciment + clinker = 10^3 t

(2) Ciment = totale 10^3 t ; par capita = kg/an

Tableau N° 3 : liste des sociétés cimentières françaises (1979)

RAISON SOCIALE	CAPACITE PRODUCTION
<p><u>CIMENTS LAFARGE FRANCE</u> (Groupe Lafarge) BP 302 - 3 bd Louis Laucheur 92214 SAINT CLOUD Cedex</p>	<p>≠≠ 11 Mio T</p>
<p>(1) <u>SOCIETE DES CIMENTS FRANCAIS</u> (Groupe Poliet et Chausson - Paribon) Tour Générale - 5 place de la Pyramide Quartier Villon - 92800 PUTEAUX</p>	<p>≠≠ 10,5 Mio T</p>
<p><u>SOCIETE DES CIMENTS VICAT</u> Tour GAN - Quartier Alsace - Place de l'Emeraude 92082 PARIS LA DEFENSE - Cedex 13</p>	<p>≠≠ 4,5 Mio T</p>
<p>(2) <u>CIMENTS D'ORIGNY S.A.</u> 91 bd Malesherbes 75008 PARIS</p>	<p>≠≠ 3,0 Mio T</p>
<p><u>CIMENTS ET ENGRAIS DE DANNES ET DE L'EST</u> (ex. S.C.P.L. + Dannes Lavocat + Thionvilloise) BP 37 - 57106 THIONVILLE</p>	<p>≠≠ 2 Mio T</p>
<p><u>CIMENTS DE CHAMPAGNOLE</u> 78 avenue Clémenceau BP 1075 25002 BESANCON Cedex</p>	<p>≠≠ 0,5 Mio T</p>
<p><u>CIMENTS CHIRON</u> 665 bd Henry Bordeaux BP 19 - 73002 CHAMBERY</p>	<p>≠≠ 0,4 Mio T</p>

(1) + ciments de la Loire

(2) + ciments de l'Adour

- mini \neq 65 000 t/an/four,
- maxi \neq 1 200 000 t/an/four.

70 % de ces fours (1977) fonctionnaient en voie sèche*, seul process compétitif depuis l'augmentation du coût de l'énergie.

- En règle générale, et suivant les conditions économiques prévalant dans les pays développés, le seuil de compétitivité, en capacité, pour une unité de clinkérisation neuve (cimenterie) se situe entre 300 et 500 000 t/an (1 four).

1.2. Etranger

(cf annexe I : données 1977 détaillées sur le marché mondial du ciment)

L'examen rapide des ratios de consommation (cf tableau 1) démontre que le développement de l'industrie cimentière ne se joue plus en Europe maintenant, ni au Japon, mais, pour une faible part en Amérique du Nord, et surtout en Asie (Moyen Orient compris**), en Amérique centrale et du Sud et en Afrique, où la demande potentielle peut être chiffrée à plusieurs centaines de millions de tonnes/an.

En 1977, la part de la consommation de ces différentes régions couvertes par des importations était la suivante :

PAYS	IMPORTATION 10 ³ t	IMPORTATION/CONSOMMATION EN %
AFRIQUE	16 700	46 %
AMERIQUES***	7 500	5,5 %
ASIE	18 900	8,8 %

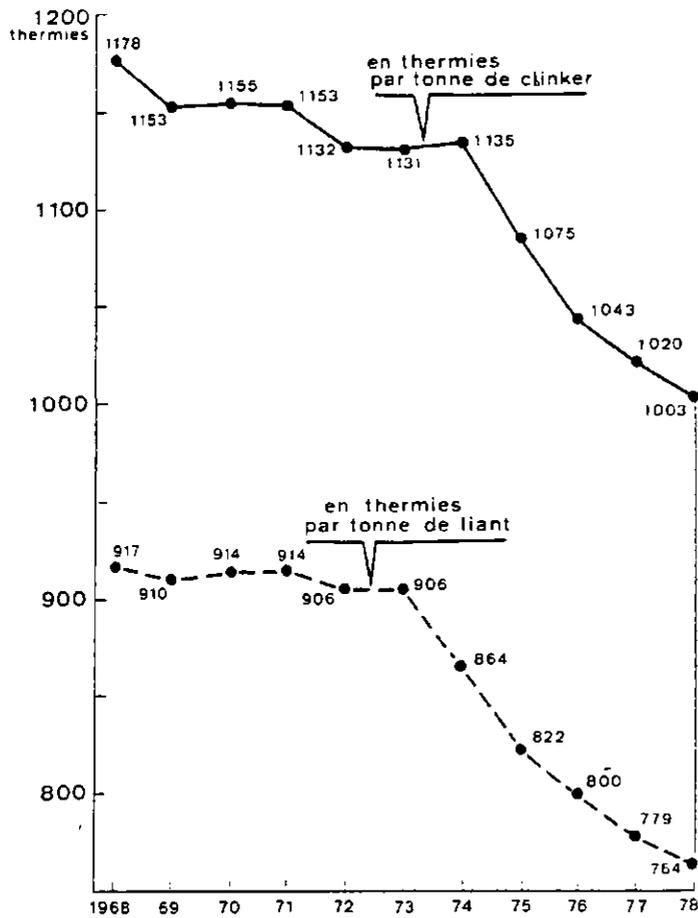
Dans la majeure partie des pays peu développés ou en voie de développement, le seuil de compétitivité, en capacité, pour une unité de clinkérisation neuve (cimenterie) se situe entre 150 et 200 000 t/an (1 four).

* Valeur à comparer avec (1977) :

- | | | |
|--------------------|------------------------|---------------|
| - Allemagne : 84 % | Suisse : 86 % | U.S.A. : 45 % |
| - Espagne : 83 % | Grande Bretagne : 22 % | |
| - Italie : 84 % | Japon : 85 % | |

** Les importations nettes de la la Péninsule arabique étaient de 10,5 mio t en 1977

***50 % destinées aux USA



France : évolution de la consommation d'énergie de cuisson à la tonne produite.
Influence croissante du développement du procédé de fabrication par
voie sèche.

On remarquera que les principaux groupes cimentiers agissant dans ces pays, et cherchant à s'y développer actuellement sont d'origine européenne :

- "Associated Portland Cement Manufacturers Ltd" alias "Blue Circle Group" - Grande - Bretagne - Portland House - Stag place - London SW1E - 5BJ

- "Cement Fabrik Holderbank" - Suisse - 5113 - Holderbank

- "Lafarge (Holding)" - France
5 rue Emile Meunier - 75016 PARIS

- "Dyckerhoff Zementwerke AG" - RFA
Postfach 2247 - 62000 Wiesbaden 1

- "Heidelberg AG" - Portland Zement Werke
Postfach 1326 - Berliner St 6
6900 Heidelberg 1

ou japonaise : ONODA Cement, MITSUBISHI MINING and Cement, Nihon Cement, SUMITOMO Cement.

