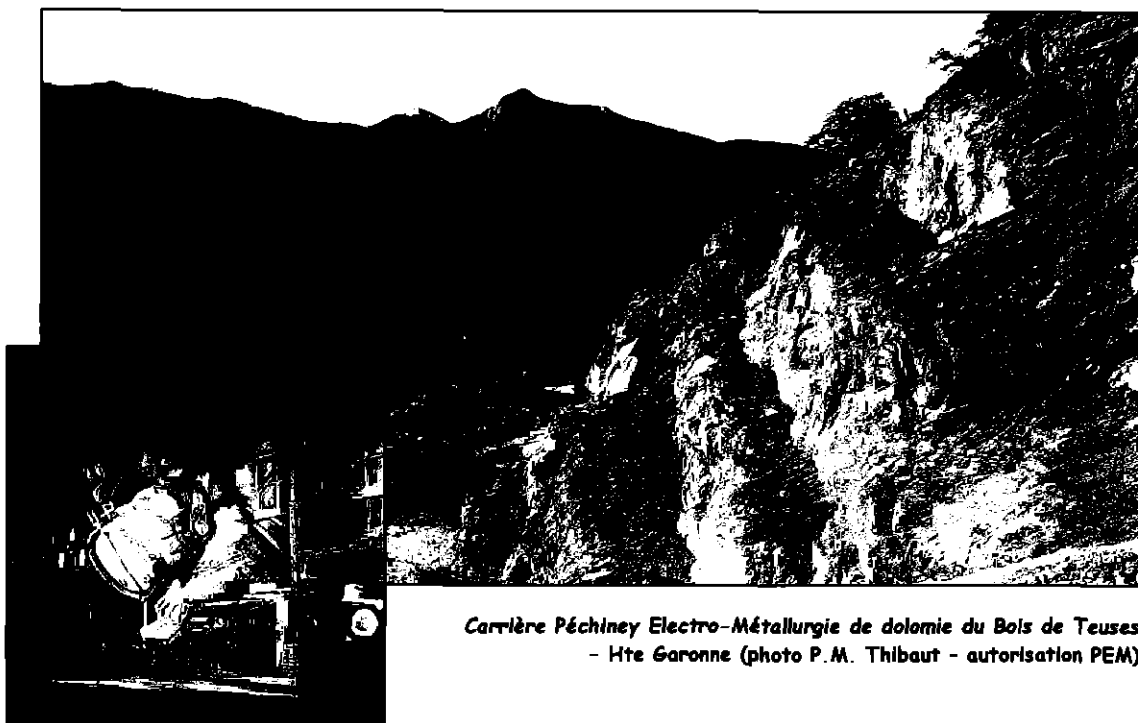




*Carrière Pechiney Electro-Métallurgie de dolomie du Bois de Teuses
- Hte Garonne (photo P.M. Thibaut - autorisation PEM)*

Usine sidérurgique illustrant l'utilisation des carbonates
en tant que fondants : site lhoist.com (Groupe Lhoist)

Mémento roches et minéraux industriels

Carbonates calciques et magnésiens et produits dérivés à usage industriel et agricole

A. Coumoul

décembre 2000
BRGM/RP-50806-FR



Mots clés : carbonates calciques et magnésiens, calcaires, dolomies, giobertite, chaux, magnésie, ressources, marché national, marché international, usages industriels et agricoles, spécifications industrielles.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Coumoul A. (2000) – Carbonates calciques et magnésiens et produits dérivés à usage industriel et agricole. BRGM/RP-50806-FR. 136 p. ; 19 tabl. ; 19 fig. ; 5 annexes.

AVANT-PROPOS

Dans le cadre de son activité de Service public, le BRGM réalise, à la demande du Ministère de l'Industrie, des synthèses documentaires actualisées concernant la plupart des substances minérales de type matériaux de carrière, sous forme de mémentos de la série « Roches et minéraux industriels ».

La rédaction de ces mémentos « Roches et minéraux industriels » vise plusieurs objectifs généraux qui sont :

- de fournir aux spécialistes des Sciences de la Terre un point des données géologiques et gîtologiques utile pour orienter la recherche appliquée
- de fournir aux décideurs des administrations, collectivités locales, aux décideurs privés et bailleurs de fonds, etc..., une information technico-économique synthétique mais exhaustive, actualisée, permettant d'éclairer leur démarche d'évaluation des argumentaires accompagnant les dossiers d'instruction en demandes d'autorisation ou d'extension des ressources concernées
- de fournir aux industriels en quête de nouveaux approvisionnements, aux exploitants, transformateurs, manufacturiers et autres utilisateurs, aux commerciaux, ainsi qu'aux chercheurs, enseignants et étudiants, un aperçu rapide et techniquement bien étayé de la problématique

Les « Carbonates calciques et magnésiens, et produits dérivés à usage industriel et agricole » ont été l'un des trois thèmes, ou substances, sélectionnés pour l'année 2000. L'activité dans ce domaine concerne, en France et dans le monde, un grand nombre d'entreprises, tant pour la valorisation que pour l'extraction. On y observe que les technologies, de pair avec la multiplicité ou l'augmentation des exigences techniques, et de pair avec les exigences économiques rendues indissociables du cadre environnemental, deviennent de plus en plus performantes au sein de marchés de plus en plus spécifiques.

Le périmètre de travail a été modelé dans l'objectif et la nécessité d'une cohérence optimale de la problématique. Ainsi, les chaux sont-elles indissociables des carbonates crus, tant il y a véritablement foisonnement à niveau des utilisations, faisant intervenir en cascade ou en croisé les natures et les états des matériaux de la famille des carbonates. Le domaine couvert par le présent mémento faisait précédemment l'objet de deux ouvrages distincts, réalisés en 1988 et 1989.

Sont donc traités dans ce mémento l'origine et le gisement, l'extraction et la production de produits bruts ou dérivés, les données économiques françaises et internationales (volontairement limitées), les utilisations industrielles et agricoles et leurs spécifications techniques, enfin les produits de substitution, des carbonates de composition et/ou de finalités suivantes :

- tous les usages industriels – agricoles - de BTP, des calcaires, dont les chaux calciques ; mais à l'exception des charges blanches qui sont l'objet d'un mémento spécial réalisé en 1996
- tous les usages industriels – agricoles - de BTP, des calcaires magnésiens et de la giobertite, dont les chaux magnésiennes et la magnésie
- les usages en BTP des chaux hydrauliques naturelles, pour l'intérêt d'une vision globale de l'emploi des chaux bien pratique

Sont exclus du périmètre de travail, les pierres à bâtir ou pierres ornementales carbonatées de toutes natures, les granulats autres que les fillers, les clinkers et ciments, et les charges blanches.

☆☆☆☆☆☆☆☆☆☆

Table des matières

AVANT-PROPOS	2
Table des matières	5
Liste des tableaux	8
Liste des figures	10
Liste des annexes	12
1- INTRODUCTION AU THEME DE L'UTILISATION INDUSTRIELLE ET AGRICOLE DES CARBONATES Ca-Mg.....	13
1.1 Approche générale de l'usage des carbonates dans l'industrie et l'agriculture	15
1.2 Glossaire	16
1.3 Périmètre de travail du mémento	19
1.4 Panorama des usages industriels et agricoles des carbonates calciques et magnésiens et de leurs produits dérivés	20
2 - DE LA MINERALOGIE A L'EVALUATION ECONOMIQUE DES GISEMENTS DE CARBONATES Ca-Mg.....	23
2.1 Minéralogie et gîtologie des carbonates.....	25
2.1.1 Liaison minéral – roche - origine	25
2.1.2 Aperçu des carbonates sédimentaires par origine.....	29
2.1.3 Cas des dolomies	31
2.1.4 Cas des giobertites (ou magnésites)	32
2.2 Approche géologique et économique de l'exploitation des carbonates sédimentaires en France	32
2.2.1 Inventaire de la ressource.....	32
2.2.2 Localisation de l'activité extractive	33
2.2.3 Sélectivité économique	34
2.3 Critères d'exploitabilité liés au matériau, à son gisement, à sa localisation.....	35
2.4 Exemples de gisements et de sites industriels en France	37

3 - DONNEES ECONOMIQUES DU MARCHE NATIONAL ET DONNEES CIBLEES DU MARCHE INTERNATIONAL	43
3.1 Précisions à apporter sur les données traitées	45
3.2 Données économiques du marché national	45
3.2.1 Production nationale	45
3.2.2 Principaux prix commerciaux	57
3.2.3 Flux commerciaux restreints et limitation des données comparées	58
3.2.4 Principaux flux commerciaux et consommations apparentes	59
3.2.5 Evolution comparée du chiffre d'affaire, des valeurs des produits et des effectifs	63
3.2.6 Producteurs sur le sol français	66
3.3 Données économiques ciblées du marché international	66
3.3.1 Production mondiale de chaux aérienne	66
3.3.2 Production mondiale de magnésite naturelle	68
3.3.3 Production mondiale de magnésie fondue	70
4 - APERÇU DES TRAITEMENTS, UTILISATIONS, ET SPECIFICATIONS INDUSTRIELLES	71
4.1 Modes de traitement	73
4.1.1 Des matériaux carbonatés bruts vers les produits crus	73
4.1.2 Des produits crus vers les produits cuits et frittés	73
4.1.3 Filière chimique et traitements spécifiques	74
4.1.4 Transport, conditionnement, manutention	75
4.2 Cas de la chaux	75
4.2.1 Préhistoire et histoire d'un matériau artificiel extraordinaire	75
4.2.2 Fabrication et classification des chaux	76
4.2.3 Mise en œuvre industrielle de la fabrication	79
4.2.4 Caractéristiques physico-chimiques et indices utilisés les plus courants ..	82
4.2.5 Transition vers les produits à calcination poussée	86
4.3 Utilisations	86
4.3.1  Sidérurgie : fabrication de fonte et d'acier	86
4.3.2  Production du magnésium métal et de composés chimiques magnésiens	89
4.3.3  Production d'autres métaux non ferreux et de métaux précieux	92
4.3.4  Industries chimiques	94
4.3.5  Fabrication du verre	96
4.3.6  Fabrication de réfractaires et d'isolants électriques	97
4.3.7  BTP – construction	99
4.3.8  BTP - utilisations routières	100
4.3.9  Agriculture (et arboriculture)	102
4.3.10  Sucreries	104
4.3.11  Autre agro-alimentaire	104
4.3.12  Traitement – épuration des eaux et des boues résiduaires	105

4.3.13		Traitement des effluents gazeux industriels	110
4.3.14		Charges pour industries fabricant papiers, peintures, plastiques, et caoutchoucs	114
4.3.15		Charges pour l'industrie pharmaceutique et les cosmétiques	115
4.3.16		Autres utilisations	115
4.4		Principales spécifications techniques dans les domaines d'utilisation	117
4.4.1		Cas de la sidérurgie (fonte, fer, acier) et de la fonderie de non ferreux ...	117
4.4.2		Cas de la métallurgie du magnésium	117
4.4.3		Cas des industries chimiques	118
4.4.4		Cas de l'industrie du verre	118
4.4.5		Cas de l'industrie des réfractaires et des isolants	119
4.4.6		Cas de l'activité BTP	120
4.4.7		Cas de l'agriculture	120
4.4.8		Cas de l'agro-alimentaire, y compris les sucreries	121
4.4.9		Cas de l'environnement – épuration	121
4.4.10		Cas des charges industrielles diverses	122
5		PRODUITS DE SUBSTITUTION	123
5.1		Cadre de la problématique	125
5.2		Aperçu des substitutions par filière industrielle ou agricole	125
		BIBLIOGRAPHIE	129
		MEMENTOS du BRGM	129
		ANNEXES 1 - 2 - 3 - 4 - 5	

Liste des tableaux

Tabl. 1 :	Catégories granulométriques en usage et exemples d'utilisations de castines et de poudres.....	17
Tabl. 2 :	Panorama des usages industriels et agricoles des carbonates calciques et magnésiens et de leurs produits dérivés	21
Tabl. 3 :	Quelques constantes physiques des principales espèces minérales considérées	26
Tabl. 4 :	Données comparées de quelques productions ou importations de substances minérales ou dérivées en France de 1994 à 1999 (<i>statistiques BRGM et Industrie Cimentière</i>)	46
Tabl. 5 a-b-c:	<i>Données relatives aux diagrammes d'évolution de quelques productions ou importations de substances minérales ou dérivées en France de 1994 à 1999</i>	47
Tabl. 6 :	Produits de carrière pour l'industrie, l'agriculture et le BTP, extraits en France de 1994 à 1999 (<i>source UNICEM</i>) .	49
Tabl. 7 :	Livraisons d'amendements calciques et magnésiens et d'amendements-engrais – en France de 1994 à 1999 (<i>source ANPEA - Célac</i>)	52
Tabl. 8 :	Production de chaux grasses et magnésiennes en France de 1994 à 1999 (<i>source Chambre Syndicale</i>)	55
Tabl. 9 :	Prix indicatifs de quelques produits carbonatés ou dérivés.....	58
Tabl. 10 :	Productions, flux et consommations apparentes de quelques substances minérales en France de 1994 à 1999.....	61
Tabl. 11 :	Production, chiffre d'affaire ou valeur, et effectifs comparés de l'UNICEM et de sa branche des calcaires et dolomies d'usage industriel et agricole.....	64
Tabl. 12 :	Production mondiale de chaux aériennes de 1994 à 1999 (<i>source USGS</i>)	67

Tabl. 13 :	Production mondiale de magnésite naturelle de 1994 à 1999 (<i>source USGS</i>)	69
Tabl. 14 :	Evolution du pH des solutions de chaux à 25°C.....	85
Tabl. 15 :	Exemple de charte d'utilisation des carbonates et des chaux dans la sidérurgie, d'après la société productrice de carbonates et de chaux Carmeuse (<i>cf site carmeuse.com</i>)	88
Tabl. 16 :	Efficacité expérimentale de diminution des teneurs de quelques métaux lourds, et normes légales.....	109
Tabl. 17 :	Zones de pH optimum pour la précipitation des divers sels de métaux lourds	109
Tabl. 18 :	Spécifications des produits carbonatés utilisés en fonderie....	117
Tabl. 19 :	Spécifications chimiques d'usage pour les amendements agricoles	121

Liste des figures

Fig. 1 :	Morphologie des grands domaines de sédimentation marine <i>(J. Delfaud, Dynamique des bassins sédimentaires)</i> 28
Fig. 2 :	Schéma interprétatif de la sédimentation du Jurassique supérieur sur la bordure languedocienne <i>(d'après P. Dubois</i> <i>et L. Yapaoudjian, in Dynamique des bassins sédimentaires)</i> 28
Fig. 3 a-b-c :	Diagrammes d'évolution de quelques productions ou importations de substances minérales ou dérivées en France de 1994 à 1999 47
Fig. 4 :	Evolution de la production de calcaire et dolomie usage industriel et agricole par filière – en France de 1994 à 1999 <i>(données UNICEM)</i> 50
Fig. 5 :	Ventilation de la production française 1999 de calcaire et dolomie à usage industriel et agricole 50
Fig. 6 :	Evolution des livraisons d'amendements en France de 1994 à 1999 <i>(source ANPEA - Célac)</i> 53
Fig. 7 :	Répartition qualitative des amendements livrés en France en 1999 <i>(source ANPEA - Célac)</i> 53
Fig. 8 :	Evolution de la production des chaux grasses et magnésiennes en France de 1994 à 1999 <i>(source Chambre Syndicale)</i> 56
Fig. 9 :	Postes d'utilisation des chaux grasses et magnésiennes en France en 1999 <i>(source Chambre Syndicale)</i> 56
Fig. 10-a :	Production, consommation et flux de calcaire et dolomie pour l'industrie et l'agriculture, en France de 1994 à 1999 62
Fig. 10-b :	Production, consommation et flux des chaux grasses et magnésiennes, en France de 1994 à 1999 62
Fig. 10-c :	Production, consommation et flux de giobertite et de magnésie, en France de 1994 à 1999 62
Fig. 10-d :	Production, consommation et flux de ciment et chaux hydraulique, en France de 1994 à 1999 62

Fig. 10-e :	Production, consommation et flux de produits réfractaires (tous confondus), en France de 1994 à 1999	62
Fig. 11-a :	Production, flux et consommation apparente à l'échelle globale UNICEM.....	65
Fig. 11-b :	Chiffre d'affaire HT et valeurs de flux et de consommation apparente à l'échelle globale UNICEM.....	65
Fig. 11-c :	Production, flux et consommation apparente de la branche des calcaires et dolomies d'usage industriel et agricole	65
Fig. 11-d :	Chiffre d'affaire HT et valeurs de flux et de consommation apparente de la branche des calcaires et dolomies d'usage industriel et agricole	65
Fig. 11-e :	Effectifs comparés de l'UNICEM et de sa branche des calcaires et dolomies d'usage industriel et agricole	65
Fig. 12 :	Répartition de la production mondiale de chaux aériennes en 1999 (source USGS)	67
Fig. 13 :	Répartition de la production mondiale de magnésite naturelle en 1999 (source USGS)	69
Fig. 14-a :	Four à chaux vertical de type basique	80
Fig. 14-b :	Double-four vertical à cycles alternés	80
Fig. 14-c :	Four rotatif	80
Fig. 15 :	Schéma général de fabrication de la chaux	83
Fig. 16 :	Exemple de courbes de réactivité des chaux vives	85
Fig. 17 :	Solubilité apparente de CaCO_3 en fonction du pH	85
Fig. 18-a :	La chaux dans les filières de préparation de l'eau	106
Fig. 18-b :	Rôles de la chaux dans une filière-type d'épuration physico-chimique industrielle.....	106
Fig. 19-a :	Rôles de la chaux dans un filière-type d'épuration physico-chimique urbaine.....	111
Fig. 19-b :	Rôles de la chaux dans une filière-type de traitement des boues résiduaires.....	111

Liste des annexes

**ANNEXE 1 A : Extraction de carbonates calciques et magnésiens en France
Carte à l'échelle 1 : 2 000 000^e**

**ANNEXE 1 B : Production de chaux aériennes en France
Carte à l'échelle 1 : 2 000 000^e**

**ANNEXE 2 : Tableau A – Exports et imports français de calcaire et
dolomie à usage industriel et agricole – période de 1994 à 1999**

**Tableau B – Exports et imports français de chaux grasses
et magnésiennes – période de 1994 à 1999**

**Tableau C – Exports et imports français de giobertite
et de magnésie – période de 1994 à 1999**

ANNEXE 3 : Liste des producteurs de carbonates crus en France

ANNEXE 4 : Liste des producteurs de chaux en France

ANNEXE 5 A : Tableau des amendements contenant du magnésium

ANNEXE 5 B : Tableau des engrais contenant du magnésium

1- INTRODUCTION AU THEME DE L'UTILISATION INDUSTRIELLE ET AGRICOLE DES CARBONATES Ca-Mg

L'introduction au présent mémento des carbonates calciques et magnésiens à usage industriel et agricole, consistera à brosser un panorama du marché des carbonates, plus économique que technique, à poser la terminologie de base, et à définir le périmètre de travail.