2 - GEOLOGIE

La fabrication du clinker Portland requiert un titrage moyen en CaO de 66 %. Ce qui, exprimé sur produits crus secs* correspond à une teneur de l'ordre de 76 % de CaCO₃, le carbonate de calcium étant la principale source de CaO, généralement disponible dans la nature.

- Les principales ressources géologiques, sollicitées en priorité pour la production de clinker, sont les formations carbonatées calciques.

On utilise à ce titre :

soit des formations de roches ± indurées : (cas le plus fréquent)

- . sédimentaires : calcaires, marnes, craies,
- . métamorphiques : marbres, cipolins.

Contenant du CaCO₃ sous forme de calcite.

soit des formations de roches meubles : (en cas de nécessité)

- . sables et dépôts coquilliers (terrestres ou marins)
- . sables oolithiques (terrestres ou marins)

Contenant du CaCO₃, principalement sous forme d'aragonite.

- Lorsque la teneur de la ressource en CaO excède les valeurs requises, ce qui est le cas général, il est nécessaire de faire appel à des ressources géologiques complémentaires, permettant d'ajuster la composition des crus lors de leur préparation, aux titrages adéquats en SiO₂ (silice) Al₂O₃ (alumine) et Fe₂O₃ (oxyde de fer).

Les formations les plus couramment utilisées à ce titre sont les suivantes :

- comme sources d'Al₂O₃ et de SiO₂ :

- . argiles,
 - . schistes,
 - . loess,
 - . limons.
- (+ laitiers et cendres volantes...)

- comme sources de SiO₂ :

- . sables quartzeux,
- . grès,

*Produits crus secs : produits préparés dosés, homogénéisés et séchés, prêts à cuire, pour la fabrication du clinker.

. quartzites.

- comme sources d' Al_2O_3 :

. bauxite

(+ boues de décantation issues de la préparation de l'alumine)

- comme sources de Fe_2O_3^* :

. minerais de fer

(+ scories de hauts fourneaux)

Bien qu'il puisse paraître intéressant de pouvoir disposer, à titre de ressource "unique", d'un calcaire impur dont la composition chimique soit telle qu'elle ne nécessite aucune correction lors de la préparation du cru, il ne peut s'agir, en pratique, que d'un "cas d'école".

A supposer qu'elle existe, la valorisation correcte d'une telle ressource serait fort onéreuse, et ne permettrait, d'autre part, aucune souplesse de fabrication (variations imprévues des conditions de cuisson, variations qualitatives imprévues de la demande ou de la ressource).

L'évolution des techniques d'analyse en continu, de dosage, de recombinaison et d'homogénéisation, permettent en effet d'obtenir avec souplesse et aux moindres frais, à partir de plusieurs composants, éventuellement variables en qualité, des produits d'une régularité quasi-parfaite, et susceptibles d'être adaptés aisément à toute variation qualitative de la demande.

* Fe_2O_3 :-fait en pratique toujours l'objet d'ajouts dans le cadre de la préparation des crus.

-Il est seulement proscrit dans le cas particulier de la fabrication des ciments blancs.

Tableau N° 4 : Ventilation du marché par utilisateur primaire - France
(en % de la consommation totale du ciment)

	1976	1978
Ciment utilisé par les entreprises et artisans de bâtiment et génie civil et divers (autoéquipement et consommation des ménages)	80	78,9
dont : ciment utilisé sur chantier	(54)	(52,6)
dont : ciment utilisé pour le béton prêt à l'emploi	(26)	(26,3)
Ciment utilisé par les produits en béton (béton manufacturé)	17	18,9
Ciment utilisé par les produits en amiante-ciment	3	2,2
	100	100

(données CEM Bureau)

3 - SECTEURS D'UTILISATION

Les ciments sont utilisés pour la confection des bétons, mortiers, et enduits, destinés, directement, ou indirectement, à la réalisation (ainsi qu'à l'entretien) des ouvrages de bâtiment et de génie civil.

Deux approches différentes sont employées, conjointement, pour apprécier la répartition des consommations de ciment par type d'utilisateur, et en suivre l'évolution.

3.1. La première consiste à ventiler le marché, par utilisateur primaire, soit :

a) Ciment consommé par les artisans et entreprises de bâtiment et génie civil, et divers (autoéquipement, consommation des ménages)

- dont : ciment utilisé sur chantier

- dont : ciment utilisé par le béton prêt à l'emploi

b) Ciment utilisé par les produits en béton (béton manufacturé).

c) Ciment utilisé par les produits en amiante - ciment

Les résultats de cette approche, concernant le marché français en 1976 et 1978 sont donnés dans le tableau N° 4 ci-après.

On remarquera à cet égard que le taux de consommation de ciment par le BPE est relativement faible, lorsqu'on le compare à celui de nos principaux partenaires occidentaux : Grande Bretagne ~~##~~ 40 %, Allemagne ~~##~~ 45 %, Norvège et Suède ~~##~~ 50 à 55 %, Islande ~~##~~ 65 %, USA > 70 %.

Il en est de même pour le taux de consommation de ciment par l'industrie du béton manufacturé, qui dépasse largement 20 % chez la plupart de nos partenaires (→35 % au Danemark).

3.2. La deuxième approche consiste à ventiler le marché par ouvrage (utilisateur final), y compris le ciment pour le béton prêt à l'emploi, les produits en béton et l'amiante ciment. La liste complète de ces différents ouvrages, ainsi que les résultats de cette approche, concernant le marché français en 1976 et 1978 sont donnés dans le tableau N° 5 ci-après.

On remarquera que la consommation de ciment par ouvrage, soit ~~##~~ 72 % pour le bâtiment et ~~##~~ 28 % pour le génie civil se place dans la moyenne européenne.

- soit ~~##~~ 70 à 80 % pour le bâtiment*;

- soit ~~##~~ 20 à 30 % pour le génie civil*.

* Seules exceptions :

Norvège et Allemagne Fédérale : ~~##~~ 60 % pour le bâtiment et
~~##~~ 40 % pour le génie civil

Tableau N° 5 : ventilation du marché par ouvrage (utilisateur final) - France
(en % de la consommation totale de ciment)

	1976	1978
<u>OUVRAGES DE BATIMENT</u>		
- résidentiel :	42	41
dont : - logements neufs	(36)	(34,8)
- divers (entretien, transformations, etc, ...)	(6)	(6,2)
- non résidentiel :		
. bâtiments scolaires et universitaires	3	3,2
. bâtiments hospitaliers	2	2,3
. bâtiments agricoles	1	0,9
. bâtiments industriels	5	4,9
. autres bâtiments	11	10,8
. entretien et transformation	9	8,6
TOTAL BATIMENT.....	73	71,7
<u>OUVRAGES DE GENIE CIVIL</u>		
. génie civil industriel	2	2
. ouvrages d'art	3	2,6
. ouvrages maritimes et fluviaux	2	1,3
. autoroutes	1	1,2
. routes	3	3,5
. voies ferrées		1,1
. eau	} 2	0,4
. assainissement		1,5
. canalisations		0,1
. voirie et réseaux divers (V.R.D.)	4	4,8
. réseaux électriques et téléphoniques	2	2,3
. divers génie civil	8	7,5
TOTAL GENIE CIVIL.....	27	28,3
TOTAL PROFESSION*.....	100	100

(données CEM bureau)

*(y compris le ciment pour BPE, béton manufacturé et amiante-ciment)

La consommation moyenne de ciment par type de logement, en France, 1978, est donnée dans le tableau N° 6 ci-après.

Elle se situe dans la moyenne européenne, voisine de 20 t/logement (mini \approx 15 t/logement dans les pays scandinaves - maxi \approx 30 t/logement en RFA, Belgique et Italie).

Les dosages moyens en ciment les plus couramment utilisés dans les bétons, mortiers et enduits sont les suivants :

- enduits et mortiers spéciaux : 550 à 600 kg/m³
- mortiers ordinaires : 350 à 400 kg/cm³
- béton ordinaire : \approx 300 kg/m³
- béton d'ouvrage d'art : \approx 350 à 400 kg/m³
- produits en béton manufacturé :
 - . blocs, parpaings et hourdis : 100 à 110 kg/t
(\approx 200 à 250 kg/m³)
 - . tuyaux et installations d'assainissement : 170 à 175 kg/t
(\approx 400 à 420 kg/m³)
 - . bordures, etc... : 160 kg/t (\approx 350 à 370 kg/m³)

A l'échelle nationale, le dosage moyen en ciment, tous emplois "béton" confondus est de l'ordre de : \approx 300 kg/m³.*

* Idem dosage moyen en ciment du béton ordinaire :

- ciment \approx 300 kg/m³
- granulats \approx 1,900 kg/cm³

Tableau N° 6 : consommation moyenne de ciment par logement* (tonnes) -
France - 1978

Type de logement	Ciment consommé sur chantier		Ciment incorporé dans les produits en B.M. et Am. Cim.		Total
Logements collectifs	16,7	+	1,3	=	18,0
Logements individuels	16,3	+	7,2	=	23,5
Soit en moyenne*	16,5	+	4,7	=	21,2

(données Syndicat Chaux et Ciments)

*58 % de logements individuels et 42 % de logements collectifs

4 - SPECIFICATIONS ET CRITERES DE SELECTION

4.1. Spécifications

Les ciments, seuls, en tant que produits finis marchands, font l'objet de spécifications précises et détaillées, le plus souvent normalisées.

Celles-ci fixent, pour chaque type de ciment, un certain nombre de caractéristiques chimiques et physiques imposées, et, éventuellement sa composition, assortie de tolérances (constituant principal - constituant (s) secondaire (s) - ajout(s)).

Les spécifications relatives aux "ciments Portland artificiels" (≠ purs) sont les seules à concerner les "clinkers", de manière relativement directe. (cf : § introduction).

Nous nous limiterons donc à l'examen de ces dernières.

4.1.1. Ciments Portland Artificiels ("ordinary Portland Cement")

Parmi les différentes caractéristiques spécifiées, ce sont principalement celles concernant le chimisme des ciments qui sont en relation avec celles des clinkers, et au delà, avec celles des crus et des matières premières utilisées pour leur préparation*.

Nous les avons regroupées, sous forme simplifiée, pour les principaux producteurs mondiaux, dans le tableau N° 7.

Les éléments concernés sont peu nombreux, il s'agit principalement de la magnésie ($MgO < 4$ à 6%) des trioxydes de soufre ($SO_3 < 2,5$ à $4,5 \%$) et, dans certains cas, des alcalins (Na_2O et K_2O).

Ces trioxydes de soufre (SO_3) sont, en majeure partie, liés aux additions de sulfate de calcium (sous forme de gypse ou d'anhydrite) pratiquées lors des opérations finales de broyage, afin de régulariser la prise du ciment.

Dans le cadre des activités de commerce extérieur, les principales normes de référence sont d'origine britannique (British Standards) et américaine (American Society for Testing Materials).

* Les autres caractéristiques spécifiées, sont principalement, de nature physique (finesse de monture, vitesse de prise, résistance à 2, 7, 28, 90 jours, retrait, expansion, ...). Elles sont largement liées aux opérations qui suivent la fabrication du clinker (broyage, incorporation de produits d'ajout, ...).

**Tableau N° 7 : ciments Portland artificiels - Spécifications des principaux pays producteurs mondiaux -
Caractéristiques chimiques (simplifiées)**

	(1)		(2)	(3)	
	MgO %	(Na ₂ O + 0,66K ₂ O) %	SO ₃ %	Perte au feu	Résidus insolubles
ALLEMAGNE FEDERALE	< 5	-	< 3,5 - 4,5	< 5	-
FRANCE	< 5	-	< 4	-	-
ITALIE	< 4	-	< 3	< 5	< 3
ROYAUME UNI G.B.	< 4	-	< 2,5 - 3,5	< 3	< 1,5
SUEDE	< 5	-	< 3,5	-	-
U.R.S.S.	< 5	-	< 1,5 - 3,5	-	-
U.S.A.	< 6	< 0,6*	< 2,3 - 4,5	< 2,5 - 3	< 0,75
BRESIL	< 5 - 6	-	< 3	< 4	< 1
AFRIQUE DU SUD	< 5	-	< 3	< 4	-
INDE	< 6	< 0,6*	< 2,75	< 4	< 1,5
JAPON	< 4 - 5	-	< 2,5 - 2,8	< 4	-

(1) Caractéristiques en liaison directe (≠ idem) avec celles du clinker

(2) Caractéristiques en liaison partielle avec celles du clinker (liées à ajouts CaSO₄)

(3) Caractéristiques liées aux conditions de cuisson du clinker

* Spécifications optionnelles (Low-alkali cement)

Les documents de base sont les normes suivantes :

- Grande-Bretagne : BS - 12 - (1978)
 - BS - 1370 - (1974) - part 2
 - BS - 4027 - (1972) - part 2
- USA : ASTM - C 150 - 78 - a
- (France : NF - P - 15301 - 1978)

On trouvera, en annexe II, une comparaison détaillée des caractéristiques chimiques spécifiées par ces normes.

Ajoutons, pour concrétiser ces diverses données, que la composition chimique des ciments Portlands artificiels se situe dans les fourchettes suivantes :

Tableau N° 8 :

	SiO ₂ *	Al ₂ O ₃ *	Fe ₂ O ₃ *	CaO*	MgO	SO ₃	K ₂ O + Na ₂ O
%	19	2	1	62 (60)	0	1	0,2
m et M	25	9	5 (6)	67	3 (5)	3 (4)	1,3

On peut en déduire celle des clinkers, une fois soustraite l'incidence des ajouts en CaSO₄.