1.1 Approche générale de l'usage des carbonates dans l'industrie et l'agriculture

Les carbonates sont abondants à l'échelle de la plupart des pays, car ils constituent 7 % de l'écorce terrestre et 20 % des roches sédimentaires. A majorité calciques et magnésiens, ils sont faciles d'emploi parce que relativement fragiles. D'où une profusion d'utilisations sous forme crue ou cuite, mettant à profit leurs propriétés physico-chimiques, depuis l'aube des temps historiques jusqu'à notre époque moderne, où les qualités des produits sont mieux ciblées en fonction de leur finalité. Merveille technique employée depuis 10 000 ans, la chaux résulte de la cuisson du calcaire, et elle est à ce titre un des premiers matériaux industrialisés. Abondants et donc peu coûteux en règle générale, leur nouvel essor a accompagné la révolution industrielle des XVIII^e et XIX^e siècles. Le corollaire de leur prix modéré est qu'ils « voyagent » peu pour la plupart, l'adéquation à trouver entre coûts de transport prohibitifs et carences régionales en ces matériaux, étant une préoccupation constante.

En terme de masse, l'industrie extractive des carbonates (tous usages confondus) a le deuxième rang mondial avec 3 à 4 milliards de tonnes par an, derrière les sables et graviers.

En France en 1999, 13.8 Mt de calcaires et dolomies à usage industriel et agricole ont été produits, en partie pour fabriquer la chaux aérienne dont la production a atteint 3.1 Mt (hors productions intégrées confidentielles). Par comparaison, ces chiffres sont de 218.5 Mt pour les matériaux carbonatés concassés de carrière, de 16.0 Mt pour la fabrication de clinker (ciment brut), et de près de 0.2 Mt pour la chaux hydraulique naturelle.

Au plan international, la production française de chaux aérienne (bon traçage statistique) tient une place honorable dans le périmètre de la CEE. En 1999, l'Allemagne a produit 7.8 Mt, la Belgique 1.8 Mt, la Grande Bretagne 2.5 Mt, l'Italie 3.5 Mt. Le résultat est néanmoins modeste face aux gros producteurs qui sont la Chine : 22.0 Mt, les Etats-Unis : 20.5 Mt, voire le Japon : 8.2 Mt.

Mais dans les produits réfractaires à base de carbonates et produits dérivés, la France apparaît peu compétitive. Elle ne produit ni giobertite (magnésite), ni magnésie, mais seulement des dolomies frittées ; et notamment, elle ne produit pas sur son sol de magnésie fondue (Saint Gobain en produit en Grande Bretagne via TSL Group Plc).

1.2 Glossaire

Une mise au point sur la terminologie en usage paraît nécessaire avant d'aborder la suite avec la sérénité requise.



Structuration usuelle

Par la composition chimique et minérale, on distinguera dans la famille des carbonates, les calcaires, calcaires magnésiens (ou calcaires dolomitiques), dolomies, la giobertite (à la fois espèce minérale et roche), les calcaires blancs et/ou purs.

Par la forme et/ou l'état, on distinguera les castines et autres catégories granulométriques en usage (Tabl. 1), les produits crus des produits cuits ; suivant le degré de cuisson croissant, ces produits cuits sont calcinés (chaux aériennes ou hydrauliques) ou frittés.

Par la finalité, on distinguera les pierres à chaux, les charges et les fillers.



Terminologie succincte

Les pôles des carbonates calco-magnésiens sont le **calcaire**, carbonate de calcium, et la **giobertite**, carbonate de magnésium ; entre les deux se placent la **dolomie**, carbonate double de calcium et magnésium, et des carbonates intermédiaires dits calcaires magnésiens, dolomies calcareuses, etc... Les **calcaires blancs** sont des calcaires purs, à au moins 95 %, voire 98 % de CaO ; ils renferment donc un minimum d'impuretés (métaux, argile, matière organique), certaines non tolérées. Plus rares, ils trouvent leur utilisation dans le domaine des charges minérales.

Un matériau **brut** désigne la roche en place ou extraite avec une intervention mécanique minimum tel le concassage. Dès qu'un certain degré d'intervention mécanique se manifeste (concassage affiné ou broyage), le matériau devient clairement produit, dit **cru** à ce stade.

Pris fragmenté ou extrait en le fragmentant, le matériau est à l'état de particules, fragments, éléments, dont le **classement granulométrique** repose sur la taille des objets. Les classes granulométriques en usage dans les sciences de la Terre ont été établies d'après la classification de C.K. Wentworth, et correspondent aux normes de tamis AFNOR ; ces classes sont ci-dessous résumées :

taille > 256mm	enrochements, « boulders »	sous-classe des blocs
moins de 256mm	blocs	
moins de 64mm	galets, cailloux	classe des rudites
moins de 4mm	gravier	
moins de 2mm	sables	classe des arénites
moins de 63 microns	lutites	classe des lutites
moins de 4 microns	argiles	sous-classe des argiles

Césures granulométriques en mm	0 mm	0.08	1.0	6.3	20.0	31.5	80.0	125.0	>125	non limité
			2.0	5.0	8.0	30.0	40.0	100.0	140.0	
Catégories granulométriques en usage		lignes	sables							
				graviers - gravillons						
						cailloux				
						graves tout-venant				
							enrochements			
							cailloux - pierres cassées			
								blocs - enrochements		
Exemples de normes granulométriques de castines ou de poudres						castines chaux \ fours verticaux				
					castines chaux \ fours horizontaux					
			poudres-agglomérés calcaire \ hauts fourneaux dont fonte				cast.calc.\ hts fx dont fonte			
			poud.-aggl.dol. \ hts fx à fonte			cast.dol. \ hts fourneaux à fonte				
						castines calcaire \ fours-convertisseurs acier				
						castines dol.\ f.-convert.acier				
						castines dol.\ f.-convert.acier				

Tabl. 1 : Catégories granulométriques en usage et exemples d'utilisations de castines et de poudres

Les catégories granulométriques en usage chez les producteurs et industriels, n'ont pratiquement aucun rapport avec la classification scientifique citée (Tabl. 1). Dans la partie haute du tableau réservée aux producteurs de carbonates naturels, les catégories granulométriques figurées sont principalement en usage à l'UNICEM ; les autres viennent plus spécialement des carriers. On observe quelques chevauchements et des groupements de convenance : sables et graviers sont en notable chevauchement, tandis que les appellations cailloux ou cailloux - pierres cassées sont discordantes. Dans la partie basse du tableau réservée à la filière aval, les **poudres** sont assez bien identifiées (grains de moins de 5 mm, voire 6.3 mm), tandis que les **castines** des chauxfourniers et des métallurgistes (de 6.3 mm à 140.0 mm), empiètent sur toutes les différenciations faites par les carriers (graviers, cailloux, blocs...). Précisons que certaines limites traditionnelles ont été révisées, à l'exemple d'un 6.3 mm adopté par l'UNICEM, avec une incidence sur la comparaison des données statistiques d'avant et d'après (mais volontairement ignorée car accessoire).

La cuisson contrôlée des produits crus débouche sur trois catégories de produits cuits :

- la **calcination** (intervalle de températures 800°-1250°), donne les **chaux**
- le **frittage** (intervalle de températures 1300°-2000°) donne les produits frittés (ou « calcinés à mort »)
- la **fusion** (températures >2000°) donne les produits fondus ; et comme elle se pratique dans des fours à arc électriques, on parle d'**électrofusion**

Les chaux sont divisées en deux grands groupes, suivant leur façon de faire prise :

- les **chaux aériennes**, qui se carbonatent à sec par réaction avec le gaz carbonique de l'air
- les **chaux hydrauliques**, qui ont comme le ciment une capacité à durcir après mouillage

Les **pierres à chaux** désignent bien évidemment tous les fragments de carbonate mis à la taille souhaitée (uniformément désignés castines), pour être enfournés et devenir chaux.

Les **charges** sont les produits crus ou cuits, réduits en fines poudres (au moins < 80 microns), qui entrent dans la composition de produits élaborés. Leur emploi est courant et bien connu en fabrication de papiers, peintures ou plastiques. Elles sont subdivisées de trois façons différentes, sans prise en compte du critère quantitatif, alors qu'elles peuvent figurer en tant que constituant principal, secondaire ou accessoire.

Les charges minérales sont divisées suivant leur finalité en charges inertes ou charges fonctionnelles. Leur intérêt respectif d'utilisation est :

- pour les **charges inertes**, d'économiser sur les coûts en substituant partiellement aux substances principales des substances neutres moins chères, sans diminuer les qualités d'ensemble en deçà des normes fixées
- pour les **charges fonctionnelles**, de bonifier des qualités existantes rhéologiques et autres (viscosité et onctuosité, masse, couleur, résistance mécanique, etc...), ou d'apporter des qualités particulières (rôle de fondant, isolation thermique, ou électrique, etc...) ; en tel cas, on peut obtenir en même temps une qualité améliorée et un coût diminué

Les charges minérales sont aussi divisées suivant leur qualité. La littérature française distingue les **charges blanches** (dont fait partie le carbonate de calcium précipité, ou **CCP**), qui désignent les produits calcaires et dolomitiques les plus purs réservés à certains créneaux « haut de gamme » (alimentation, pharmacie, peintures de qualité, etc...), tandis que les charges communes occupent le reste du créneau. Enfin, la littérature anglo-saxonne fait état de **PCC** (pour Precipitated Calcium Carbonate), et de **GCC** (Ground Calcium Carbonate), lequel englobe toutes les autres charges à base de carbonates naturels plus ou moins purs.