4.1.2. Clinker

Des expériences approfondies, les connaissances acquises sur la composition des clinkers (cf : tableau N° 8) ont permis de définir une série de ratios, ou "modules" caractéristiques tenant lieu de spécifications concernant leur composition chimique.

Ces ratios sont les suivants :

$$\text{"Module hydraulique"} = \frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} = 1,7 \text{ à } 2,2$$

$$\text{"Module silicique"} = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} = 2,4 \text{ à } 2,7 \quad (\text{extrêmes : } 1,2 \text{ à } 4,0)$$

Nota : *On utilise dans l'industrie cimentière une terminologie simplifiée pour caractériser ces oxydes :

- S : SiO₂ F : Fe₂O₃
- A : Al₂O₃ C : CaO

$$\text{"Module alumino-ferrique"} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} = 1,5 \text{ à } 2,5$$

(extrêmes : 1,0 à 4,0)

On y associe le degré de saturation en chaux :

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

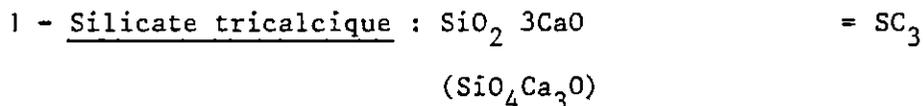
dont les valeurs doivent être les suivantes :

- ciments ordinaires DS = 0,9 à 0,95
- ciments à haute résistance DS = 0,95 à 0,98

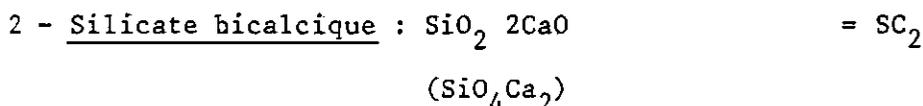
Il est à noter que l'on peut d'autre part déterminer, de manière approchée, à partir de la composition chimique d'un clinker, sa "composition potentielle", c'est-à-dire l'ensemble des teneurs en composés minéralogiques* formés en cours de cuisson (cf annexe III).

De ce point de vue, la composition des clinkers Portland se situe dans les fourchettes suivantes (tableau N° 9).

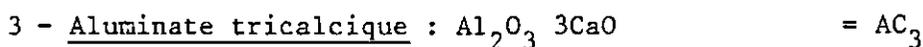
Nota : *Les quatre principaux composés minéralogiques contenus dans les clinkers sont les suivants :



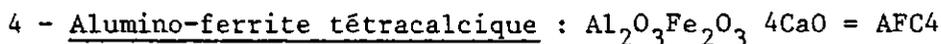
Résistance initiale élevée du ciment



Résistance à long terme du ciment



Résistance à très court terme du ciment. Forte chaleur et mauvaise tenue aux eaux agressives.



Pas d'effet/résistance du ciment

Tableau N° 9 :

	Teneur % extrêmes	Moyenne %
SC ₃ : silicate tricalcique	50 - 75	≠ 55 %
SC ₂ : silicate bicalcique	7 - 30	≠ 20 %
AC ₃ : aluminat tricalcique	0 - 16	≠ 12 %
AFC ₄ : alumino-ferrite tétracalcique	0 - 20	≠ 8 %

4.2. Critères de sélection

Les principaux critères techniques de sélection à prendre en compte dans le cadre de la valorisation de ressources en matériaux destinées à la fabrication de "clinker Portland" concernent :

- les caractéristiques des "matériaux bruts" d'une part,
- les conditions de gisement, d'autre part.

On ne pourra cependant les faire intervenir à bon escient que dans la mesure où l'on disposera d'une connaissance approfondie du marché, des techniques d'exploitation et de fabrication et de leurs coûts, ainsi que des frets.

La sélection effective n'est donc réalisable qu'au terme d'une approche globale, intégrant en outre les contraintes d'environnement.

4.2.1. Critères liés aux caractéristiques des matériaux bruts

Ils résultent principalement de la comparaison des caractéristiques chimiques des "clinkers" susceptibles d'être obtenus à partir des ressources en matières premières étudiées (après dosage et homogénéisation sous forme de "cru", puis cuisson), avec les règles et spécifications imposées à ce niveau (cf : § 4.1.1. et 4.1.2.)

On rappellera que lors de leur cuisson (≠ 1 450°C), les matières premières, préparées sous forme de "crus", subissent d'importantes "pertes au feu" (évacuation de CO₂ et H₂O) .

Tableau N° 10 : "relations crus/clinkers"

% CaCO ₃ / produits crus secs	72	73	74	75	76	77	78	79
Tonne de clinker/tonne de cru	0,6636	0,6599	0,656	0,652	0,649	0,645	0,642	0,639
Tonne de cru/ tonne de clinker	1,5069	1,5154	1,524	1,532	1,541	1,55	1,558	1,567
% CaO dans le clinker	60,8	62,0	63,2	64,4	65,8	66,9	68,1	69,3

compte tenu des pertes en cours de fabrication, on estime qu'il faut :

1,55 à 1,60 t produits crus /1 tonne de clinkers

Ainsi, les teneurs requises en CaO des "clinkers" impliquent que les teneurs en CaCO₃ des "crus" soient de l'ordre de 73 à 78 %.

Il importe donc en priorité de pouvoir disposer :

a) d'une ressource principale* en matériaux bruts dont :

teneur en CaCO₃ ≥ 80 %

b) d'une (ou plusieurs) ressource complémentaire en matériaux bruts permettant d'ajuster la composition (CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe O₃, ...) du "cru" aux caractéristiques requises.

Les autres critères de sélection peuvent être résumés comme suit :

- teneur en magnésie - MgO < 5 % (voire < 3 %)

- teneur en alcalins - Na₂O < 0,5 %

K₂O < .1 %
(voire < 0,6 % pour Na₂O + 0,6 K₂O)

*Représentant, suivant sa teneur en CaCO₃, de ≠ 80 à ≠ 100 % du tonnage de matériaux bruts extraits pour la préparation des "crus".

- teneur en sulfates et sulfures : $SO_3 < 2 \%$
exprimés sous forme de SO_3)
- teneur en fer sous forme de pyrite (FeS_2) : $FeS_2 \ll 2 \%$

(la présence de fer est proscrite dans les matières premières pour ciments blancs)

- silice libre : elle est proscrite sous forme d'éléments grossiers incombinales avec la chaux lors de la cuisson :

- . silex en rognons et nodules,
- . quartz (sables avec $D^{\square} > 80 \mu$)

- on notera enfin que les éléments phosphatés sont souvent proscrits.