Les **fillers** sont, au sens restreint français, les produits crus ou cuits, réduits en général en fines poudres (< 80 microns), qui sont mélangés à d'autres constituants, tels les enrobés routiers bitumineux ou les enduits de revêtement étanches. Leur rôle est, tout en ayant un comportement chimiquement neutre :

- de réduire les vides intergranulaires et tous les vides, avec effet d'augmenter la cohésion
- d'améliorer le comportement mécanique dû aux frottements entre les éléments,
- d'économiser par rapport à l'emploi de constituants plus chers

1.3 Périmètre de travail du mémento

Le périmètre de travail du mémento peut enfin être précisé, car il y a véritablement un foisonnement à niveau des utilisations, faisant intervenir en cascade, voire simultanément, les natures et les états des matériaux de la famille des carbonates Ca-Mg.

Sont donc traités dans ce mémento :

- tous les usages industriels – agricoles - de BTP, des calcaires, dont les chaux aériennes calciques sont dérivées ; mais à l'exception des charges blanches (dont fait partie le carbonate de calcium précipité : CCP, artificiellement produit)
- tous les usages industriels – agricoles - de BTP, des calcaires magnésiens, dolomies, et de la giobertite / magnésite, dont les chaux aériennes magnésiennes et la magnésie sont dérivées
- tous les usages de BTP des chaux hydrauliques naturelles, pour l'intérêt d'une vision globale de l'emploi des chaux bien pratique
- sont exclus du périmètre de travail, les pierres dimensionnelles (pierres à bâtir) et les pierres ornementales, naturelles ou reconstituées, les granulats autres que les fillers, les clinkers et ciments, et les charges blanches (rappel)

1.4 Panorama des usages industriels et agricoles des carbonates calciques et magnésiens et de leurs produits dérivés

La nécessité d'une représentation synoptique du domaine d'application et de la multiplicité d'usages des carbonates calciques et magnésiens, qu'on peut qualifier d'« usine à gaz », a abouti à la sorte d'organigramme présenté dans le tableau 2.

Dans ce tableau, figurent notamment dans les lignes de tête (axe répété des X), l'état, les finalités ou fonctions principales : fondant, filler, liant, etc..., et les trois secteurs d'activités qui sont l'Industriel, l'Agricole (groupés par simplification), et le BTP. A gauche, sont mentionnées les roches naturelles utiles (axe des Y). Le croisement de ces identificateurs délimite des champs d'applications dans lesquels sont listées les utilisations, qui sont abordées en détail dans le chapitre 4.

Bruts	PRODUITS CARBONATES NATURELS BRUTS												
Forme des crus	pierres à bâtir	granulats	poudrés		castines	pierres à chaux						poudres	
Argile												présente ou ajoutée	
Calcination						magnésie - chaux magnésienne chaux dolomitique (vives ou éteintes)		chaux aérienne calcique (vive ou éteinte)				NHL : chaux hydraulique naturelle	clinker et ciment
Finalités	pierres dimensionnelles	granulats	composant - filler	adjuvant - charge - fondant - filler	fondant - adjuvant - composant	composant - adjuvant - fondant	liant à sec	fondant - adjuvant - composant	molécules industrielles	CCP = carbonate de calcium précipité	liant à sec	liant hydraulique	
Secteurs d'activités	BTP		Industriel - Agricole				BTP		Industriel - Agricole			BTP	
Roches d'origine													
craye													
marbre													
calcaire													
dolomie													
giobertite													
NB	hors périmètre d'étude												
	charges blanches non traitées												

Tableau 2 : Panorama des usages industriels et agricoles des carbonates calciques et magnésiens et de leurs produits dérivés

2 - DE LA MINERALOGIE A L'EVALUATION ECONOMIQUE DES GISEMENTS DE CARBONATES Ca-Mg

2.1 Minéralogie et gîtologie des carbonates

2.1.1 Liaison minéral – roche - origine

Les minéraux carbonatés entrant dans la composition des roches carbonatées, cristallisent presque tous dans le système rhomboédrique, associant l'anion CO_3 (deux charges négatives) à des cations de métaux (charges positives). En rapport avec l'objectif du mémento, sont considérés plus précisément les minéraux les plus communs des carbonates anhydres à métaux bivalents ($++$). Ils correspondent à des minéraux à cations soit monométalliques, soit polymétalliques ; dans ce dernier cas, leur composition peut être variable, résultant de nombreuses substitutions dans le réseau cristallin, où Ca est facilement remplacé par Mg, Fe, ou encore Mn, voire Sr et Ba. Notons au passage que le calcium et le magnésium ont été isolés par H. Davy en 1808, et le manganèse par C.W. Scheele et T. Bergman en 1774.

La première catégorie est composée des éléments suivants :

- calcium (Ca), clarke 4.1 %, espèce minérale = calcite, de formule chimique Ca CO_3 ; l'aragonite se distingue par sa cristallisation dans le système orthorhombique
- magnésium (Mg), clarke 2.3 % ; espèce minérale = giobertite /ou magnésite, de formule chimique Mg CO_3 ;
- fer (Fe), clarke 5.6 % ; espèce minérale = sidérite /ou sidérose, de formule chimique Fe CO_3

La deuxième catégorie correspond aux associations :

- Ca-Mg ; espèce minérale = dolomite, de formule chimique $\text{CaMg (CO}_3)_2$, qu'on trouve fréquemment impure
- Ca-Fe-Mg-(Mn) (clarke du manganèse 0.001 %), de formule chimique générique de la série = $\text{Ca, (Mg, Fe, Mn) (CO}_3)_2$; en fait, ces carbonates forment une série continue entre les pôles $\text{CaMg (CO}_3)_2$ et $\text{CaFe (CO}_3)_2$, où les ions Fe^{++} et Mg^{++} se remplacent en toutes proportions, en admettant qu'il s'agit d'une dolomite plus ou moins ferrière quand le ratio $\text{Fe}^{++}/\text{Mg} < 1/4$, et d'une ankérite quand le ratio $\text{Fe}^{++}/\text{Mg} > 1/4$
- Mg-Fe ; espèce minérale = breunnérite, qui correspond aux termes intermédiaires de la série continue existant entre la giobertite Mg CO_3 et la sidérite Fe CO_3

NB : Le clarke est une teneur qui résulte des études de Clarke et Washington sur l'abondance et la distribution des éléments dans la lithosphère. C'est la teneur moyenne d'un élément donné dans la lithosphère solide (jusqu'à 16 km de profondeur).

Parmi les principales caractéristiques de ces carbonates, on note (Tabl. 3 ci-dessous) :

- un comportement chimique alcalin (basique), apte à neutraliser les acides
- une faible solubilité dans les solvants communs, notamment l'eau
- une dureté faible, d'indice 3.0 à 4.5 sur l'échelle de Mohs ; la calcite, très commune, a un indice 3.0

- une densité moyenne (ou masse volumique) de 2.7 pour la calcite ou le calcaire pur, et de 2.9 pour l'aragonite et la dolomite, de 2.75 à 2.95 pour les dolomies, de 3.0 pour la magnésite et l'ankérite, de 3.9 pour la sidérite, et d'environ 3.3 pour la breunnérite

nom du minéral	formule chimique	masse moléculaire relative	système cristallin	indices de réfraction	masse volumique	températures			dureté	solubilité
						de transition	de décomposition	de fusion du corps pur		
		g		NB 1	g	°C	°C	°C	échelle de Mohs	NB 2
ankérites	Ca (Fe/Mg >1/4, Mn) (CO ₃) ₂	variable	rhomboédrique		environ 3					acides
aragonite	Ca CO ₃	100.09	orthorhombique	1.530-1.682-1.686	2.93-2.95	vers calcite : 520	825	infusible	3.5-4.0	acides
calcite	Ca CO ₃	100.09	rhomboédrique	1.6584-1.4864	2.71-2.72		898-940	1339	3.0	acides
dolomite	Ca,Mg (CO ₃) ₂	92	rhomboédrique	1.6799-1.5013	2.9		MgO : 800 et CaO : 898-900		3.5-4.0	acides
dolomites ferrifères	Ca (Fe/Mg <1/4, Mn) (CO ₃) ₂	variable	rhomboédrique		environ 3					acides
giobertite	Mg CO ₃	84.32	rhomboédrique	1.700-1.509	2.958		MgO : 800 et CO ₂ : 900	infusible	4.0-4.5	acides
sidérite	Fe CO ₃	115.85	rhomboédrique	1.873-1.633	3.89		décomposition vers 225°	infusible	4.0-4.5	acides
NB 1 : indice de réfraction pour la raie D du sodium à 298° K (589.2 nm) ; en ordre croissant pour les cristaux polyaxes										
NB 2 : solubilité exprimée dans les solvants usuels										

Tableau 3 : Quelques constantes physiques des principales espèces minérales considérées

Les roches constituées de ces minéraux sont mono ou polyminérales, appelées carbonates à partir d'une composition de plus de 50 % de minéraux carbonatés. Les cristaux sont automorphes (forme propre déterminée par le système cristallin du minéral), ou xénomorphes (forme déterminée par des contraintes diverses) ; leur taille est variable, microscopique (comptage en microns) à géante (jusqu'à plusieurs mètres) pour les extrêmes, mais le plus souvent la plage de cristallinité est de quelques dizaines de microns à quelques millimètres.

Les noms des roches correspondantes sont : calcaire, giobertite / magnésite, sidérite / sidérose, dolomie, ankérite, breunnérite. Les roches mixtes à calcite et dolomite ont des classifications particulières ; la classification française est la suivante :

	% calcite	% dolomite
calcaire	> 95	< 5
calcaire magnésien	90-95	5-10
calcaire dolomitique	50-90	10-50
dolomie calcaire	10-50	50-90
dolomie	< 10	> 90

Les paragenèses pluri-minérales et les substitutions fréquentes entre cations dans le réseau cristallin d'un minéral, donnent encore lieu à l'emploi de termes intermédiaires comme dolomie ankéritique, etc. . .

Leur origine est soit supracrustale, ils sont présents sur tous les continents et largement exposés du fait de leur fabrication essentiellement marine, soit profonde, gîtes de substitution et gangues filoniennes, d'importance économique moindre.

Les carbonates des bassins sédimentaires sont associés spatialement aux domaines continental et de plate-forme continentale (Fig. 1), c'est à dire lacustre à marin franc, en raison de leur fabrication sous tranche d'eau modérée. Si la bathymétrie optimale est de quelques mètres à 100 m, la limite inférieure de fabrication des carbonates est 200-250 m. Bien que leur domaine de prédilection soit le domaine de plate-forme, on notera l'importance relative prise par la sédimentation continentale lacustre à certaines époques géologiques, où les conditions ont pu être spécialement favorables (grandes et molles dépressions, chimisme de l'atmosphère, climat chaud).

Ils se forment par précipitation directe, en milieu calme ou agité (oolithes), ou sont fabriqués par des organismes vivants (tests internes ou externes, pellets). Ils sont construits (calcaires précipités, calcaires oolithiques, récifs fossiles...), ou remaniés (calcaires biodétritiques, à intraclastes, à gravelles, à galets...); nombre de faciès intermédiaires existent et/ou les faciès peuvent être intimement juxtaposés. Enfin, ils nous sont parvenus en état meuble (sables organiques...), ou consolidé par diagenèse (principalement compaction, expulsion d'eau, consolidation par « cimentation »). Les espèces cristallisées communes sont la calcite et l'aragonite ; cette dernière est la forme originale fréquente de Ca CO_3 (cristallisation orthorhombique), mais qui, très instable à température plus élevée, se transforme en calcite. Les autres espèces cristallisées connues sont la dolomite (dolomie primaire) et rarement la giobertite, formées en milieu évaporitique.

Les carbonates non sédimentaires sont trouvés en association avec :

- les carbonatites, qui sont des corps intrusifs (généralement d'origine grenue : syénite à gabbro) à calcite - dolomite, ou à calcite, résultant de la cristallisation de magmas enrichis en Ca sous l'action de CO_2 d'origine sub-crustale (tout le calcium passe sous forme carbonatée) ; mais il peut s'agir parfois d'assimilation de calcaires préexistants
- les gangues filoniennes, montrant principalement calcite, dolomite, ankérite, sidérite, dans des paragenèses généralement de basse à moyenne température, parfois de haute température ; dans les gangues réunissant ces carbonates, l'ordre de cristallisation est sidérite, ankérite, dolomite ferrière, dolomite, calcite

L'observation des matériaux carbonatés actuellement exposés, doit tenir compte de leur histoire, et donc de leur évolution dans la croûte terrestre (enfouissement(s) et (re)montée, exposition aux contraintes tectoniques), qui va souvent donner lieu à des modifications physico-chimiques et structurales résultant du bilan des contraintes thermodynamiques auxquelles la roche a été soumise. Le domaine global du métamorphisme délimité par ses facteurs température et pression, commence vers 100°-200° et 1 kilobar, et se termine vers 600°-700° et plus de 3-4 kilobars, à la limite de la fusion anatexique.

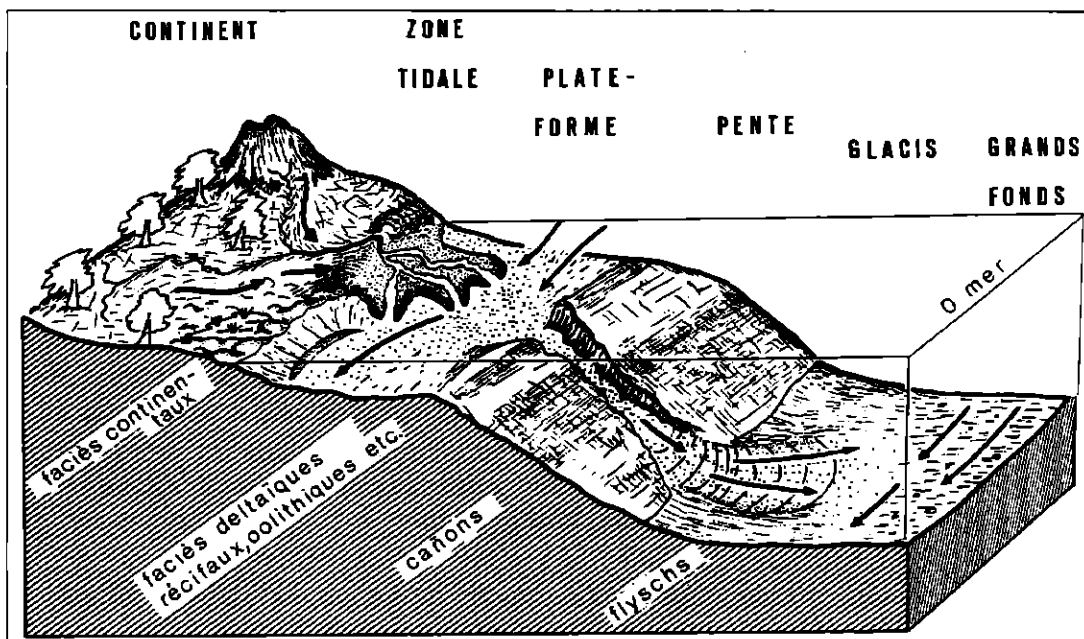


Figure 1 : Morphologie des grands domaines de sédimentation marine (J. Delfaud, Dynamique des bassins sédimentaires)

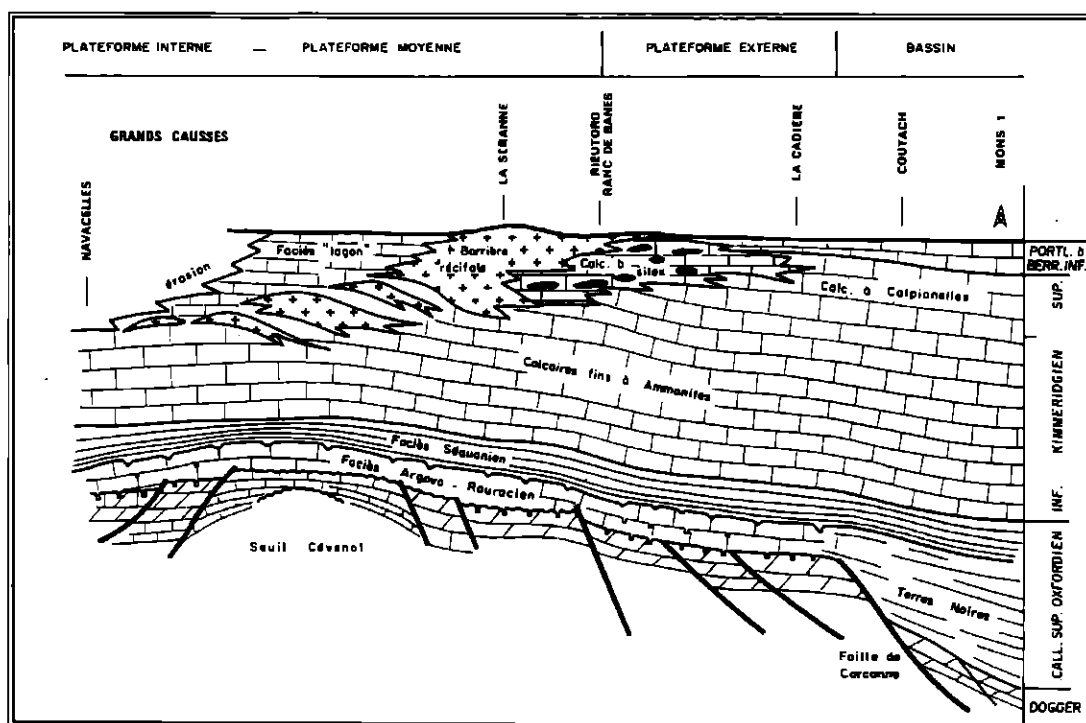


Figure 2 : Schéma interprétatif de la sédimentation du Jurassique supérieur sur la bordure languedocienne (d 'après P.Dubois et L.Yapaudjian, in Dynamique des bassins sédimentaires)

Les modifications physico-chimiques sont notamment obtenues grâce au moteur thermodynamique résultant de l'enfouissement (quelle que soit l'origine), dont on peut schématiquement sérier les effets en deux catégories...

- à moins de 200-300°, c'est à dire moins de 8 000 m de profondeur environ (4 000m si le gradient géothermique est fort), la roche est en principe peu transformée, bien que la diagenèse –processus fondamental de lithification- appartienne à cette catégorie ; ce dispositif peut être bouleversé dans le cas d'intrusion d'un corps magmatique (métamorphisme de contact) et/ou de circulations hydrothermales, dont la formation des dolomies secondaires ou de marbres aux dépens des masses calcaires de l'auréole sont des exemples
- à plus de 200-300°, c'est à dire plus de 8 000 m de profondeur environ (ou 4 000 m, cf alinéa précédent), la roche est intimement transformée dans le contexte de ce qui est appelé métamorphisme régional, et d'autant plus que les conditions de température et de pression sont plus extrêmes ; la calcite des calcaires ou la dolomite des dolomies sont recristallisées, la roche devenant marbre, ce qui se traduit généralement par une « épuration » du sédiment d'origine, ou à la concentration d'éléments indésirables dans les minéraux néoformés (plus faciles à éliminer) ; par apport d'éléments extérieurs véhiculés dans les solutions hydrothermales, peuvent cristalliser d'autres espèces : sidérite, ankérite, dolomites enrichies en éléments divers...