4.2.2. Critères liés aux conditions de gisements :

- les deux principaux critères concernent :

- . la réserve exploitable : dont le potentiel doit être > 50 ans,
- . le taux de recouvrement : (concerne, en priorité la ressource principale : source de CaO)

+ les taux admis sont généralement faibles* (roches massives) et correspondent aux taux-limites suivants :

$$\frac{\text{Découverte (m}^3\text{)}}{\text{Exploitable (m}^3\text{)}} \neq 1/4 \text{ à } 1/5$$

. les autres critères de sélection sont essentiellement liés à la recherche d'une homogénéité maximale des caractéristiques chimiques du gisement (verticalement, horizontalement).

A cet égard, tout développement accusé de l'un des phénomènes suivants :

- fracturation et effets induits : pollution, difficultés d'abattage et tenue des fronts,

- variations de faciès latérales et verticales,

- karstification et effets induits : pollution, difficultés traitement découverte, ...

peut conduire à stériliser totalement un gisement potentiel.

*cf : Mémo granulats - Incidence identique à la tonne de cru.

5 - MODALITES DE PREPARATION ET DE TRAITEMENT

La préparation des "clinkers", et des "ciments Portland artificiels" fait appel, à des méthodes de traitement, dont certaines sont classiques dans l'industrie minière.

Elle se déroule en quatre phases successives (cf : figure 2), au cours desquelles interviennent les opérations suivantes :

- Phase N° 1 : "extraction/traitement/stockage"

Après abattage, extraction, transport et traitement (concassage-criblage), les matières premières sont stockées séparément, sous forme de $0/D^{\square}$ mm ($D^{\square} \leq 20$ mm). Les opérations de stockage, à ce stade, ont lieu, le plus souvent, sous enceinte couverte.

- Phase N° 2 : "préparation du cru"

. Les matières premières ($\neq 0/20^{\square}$) reprises aux stocks, après dosage, recombinaison et mélange, sont broyées, sous forme de $0/d^{\square}$ mm ($d^{\square} \leq 80\mu$), homogénéisées, puis stockées ("cru" : prêt à cuire).

. Si la préparation du cru est faite par voie humide (procédé coûteux en énergie de cuisson, en voie d'abandon accéléré), les opérations de broyage sont effectuées en présence d'eau, les crus étant homogénéisés puis stockés sous forme de pulpe (bassins réservoirs).

. Si la préparation du cru est faite par voie sèche : les opérations de broyage, sont réalisées à sec, les crus, après séchage complémentaire étant homogénéisés, puis stockés sous forme de poudre (silos à pulvérulents).

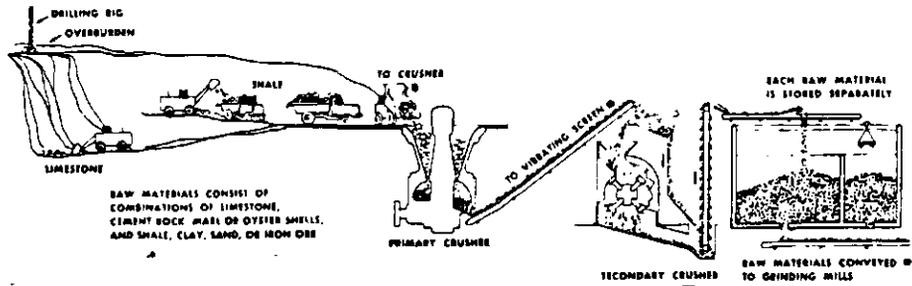
- Phase N° 3 : "cuisson du cru : production du clinker"

. Le cru, après cuisson et fusion partielle au four (ϑ : 1 450°C) est transformé en clinker ($\rightarrow 0/50^{\square}$ mm). Il est stocké, après refroidissement (silos, etc...), avant expédition ou transformation en ciment.

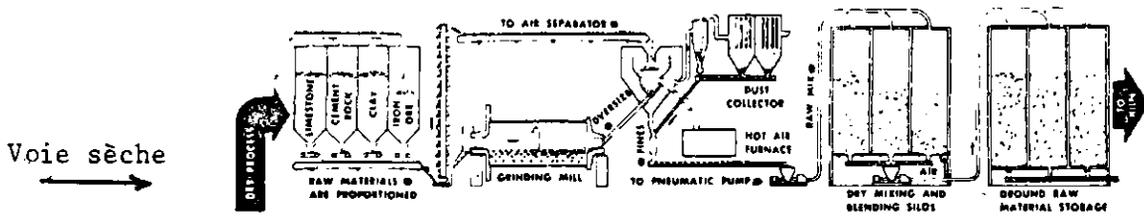
- Phase N° 4 : "production du ciment Portland artificiel"

. Le clinker et les produits d'ajouts (gypse ou anhydrite + éventuellement fillers) nécessaires, repris aux stocks, sont, après dosage, recombinaison et mélange, broyés à la finesse nécessaire ($d^{\square} \max \leq 80 \mu$ - finesse blaine $\neq 2\ 000$ à $4\ 000$), et ainsi transformés en ciment, prêt à l'emploi.

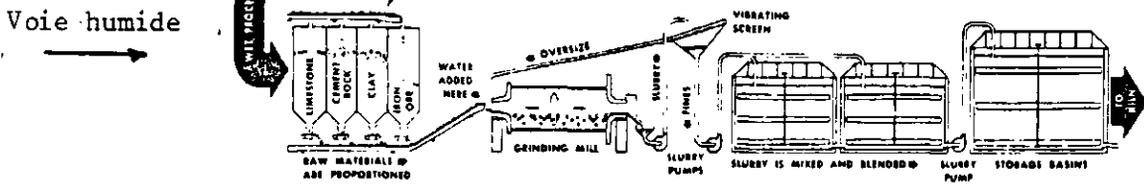
Industrial Minerals and Rocks



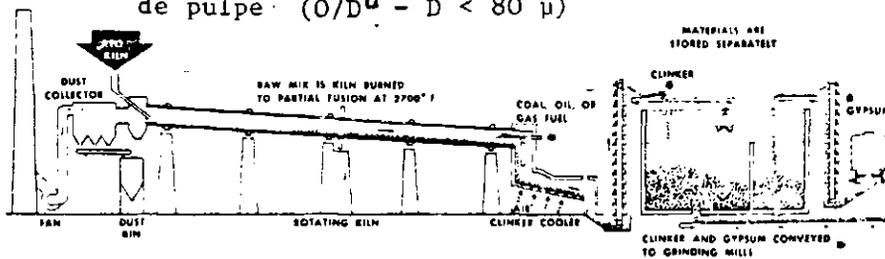
1 - Extraction - traitement - stockage ($O/D^{\square} - D \leq 20 \text{ mm}$)



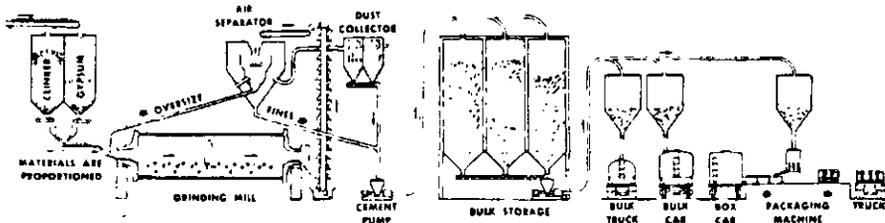
2 - Préparation du cru : broyé, homogénéisé, stocké ($O/D^{\square} - D \leq 80\mu$)



2 - Préparation du cru : broyé, homogénéisé et stocké sous forme de pulpe ($O/D^{\square} - D < 80 \mu$)



3 - Cuisson du cru et production du clinker



4 - Fabrication du CPA : broyage du clinker après ajout de gypse

Figure N° 2

6 - PRODUITS DE SUBSTITUTION

Il n'existe pas de produits substituables intégralement au clinker en tant que constituants des ciments.