2.1.2 Aperçu des carbonates sédimentaires par origine

Les origines des carbonates sédimentaires peuvent être d'ordre organique ou biochimique et physico-chimique ou détritique.

Les calcaires organiques sont constitués des tests (aragonite - calcite) d'organismes vivants marins ou lacustres, tels les polypiers, rudistes, crinoïdes, lamellibranches, gastéropodes, brachiopodes, bryozoaires, foraminifères, algues unicellulaires, etc... . On distingue les calcaires « construits » (à stromatolites, les récifs coralliaires, les encroûtements des algues Corallinacées...), à structure massive (bioherm) ou litée (biostrome), des calcaires d'accumulation de tests entiers (lumachelles) et/ou fragmentés, soumis à la dynamique sédimentaire marine, fluvio-marine ou lacustre.

La craie résulte de l'accumulation phénoménale en mer ouverte et peu profonde (domaine néritique) de tests calcaires de végétaux unicellulaires marins, les Coccolithophoridae (les coccolithes ont une taille de quelques microns à 20 microns), auxquels s'ajoutent des foraminifères et ostracodes planctoniques, des spicules de spongiaires, et des débris d'organismes divers tels les bryozoaires, mollusques, échinides, etc... ; la craie peut aussi renfermer des éléments détritiques et de la glauconie.

Le maërl résulte de l'accumulation littorale des squelettes calcaires d'une algue coralliaire, *Lithothamnium calcareum*.

Ouvrons une parenthèse pour remarquer que les faunes et flores fossiles représentées dans le sédiment, vont dépendre de l'interférence entre son âge (pour la situation française, c'est

en gros du Cambrien au Miocène) et l'Evolution. Ainsi, les récifs du Primaire montrent Tétracoralliaires, Tabulés, Stromatolites, tandis que ceux du Secondaire au Tertiaire montrent Hexacoralliaires, Alcyonaires ; les algues Corallinacées apparaissent au Crétacé, les Crinoïdes disparaissent à la fin du Secondaire, etc... .

Les calcaires biochimiques et physico-chimiques se sont formés par précipitation du carbonate de calcium en solution dans l'eau de mer ou en eaux saumâtres à douces. Le meilleur exemple correspond aux oolithes (ou pisolithes si le diamètre > 0.2 mm), qui sont un indice de haute dynamique marine dite « de barrière » ; leur structure sphérique est due à l'accumulation en pelures d'oignon d'enveloppes calcaires, qui sont souvent développées autour d'un nucleus. La précipitation directe de calcite ou de dolomite en milieu supratidal - évaporitique, n'est pas rare, mais ses produits sont dépourvus des qualités habituellement recherchées.

Nous avons regroupé un certain nombre de cas de précipitation de Ca CO_3 en milieu continental d'importance économique faible ou négligeable. La précipitation est possible :

- à partir d'eaux thermales ; sédimentent les tufs et travertins (calcite), les dépôts d'aragonite (catalyseur = NaCl)
- par dissolution – recristallisation dans les cavités : stalacmites, stalactites...(calcite, parfois aragonite) ou dans le cas des paragenèses d'altération supergène (aragonite)
- par altération des laves (aragonite fibreuse)

Les calcaires détritiques résultent de l'accumulation d'éléments biodétritiques (tests cassés) et lithiques dans les différents types d'environnement dynamique cités (cf paragraphe des calcaires organiques). Parmi les éléments lithiques, se distinguent :

- les éléments remaniés pénécontemporains ou fraîchement déposés du proche environnement sédimentaire du carbonate détritique en question, c'est à dire les intraclastes (autobréchifications) et les extraclastes (sédiments remaniés allochtones à l'échelle considérée)
- les éléments terrigènes (origine par érosion continentale), tels les quartz et feldspaths détritiques, les roches métamorphiques, les minéraux lourds (densité > densité du quartz)

D'autres phases minérales sont fréquemment mélangées aux calcaires, qui dépassent rarement 95 % de Ca CO_3 , et aux dolomies, pour constituer des calcaires dits composites ou d'origine complexe à partir d'une certaine abondance. Ces phases minérales associées aux carbonates sont :

- les argiles, soit intimement mêlées à la texture, soit concentrées (joints, ou diasthèmes) ; la glauconie, de formule complexe (silicate de fer apparenté aux argiles), est l'indicateur d'une bathymétrie élevée supérieure à 200 mètres
- la matière organique, également diffuse ou concentrée
- la silice (origine organique et/ou terrigène), pro-parte diagénétique dans l'exemple des cherts et des silex
- des sulfures et/ou leurs oxydes (formés in situ et non détritiques, cf minéraux lourds)

Entrent dans cette catégorie des calcaires composites, les variétés de craies marneuses ou glauconieuses, les calcaires marneux, phosphatés, sapropéliens (riches en matière

organique), ampéliteux (riches en matière charbonneuse), bitumineux (riches en pyrobitume).

L'eau, enfin, est présente en quantité qui est fonction des vides laissés (microtextures déterminant la porosité résiduelle).

Les classifications utilisées habituellement seront seulement évoquées : ce sont celles de Folk (1959) et de Dunham (1961). La classification de Folk prend en compte la nature du ciment (orthochèmes /ou orthochems : micrite, sparite, rudite) et des éléments (allochèmes/ou allochems : intraclastes, bioclastes, pellets, oolithes...), et leur proportion relative, exemples : biosparite, pelmicrite, micrite à pellets. Celle de Dunham insiste sur la texture ou liaison des constituants entre eux, exemples : boundstone récifal (roche construite), grainstone oolithique (absence de boue micritique), wackestone à bioclasts (présence de boue mais inférieure à 10 %), mudstone (plus de 10 % de boue), etc... .

La reconnaissance rapide des phases minérales d'une roche carbonatée (partiellement réalisable in situ) s'appuie sur les tests aux acides et aux colorations sélectives. Par exemple, l'aragonite et la calcite sont les seuls minéraux à réagir à une solution d'acide chlorhydrique dilué à 10 % dans l'eau, et la présence de minéraux carbonatés est révélée par réaction à une solution du même acide dilué à 50 %. Les colorations sélectives entre principaux minéraux carbonatés se font à froid ou à chaud, à l'exemple de la solution d'alizarine rouge S qui permet d'identifier à froid la calcite de la dolomite (voir D. Soubias en bibliographie).

En conclusion, on soulignera la variabilité de constitution des calcaires marins et lacustres dans l'espace (illustration Fig. 2) et dans le temps, qui tient aux constatations suivantes :

- le milieu dans lequel ils sont formés est vivant (marées, courants, creux et bosses) et va mouler des corps sédimentaires de tailles variables aux limites plus ou moins nettes (problème d'échelle)
- le milieu est variant pour un point donné dans l'espace sédimentologique (transgression – régression marine) et dans le temps (mouvements épirogéniques – érosion, climat, composition de l'atmosphère terrestre)
- la diagenèse, qui est le processus précoce de passage du sédiment à la roche consolidée (lithification), est aussi variable ; elle touche fondamentalement à la liaison entre constituants compactés, directe ou par « ciment » (boue micritique par exemple), aux éventuelles recristallisations et néocristallisations, enfin à la porosité résiduelle
- l'épigenèse, qui correspond à l'enregistrement global de tous les événements subis, après la diagenèse jusqu'à la situation actuelle, est encore facteur de variabilité

2.1.3 Cas des dolomies

Les dolomies, de formule de base $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ont donc deux origines possibles :

- la précipitation directe de dolomite en milieu évaporitique, donnant une roche dite dolomie primaire, dont le gisement est globalement peu abondant avec des lits très peu épais ; de plus, la dolomie primaire contient des impuretés, et son dépôt est généralement en trop étroite association avec évaporites et argiles

- l'épigénisation de masses calcaires, soit (péné-)contemporaine de la diagenèse (aux stades précoce à tardif) dans des conditions marines chaudes avec substitution de Ca^{++} par Mg^{++} disponible dans l'eau de mer, soit après la diagenèse, par action de fluides hydrothermaux qui donnent une dolomitisation irrégulière et discontinue ; dans le deuxième mode épigénétique, les volumes affectés sont plus importants, mais la transformation est souvent plus ou moins complète (faciès de dolomies calcaireuses à calcaires dolomitiques)

2.1.4 Cas des giobertites (ou magnésites)

Les giobertites (Mg CO_3) ont trois origines possibles :

- l'action hydrothermale de solutions bicarbonatées magnésiennes sur des roches dolomitiques, où les cations Mg^{++} vont se substituer en totalité aux cations Ca^{++} pour former des masses cristallines, dans lesquelles le cation Fe^{++} est aussi présent et bien représenté ; à plus petite échelle (c'est à dire sur des volumes plus importants), le remplacement au sein des dolomies est lenticulaire et incomplet
- l'altération par des eaux riches en CO_2 de silicates magnésiens (olivine de roches ultrabasiques : péridotites et serpentines), qui produit une giobertite amorphe à faible teneur en Fe^{++} , en association avec du talc
- la précipitation de sels magnésiens saturés en milieu évaporitique, qui résulterait en fait d'une réaction de double décomposition entre du sulfate de magnésium et du carbonate de sodium ; nous avons vu que ce mode de gisement est rare

La présence de magnésite dans des encroûtements d'altération météorique chapeautant des diapirs de sels relèverait du dernier cas de figure, favorisé par la concentration minérale lors de la surrection. Un tel « caprock » est exploité à Whitney Dome (Louisiane, Etats-Unis).

2.2 Approche géologique et économique de l'exploitation des carbonates sédimentaires en France

2.2.1 Inventaire de la ressource

Les carbonates sédimentaires affleurants ou sub-affleurants sont abondants en France, soit dans les « bassins » actuels, peu ou pas plissés : Bassin de Paris, Bassin aquitain, couloir rhodanien, Bassin du sud-est, soit dans les massifs orogéniques jeunes (alpins) : Alpes, Jura, Pyrénées. Les zones de quasi-exclusion sont les massifs orogéniques anciens : Massif armoricain, Massif central, Vosges, Corse.

Leur âge couvre un très large éventail de l'échelle de temps géologique représentée, soit des plus anciens aux plus récents :

- les carbonates d'âge paléozoïque (Cambrien à Silurien : - 540 à - 408 MA) sont très peu abondants et principalement localisés dans les Pyrénées, en Montagne noire et dans le Massif armoricain ; les carbonates d'âge Cambrien inférieur (- 540 à -520 MA environ) des deux premiers massifs cités sont localement recuits en marbres
- les carbonates d'âge Dévonien supérieur et Carbonifère inférieur (- 375 à - 325 MA) ont une grande extension dans certaines régions (Pyrénées, Ardennes), où ils sont souvent métamorphisés ; leur milieu de dépôt habituel correspond au type récifal et périrécifal
- les carbonates d'âge Carbonifère supérieur à Trias moyen (- 325 à - 230 MA) sont assez rares
- les carbonates d'âge mésozoïque (surtout depuis le Jurassique : -203 MA) et cénozoïque, sous forme de puissantes assises marines en général, sont les plus abondants ; exposés dans tous les grands bassins et dans les chaînes de montagne « alpines » cités en début, ils représentent l'essentiel du potentiel économique national (calcaires jurassiques, éocènes et miocènes, calcaires et craies d'âge crétacé)

La craie est associée au Crétacé supérieur (elle a donné son nom à tout le système sédimentaire), du Cénomanien au Campanien (-96 à -72 MA). Si elle est largement représentée dans toute l'auréole du bassin de Paris, les faciès les plus purs sont plutôt associés aux biozones correspondant au Coniacien.

Les occurrences dolomitiques les plus notables sont trouvées dans :

- le Cambrien (Massif armoricain, Montagne noire, Pyrénées)
- le Carbonifère (Boulonnais, Pyrénées)
- le Jurassique (Causses, Bassin aquitain, Provence)
- le Crétacé (Pyrénées)
- l'Eocène plus accessoirement (Bassin de Paris, Bassin aquitain)

Les occurrences de magnésite sont rares et en général nettement infra-économiques. Les principales sont pyrénéennes (localisation annexe 1A) : Montner (66) est le seul gîte d'importance notable (700 000t de réserves), mais non exploité, et on peut encore citer l'indice de Saint Jean - Pied de Port (64). D'autres occurrences sont connues au Pays basque, en Corse, et dans le Massif armoricain.

2.2.2 Localisation de l'activité extractive



Carte - Annexe 1A. Localisation de l'extraction de carbonates calciques et magnésiens en France à l'échelle du 1 : 2 000 000

Faute des moyens de réaliser un inventaire des carrières d'extraction de carbonates en activité, les données de la Banque du Sous-Sol ont été utilisées. La BSS renferme environ 3 900 sites répertoriés d'extraction de carbonates, sans distinction d'usage ou d'état (sites anciens et actuels), qui fournissent une image significative de la répartition de cette activité. Notons toutefois des dérives dues à une certaine sous-information (exemple de la région Rhône-Alpes), ou à une exagération en raison de l'absence de critère de taille (exemple du Massif armoricain).

On remarque à cette échelle des localisations privilégiées :

- dans les calcaires jurassiques, ce sont le Bassin de Paris (surtout les secteurs de Lorraine et du Morvan), le Jura, la bordure sud-Massif central (Périgord - Quercy et Grands Causses)
- dans les calcaires crétacés, ce sont l'extrémité sud du sillon rhodanien (Bas Languedoc et Alpilles) et la zone nord-pyrénéenne
- dans les secteurs mixtes à Jurassique et Crétacé très imbriqués, ce sont la Basse Provence (région d'Aix en Provence - Marseille), la région niçoise, et la zone nord-pyrénéenne dans une certaine mesure
- dans les calcaires du Tertiaire, ce sont la région nord-orléanaise, la Picardie (Lutétien), le Bassin aquitain, et la région du Bas Languedoc dans une certaine mesure
- pour les craies, une extraction quasi-exclusive dans les parties nord et centre-est du bassin de Paris, en correspondance avec les départements Eure, Seine Maritime, Somme, Pas-de-Calais, Oise, Aisne, Marne et Aube
- pour les dolomies, une concentration extrême-méridionale, avec la haute vallée de l'Aude pyrénéenne (Jurassique sup. à Crétacé inf.), toute la partie orientale de la Montagne noire (Cambrien des versants nord et sud), le massif de l'Etoile surplombant l'Estaque, près de Marseille (Jurassique supérieur), et le massif du nord d'Antibes à Tourette sur Loup (Jurassique moyen et supérieur)
- pour les marbres, une concentration dans la zone nord-pyrénéenne et sur la bordure sud-Montagne noire

2.2.3 Sélectivité économique

Les calcaires, craies et dolomies « communs » au plan économique sont donc abondants en général, plus particulièrement exploités dans le nord et l'est du bassin de Paris, dans le sud et sud-est du pays (couloir rhodanien, sud-Massif central, Bassin du sud-est et Alpes). Dans les zones de quasi-absence des socles hercyniens, sont plus sollicités les ressources de proximité dites « locales » (exemple du maërl de Bretagne), le transport, et les matériaux de substitution.

Cependant, la contrainte économique latente qui voudrait qu'on puisse trouver, par exemple, des carbonates de qualité requise à proximité de chaque grande zone de peuplement industriel et urbain (ZPIU), ne peut toujours être satisfaite. C'est le cas du Bassin parisien à proximité de la capitale, où la plupart des calcaires sont d'âge tertiaire et de faciès lacustre hétérogène et insuffisamment pur, tandis que les strates plus appropriées du Portlandien inférieur sont d'épaisseur insuffisante.

Les carbonates moins communs, d'utilisation principale en charge minérale, sont encore bien représentés. Sont ainsi réputés :

- les calcaires marmoréens nord-pyrénéens d'âge Jurassique terminal
- les calcaires à faciès urgonien (récifal à sub-récifal renfermant rudistes et madréporaires) présents de la Provence au Jura, d'âge Barrémien du Crétacé inférieur
- les craies d'âge Coniacien du Crétacé supérieur du Bassin de Paris

Mais les carbonates particuliers, tels les marbres très purs pour charges blanches de haute qualité (hors périmètre de travail), sont rares et insuffisants, tandis qu'il n'y a pas actuellement en France de production de magnésite.

2.3 Critères d'exploitabilité liés au matériau, à son gisement, à sa localisation

Un gisement exploité ou un projet d'exploitation, présente/doit présenter un bilan de caractéristiques dit « économique », car de revenu final supérieur à la somme investissement nécessaire + coûts de production et charges annexes. Ces caractéristiques ou critères d'exploitabilité, sont en bref :

- qualités intrinsèques du matériau extrait dans la norme recherchée
- volume suffisant à qualité requise
- gisement affleurant ou sub-affleurant en règle générale
- infrastructures logistique et énergétique adéquates, et proximité du traitement et/ou du lieu de mise à la consommation, de paramétrages très subordonnés à la valeur marchande
- contraintes environnementales satisfaites
- *adéquation des moyens humains et techniques, pour mémoire*

⇒ Les critères de sélection du matériau sont plus précisément :

- la composition chimique en éléments de base, qui doit satisfaire aux normes exigées de la filière choisie, soit Ca CO_3 % ou CaO %, ou MgO % ; par exemple, pour les calcaires 85 % ou moins de Ca CO_3 suffisent en agriculture, mais 80-90 % sont nécessaires aux castines industrielles, et > 95 % pour les charges ; pour les dolomies, il est exigé > 18 % MgO dans les hauts fourneaux, > 19 % dans nombre d'applications industrielles, mais l'agriculture utilise des teneurs inférieures et variables
- la composition en éléments mineurs ou en traces, qui peut bonifier le produit ou l'exclure partie ou totalité suivant les usages visés ; par exemple, l'absence d'oxydes de fer pour la verrerie et presque partout ailleurs, sauf dans les réfractaires, l'absence de silice pour certaines charges, etc...
- les caractéristiques physico-chimiques et éventuellement géotechniques, qui sont évaluées par nombre d'indices techniques, tels l'indice de blancheur, la résistance à la compression pour les matériaux à calciner ($> 400 \text{ kg/cm}^2$), le comportement au broyage, les indices de porosité, etc... ; notons l'approche fondamentale de ces caractéristiques par l'étude des microtextures
- l'homogénéité et la régularité des caractéristiques citées ci-dessus, sachant qu'il est possible de produire plusieurs qualités

⇒ **Les critères de sélection du gisement sont plus précisément :**

- l'extraction la plus fréquente dite « à ciel ouvert », car elle allie moindre coût et technicité simplifiée, qui peut inclure une découverte faible (ratio de volumes couverture sur gisement 1/10 à 1/1), parfois plus forte si la valeur marchande le permet ; l'extraction souterraine suppose donc une valeur marchande et/ou un besoin local et conjoncturel décisifs
- l'adéquation volume - géométrie satisfaisante, qui prend en compte la géologie du gîte (macro à microstructures continues et discontinues) ; elle doit permettre une durabilité de l'activité compatible avec l'investissement, mais la notion de durée minimum pluri-décennale s'assouplit dans le cas conjoncturel de grands chantiers
- la régularité de qualité suppose une homogénéité qui peut être envisagée à des échelles différentes suivant le type de produit et si plusieurs qualités sont introduites

⇒ **Les critères de sélection du site sont plus précisément :**

- la localisation éventuelle dans une formation sédimentaire identifiée d'intérêt économique à l'échelle locale ou régionale (cf cartes géologiques et cartes thématiques de matériaux)
- la disponibilité des infrastructures, accessibilité de base (routière et/ou ferroviaire, parfois hydrographique), et énergétique
- l'adéquation en globalité du facteur coûts de transport aux différentes étapes, extraction du brut / traitement primaire / produit semi-fini ou fini / zones de consommation ; les produits plus rares et/ou à forte valeur ajoutée telles les dolomies calcinées (réfractaires, etc...) et les chaux très pures à usage industriel, « supportent » mieux un surcroît de transport
- les contraintes environnementales, dont les exclusions de principe que sont les zones urbaines, écologiques (parcs naturels, zones humides, etc...), socioculturelles (sites classés) ; elles sont recensées dans l'étude d'impact qui évalue tous les effets tels que hydrologique, de rejets divers, paysager, logistique, acoustique, etc...