Ceux-ci peuvent cependant contenir jusqu'à 80 à 85 % de constituants autres que du clinker et en particulier :

- principalement du laitier granulé : ciments de laitier,
- éventuellement des matériaux pouzzolaniques d'origine naturelle : ciments pouzzolaniques. Les ciments de ce type sont rares, on en fabrique essentiellement au Japon et en Italie.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

NORMES ET SPECIFICATIONS

France : NF-P 15 301 - Décembre 1978

"Définitions, classification et spécifications des ciments"

NF-P 15 462 - Octobre 1964

"Essai de pouzzolanicité" (Essai Chapelle)

Etranger : "Cement standards of the world"

Publication du CEM Bureau - 1968 (nouvelle édition à paraître en 1980)

ECONOMIE - MARCHÉ

- statistiques annuelles du syndicat des Fabricants de Chaux et Ciments - 41 avenue de Friedland - PARIS 8e

- statistiques annuelles du CEM Bureau (Association Européenne des Producteurs de Ciment) - 2 rue St Charles - 75740 PARIS Cedex 15

- "World Cement Market figures - 1913 - 1977"
Publication du CEM Bureau - 1978 -

- "Utilisations finales du ciment"
Publication du CEM Bureau - 1977

- "World Cement Directory" - 1977
Publication CEM Bureau

GENERALITES

- "Fabrication et utilisation des liants hydrauliques" par M. PAPADAKIS et M. VENUAT - Edition Eyrolles - 1966

- "Mémento de l'Ingénieur en cimenterie" par Otto LABAHN - Edition Eyrolles - 1964

- "La pratique des ciments et des bétons" par M.VENUAT - Edition du Moniteur des T.P. et B. - 1976

ANNEXE

Annexe I : données 1977 sur le marché mondial du ciment

I - LES 25 PAYS PLUS GROS PRODUCTEURS

Pays	Production (en 1 000 tonnes)	1977/1976 %	Part de la production mondiale %
1 - U.R.S.S	127 000	+ 2,45	15,99
2 - Japon	75 176	+ 10,23	9,47
3 - États-Unis	62 745	- 0,75	7,90
4 - Chine	51 500	+ 4,89	6,48
5 - Italie	38 439	+ 4,96	4,84
6 - Allemagne RFA	31 871	- 5,80	4,01
7 - France	30 352	- 0,70	3,82
8 - Espagne	29 422	+ 13,34	3,70
9 - Pologne	21 298	+ 7,52	2,68
10 - Brésil	21 123	+ 10,32	2,66
11 - Inde	19 084	+ 2,41	2,40
12 - Royaume-Uni	16 054	- 1,85	2,02
13 - Corée du Sud	14 418	+ 21,44	1,81
14 - Turquie	13 869	+ 11,66	1,75
15 - Roumanie	13 700	+ 9,18	1,73
16 - Mexique	13 227	+ 5,11	1,66
17 - Allemagne RDA	12 103	+ 6,68	1,52
18 - Grèce	10 467	+ 21,82	1,32
19 - Taiwan	10 334	+ 18,01	1,30
20 - Canada	9 933	+ 0,35	1,25
21 - Tchécoslovaquie	9 750	+ 2,07	1,23
22 - Yougoslavie	8 185	+ 7,46	1,03
23 - Belgique	7 815	+ 4,14	0,98
24 - Corée du Nord	7 700	+ 2,67	0,97
25 - Iran	7 000	+ 29,63	0,88

II - LES 25 PLUS GROS CONSOMMATEURS DE CIMENT
(EN 1 000 t)

	1 000 T	77/76 %
1 - U.R.S.S	124 198	+ 2,11
2 - États-Unis	69 482	+ 7,45
3 - Japon	69 381	+ 7,53
4 - Chine	49 900	+ 4,83
5 - Italie	37 800	+ 5,38
6 - Allemagne RFA	31 054	- 4,72
7 - France	27 893	- 2,85
8 - Espagne	21 694	+ 1,89
9 - Brésil	20 938	+ 7,72
10 - Pologne	20 498	+ 4,54
11 - Inde	18 277	- 1,86
12 - Royaume-Uni	14 498	- 6,95
13 - Turquie	12 924	+ 11,62
14 - Mexique	12 030	- 1,26
15 - Allemagne RDA	11 603	+ 5,82
16 - Corée du Sud	11 177	+ 23,09
17 - Roumanie	10 700	+ 8,80
18 - Tchécoslovaquie	9 812	- 1,82
19 - Iran	9 000	+ 34,33
20 - Canada	8 916	- 4,06
21 - Taiwan	8 791	+ 8,65
22 - Yougoslavie	8 359	+ 12,67
23 - Arabie Saoudite	7 450	+ 40,57
24 - Corée du Nord	7 000	+ 1,45
25 - Nigeria	6 460	+ 96,20

III - LA CONSOMMATION PAR HABITANT (en kgs)

Les 26 plus gros consommateurs

	kgs	77/76 %
1 - Emirats arabes	8 000	+ 9,59
2 - Qatar	4 400	+ 15,79
3 - Libye	1 283	- 1,76
4 - Andorre	1 450	+ 26,09
5 - Koweït	1 160	+ 2,65
6 - Arabie Saoudite	783	+ 36,41
7 - Autriche	782	+ 2,76
8 - Brunei	767	+ 19,10
9 - Luxembourg	747	- 3,61
10 - Allemagne RDA	692	+ 5,97
11 - Italie	669	+ 4,86
12 - Bahrein	660	+ 8,20
13 - Tchécoslovaquie	653	- 2,54
14 - Grèce	635	+ 11,01
15 - Ter. Fran. Pacifique	620	-
16 - Islande	616	- 9,28
17 - Japon	608	+ 6,29
18 - Belgique	603	- 2,11
19 - Espagne	597	+ 0,84
20 - Suisse	596	+ 4,75
21 - Pologne	591	+ 3,68
22 - Gabon	566	+ 2,72
23 - Singapour	557	- 13,78
24 - Chypre	553	+ 9,72
25 - Bulgarie	534	+ 5,33
26 - France	527	- 2,77

IV - LES PLUS GROS CONSOMMATEURS AU KM² (EN TONNES)

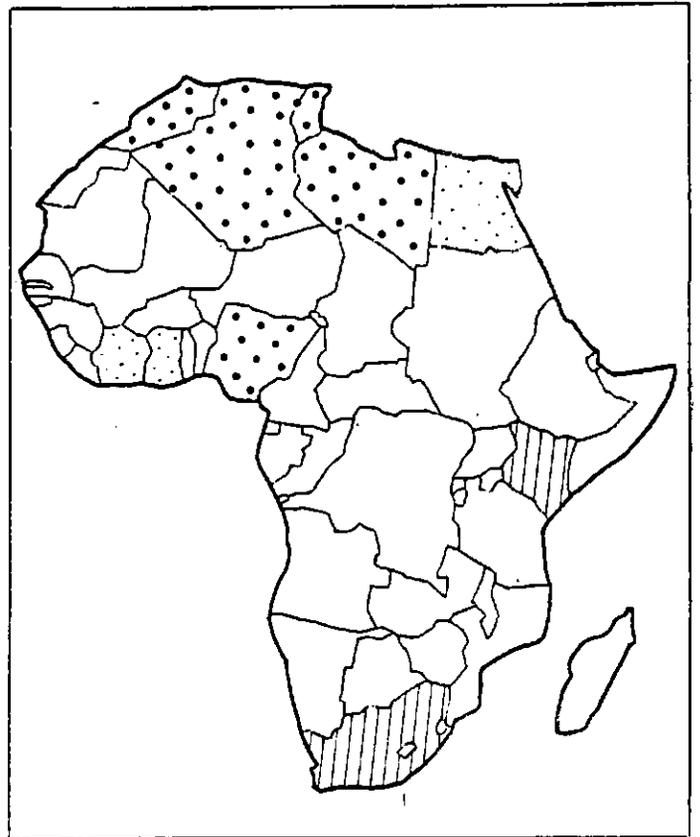
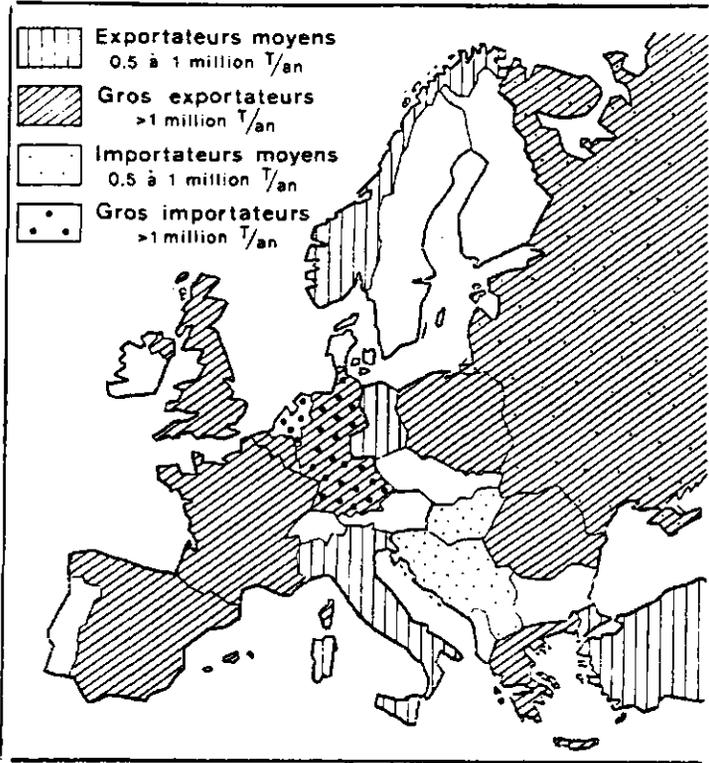
(La consommation moyenne mondiale est de 5,31 tonnes)

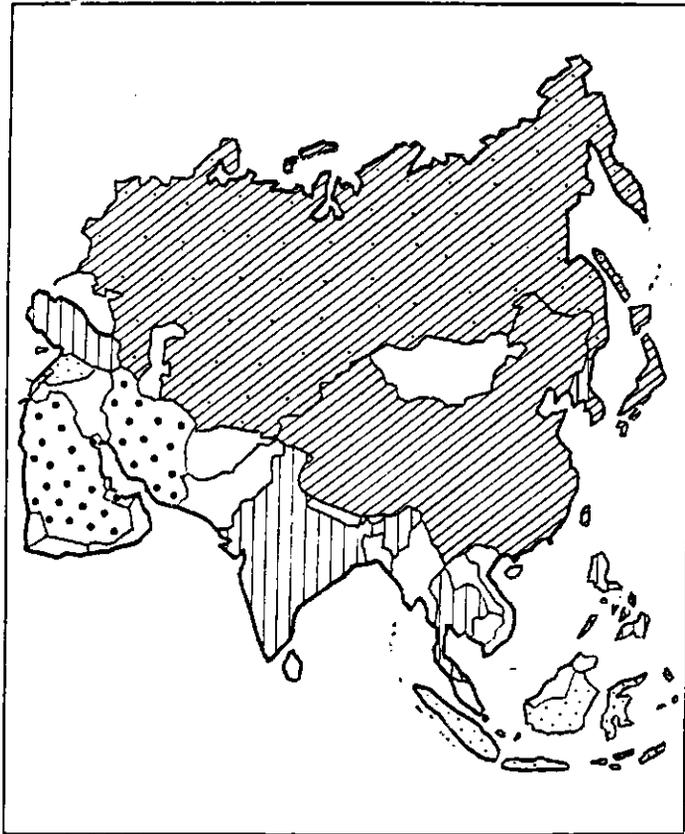
	Tonnes
1 - Macao	3 062,50
2 - Singapour	2 215,15
3 - Hong-Kong	1 946,71
4 - Gibraltar	1 333,33
5 - Malte	367,09
6 - Bahrein	301,00
7 - Taïwan	244,46
8 - Antilles Néerl.	203,35
9 - Belgique	196,54
10 - Japon	186,51
11 - Pays-Bas	181,66
12 - Porto Rico	142,18
13 - Italie	125,48
14 - Allemagne RFA	124,25
15 - Martinique	117,59
16 - Maurice	115,94
17 - Corée du Sud	113,50
18 - Allemagne RDA	107,13
19 - Luxembourg	104,02
20 - Liban	91,35
21 - Israël	90,92
22 - Suisse	90,29
23 - Koweït	82,00
24 - Tchécoslovaquie	76,73
25 - Réunion	74,10
26 - Guadeloupe	73,03

V - LES PLUS GROS EXPORTATEURS (PLUS DE 500 000 T DE CIMENT OU DE CLINKER) (90 % du total du ciment exporté)

(Total des exportations mondiales : 59 200 000 t)

Pays exportateurs	Exportations Tonnes	1977/1976 %	Part des Exportations mondiales %
1 - Espagne	7 919	+ 62,67	13,3
2 - Japon	6 411	+ 14,63	10,8
3 - Grece	4 442	+ 33,11	7,4
4 - Corée du Sud	4 035	+ 10,07	6,8
5 - U.R.S.S.	3 438	+ 19,29	5,7
6 - Roumanie	3 000	+ 10,58	5,1
7 - France	2 501	+ 31,56	4,2
8 - Allemagne RFA	2 217	+ 6,69	3,7
9 - Canada	2 050	+ 30,57	3,5
10 - Belgique	2 047	+ 30,13	3,5
11 - Royaume-Uni	1 700	+ 64,09	2,9
12 - Chine	1 600	+ 6,67	2,7
13 - Taiwan	1 561	+ 188,54	2,6
14 - Mexique	1 197	+ 192,67	2,0
15 - Pologne	1 000	+ 66,67	1,7
16 - Turquie	941	+ 3,41	1,6
17 - Philippines	822	+ 16,27	1,4
18 - Inde	807	+ 4,67	1,4
19 - Norvège	755	- 15,26	1,3
20 - Chypre	750	+ 2,32	1,3
21 - Italie	703	- 12,02	1,2
22 - Thaïlande	700	+ 10,58	1,2
23 - Corée du Nord	700	+ 16,67	1,2
24 - Kenya	662	+ 7,64	1,1
25 - Liban	650	+ 664,71	1,1
26 - Rép. Sudafricaine	638	+ 82,81	1,1
27 - Allemagne RDA	500	+ 4,17	0,8





Annexe II : comparaison des caractéristiques chimiques imposées par les normes britanniques, américaines et françaises

A l'occasion de la mise en place en France des nouvelles normes pour les liants hydrauliques dans le cadre de l'AF-NOR, il est intéressant de les comparer avec les normes britanniques (British Standards = BS) et américaines (American Society for Testing and Materials = ASTM) auxquelles il est fait très largement référence dans les pays non européens sur lesquels s'exerce l'essentiel des activités d'exportation.

Il serait également intéressant de comparer les normes en vigueur dans les pays européens eux-mêmes mais une telle étude est encore prématurée car les normes européennes évoluent actuellement et l'on peut penser que dans un temps assez court, tout au moins à l'échelle des travaux de normalisation, c'est à dire quelques années, une réelle normalisation européenne des liants hydrauliques aura été mise en place. Elle servira alors de base à une révision de l'ensemble des normes internationales à travers l'ISO* et fera peut-être évoluer les normes américaines, les normes britanniques s'étant adaptées au sein de la normalisation européenne.

Les tableaux ci-après permettent de comparer les spécifications des ciments Portland artificiels en Grande Bretagne, aux Etats-Unis et en France.

* (International Standard Organisation)

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

La signification des sigles et abréviations utilisés par la Grande Bretagne et les U.S.A. est la suivante

- OPC - BS = Ciment Portland ordinaire
- RHPC - BS = Ciment Portland à durcissement rapide
- LHPC - BS = Ciment Portland à faible chaleur d'hydratation
- SRPC - BS = Ciment Portland résistant aux sulfates
- type I - ASTM = Ciment Portland ordinaire
- II - ASTM = id à chaleur et résistance chimique modérées
- III - ASTM = Ciment Portland à durcissement rapide
- IV - ASTM = Ciment Portland à faible chaleur d'hydratation
- V - ASTM = Ciment Portland résistant aux sulfates.

**Tableau - Spécification comparées des normes
- Caractéristiques chimiques**

Pays, norme	G.B. (BS)				U.S.A. (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 1/10000										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 + 2C ₃ A, max									20						
additions ou fillers	pas	pas	pas	pas	pas	pas	pas	pas	pas	3	3	3	3	3	3

Annexe III : Calcul de la "composition potentielle"* d'un clinker à partir de sa composition chimique
(extrait Norme ASTM C150-78)

La détermination de la "composition potentielle" d'un clinker à partir de sa composition chimique procède d'une approche théorique et relativement simplifiée. Les résultats obtenus sont cependant en assez bon accord avec la réalité.

Ils se calculent de la manière suivante, selon que le Module Alumino ferrique est > 0,64 (cas normal) ou < 0,64 (cas des ciments blancs et de certains ciments spéciaux) :

$\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} > 0,64$ →

* The expressing of chemical limitations by means of calculated assumed compounds does not necessarily mean that the oxides are actually or entirely present as such compounds.

→ When the ratio of percentages of aluminum oxide to ferric oxide is 0.64 or more, the percentages of tricalcium silicate, dicalcium silicate, tricalcium aluminate and tetracalcium aluminoferrite shall be calculated from the chemical analysis as follows:

Tricalcium silicate = $(4.071 \times \% CaO) - (7.600 \times \% SiO_2) - (6.718 \times \% Al_2O_3) - (1.430 \times \% Fe_2O_3) - (2.852 \times \% SO_3)$

Dicalcium silicate = $(2.867 \times \% SiO_2) - (0.7544 \times \% C_2S)$

Tricalcium aluminate = $(2.650 \times \% Al_2O_3) - (1.692 \times \% Fe_2O_3)$

Tetracalcium aluminoferrite = $3.043 \times \% Fe_2O_3$

$\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} < 0,64$ →

→ When the alumina-ferric oxide ratio is less than 0.64, a calcium aluminoferrite solid solution (expressed as ss (C₄AF + C₇F)) is formed. Contents of this solid solution and of tricalcium silicate shall be calculated by the following formulas:

ss(C₄AF + C₇F) = $(2.100 \times \% Al_2O_3) + (1.702 \times \% Fe_2O_3)$

Tricalcium silicate = $(4.071 \times \% CaO) - (7.600 \times \% SiO_2) - (4.479 \times \% Al_2O_3) - (2.859 \times \% Fe_2O_3) - (2.852 \times \% SO_3)$.

No tricalcium aluminate will be present in cements of this composition. Dicalcium silicate shall be calculated as previously shown.

In the calculation of C₃A, the values of Al₂O₃ and Fe₂O₃ determined to the nearest 0.01 % shall be used. In the calculation of other compounds the oxides determined to the nearest 0.1 % shall be used.

All values calculated as described in this note shall be reported to the nearest 1 %.

* "Composition potentielle" : composition minéralogique potentielle d'un clinker de composition chimique donnée.

Annexe IV

POIDS ATOMIQUES

Aluminium	Al	27,1	Sodium	Na	23,0
Baryum	Ba	137,4	Phosphore	P	31,4
Calcium	Ca	40,0	Mercure	Hg	200,3
Chlore	Cl	35,4	Oxygène	O	16,0
Fer	Fe	56,0	Soufre	S	32,0
Potassium	K	39,1	Silicium	Si	28,0
Carbone	C	12,0	Azote	N	14,0
Magnésium	Mg	24,4	Hydrogène	H	1,0