⇒ **Etude de faisabilité**

Après les mesures ponctuelles et les mesures systématiques (par exemple, sondages disposés régulièrement sur les points de grilles aux dimensions adaptées, analyses chimiques régulières), la mise à l'essai des caractéristiques économiques trouvées fait en principe l'objet d'une étude de faisabilité ; ce test correspond au passage des approches ponctuelles de terrain et de laboratoire à l'approche en « vraie grandeur ».

L'étude de faisabilité touche à tous les niveaux vus ci-dessus :

- notamment dans les deux premiers, par le traitement en quantité pré-industrielle du matériau ou du minerai pour aboutir au produit souhaité (minéralurgie au sens large), et les confirmations d'homogénéité et de volumes économiques définis
- dans le troisième, il s'agit de quantifier les éléments périphériques, en personnel, matériel, infrastructures, besoins énergétiques, transport, nuisances ; s'ajoutent encore l'aspect commercialisation, l'après exploitation, et pour mémoire le financier

2.4 Exemples de gisements et de sites industriels en France

☐ **Carrières MDF d'Elinghen – Ferques (62)**

– CR visite 03/1999, C. Spencer

La société Magnésie et Dolomie de France fait partie du groupe belge Lhoist qui renforce depuis 15 ans sa position à l'international et en particulier dans le domaine des réfractaires.

- **dolomie** beige clair dite de Hure (âge Tournaisien) sur la carrière d'Elinghen, près de Ferques ; elle est à teneur moyenne d'au moins 21 % de MgO, remarquablement pure, et présente une faible abrasivité et un poids spécifique élevé
- abattage par minage, actuellement sur trois gradins de 5 m chacun ; traitements sur place, passage direct au concasseur primaire, puis concasseurs secondaires, broyeur à boulets et criblage + séchage, conditionnement vrac (castines ou poudres) ou en sacs (50 et 500 kg)
- production totale/an 300 000 t, soit de granulats (0-15, 5-15, 15-35, 35-80, 80-150 mm), soit de fines séchées (catégories par diamètre moyen des grains 25, 65, 100 microns)
- utilisation dans sidérurgie, industries chimiques, céramique, agriculture (dont engrais composés), BTP et afférent
- **calcaire** d'âge Dinantien sur l'ex-carrière Ranguin d'Elinghen ; le calcaire est dit très pur
- extraction et traitement non précisés ; tout le matériau, sous la forme castines, est transporté sur 1 km jusqu'à l'usine à chaux (chaux grasse) de Chaux et Dolomies du Boulonnais
- production totale/an 150 000 t de calcaire
- finalités d'utilisation du produit chaux non précisées

☐ **Carrière PEM du Bois de Teuses, près Marignac (31)**

– CR visite 09/2000, F.Barthélémy et P.M. Thibaut

La société Pechiney Electro-Métallurgie, filiale du groupe Pechiney, est propriétaire de la carrière dont la dolomie sert à la production de magnésium métal dans son usine de Marignac. Le gîte est localisé à 1 000-1 300 m d'altitude dans le massif pyrénéen, ce qui a nécessité de créer 10 km d'accessibilité routière. L'activité extractive est sous-traitée.

- **dolomie magnésienne**, dite dolomie fétide, d'âge Jurassique moyen ; la composition moyenne est MgO = 21 %, CaO = 31 %, Fe₂O₃ = 0.09-0.21 %, Al₂O₃ = 0.07-0.12 %, Mn₂O₃ = 110-200 ppm, ZnO < 25 ppm, SiO₂ = 0.18-0.30 %
- l'extraction est faite sur le flanc inverse d'une structure anticlinale est-ouest très redressée, sur une puissance de 40 m seulement (sur le total de 350 m de l'unité), en raison des qualités chimiques requises (dans le cas présent, principalement haute teneur en MgO et faible teneur en silice)
- la dolomie est traitée sur place pour obtenir une fraction granulométrique 4-25 mm, par passage (après scalpage 150 mm) dans un concasseur primaire à mâchoires, puis concasseur secondaire et broyeur à cylindres ; environ 66 % de la production (fraction au moins égale à 4 mm) est rentabilisée

- production/an 180 000 à 200 000 t de dolomie utile (castine 4-25 mm), car 60 à 70 000 t de la fraction granulométrique 0-4 mm ne peuvent être valorisées et sont laissées sur place ; les réserves sont estimées à 15 ans d'activité au niveau actuel de production
- les castines sont transportées sur 27 km jusqu'à l'usine de calcination de Marignac ; le produit cuit à 1 500° est voué à la filière électro-métallurgique, tandis que les fines produites en cours d'opération sont récupérées à niveau des filtres à air
- usage en fabrication de magnésium métal par passage du produit calciné dans des fours spéciaux Magnétherm, et valorisation en amendement agricole des fines récupérées (20 000 t/an au total, y compris celles résultant de l'incorporation de magnésite importée)

☐ Usine électro-métallurgique PEM de Marignac (31)

– CR visite 09/2000, F.Barthélémy et P.M. Thibaut

La société Péchiney Electro-Métallurgie, filiale du groupe Péchiney, fabrique depuis 1964 sur son site de Marignac du magnésium métal, à partir de dolomie régionale et de magnésite importée. C'est la seule unité de production européenne. La société est en butte aux importations de métal chinoises et a demandé l'intervention de la communauté européenne sous forme d'instauration d'une taxe anti-dumping.

- la production annuelle de magnésium métal avoisine 16 000 t, ce qui représente à peu près 4 % de la consommation mondiale
- l'effectif en place est de 200 personnes
- la productivité a quasiment quadruplé en trente ans, par optimisation - automatisation de la chaîne de production ; l'activité est réduite en janvier et février pour cause de coût énergétique excessif en cette période

La production fait appel à un procédé original, dénommé Magnétherm, qui consiste à réduire dans un four à arc électrique un mélange de dolomie et de magnésite, préalablement calcinées, en présence de ferro-silicium et d'aluminium. La vaporisation résultante de magnésium permet sa récupération par condensation sous vide. Les étapes industrielles sont examinées ci-dessous.

- matière de base produite régionalement, dolomie du gîte de Bois de Teuses (voir article), ou importée d'Espagne, magnésite de la province d'Aragon ; s'ajoutent des galets de silice en provenance du Périgord ou d'Espagne, et de l'aluminium
- calcination à 1 500° des carbonates en castines (4-25 mm) grâce à deux fours rotatifs à gaz de 60 et 75 m de long
- fabrication du ferro-silicium grâce à un four électrique de 20 MW, en alimentation automatisée et soutirage continu, et sortie par une seule bouche à la fois (sur les trois), dont l'écoulement difficile doit être aidé à l'explosif ; il est stocké, car l'activité du four est saisonnière d'avril à octobre
- les quatre fours Magnétherm, de puissance unitaire 8 MW à l'électrode, portent le mélange à 1 700° ; le magnésium métal est récupéré à l'unité de condensation qui fonctionne sous vide (100 mbar), et versé dans des creusets refroidis
- produits commercialisés en lingots purs, lingots alliés, tournures

- utilisation en fonderies d'alliages d'aluminium, de magnésium, en sidérurgie (via les fabricants de ferro-silico-magnésium) pour la désulfuration et la déphosphoration de l'acier, des fontes spéciales à graphite sphéroïdal

Les déchets résiduels, laitiers à raison de 100 000 t/an (silicate de chaux, aluminium, magnésium) et ferro-silicium résiduaire en base de four, n'ont pu trouver valorisation.

☐ **Carrières Pigeon-Chaux de Saint Pierre la Cour et Vaiges (53)**

– CR visite 04/2000, F. Barthélémy

Le groupe Pigeon-Chaux englobe 44 sociétés (1 180 collaborateurs), diversifiées dans les TP, les granulats, le béton, les plastiques (CA de 1.17 milliards de francs). Le site de St Pierre la Cour va être abandonné au profit du nouveau site de Vaiges.

- **calcaire et dolomie** d'âge Cambrien inférieur sur la carrière de Saint Pierre la Cour
- extraction et traitement non précisés, mais castines pour fabrication de chaux
- production d'environ 107 000 t/an de crus
- four à chaux sur le site de St Pierre la Cour, de capacité approximative 60 000 t/an
- utilisation à 90 % pour l'amendement sous forme de chaux vive, et à 10 % pour les TP (stabilisation des sols)

- **calcaire et dolomie** d'âge Cambrien inférieur sur la carrière de Vaiges
- extraction et traitement non précisés, mais castines pour fabrication de chaux
- production prévisionnelle de crus du même ordre de grandeur qu'à St Pierre la Cour
- deux fours à chaux verticaux sur le site de Vaiges, de capacité prévisionnelle 180 tonnes/jour
- mêmes utilisations et ratios que pour les carbonates de St Pierre la Cour

☐ **Usine d'engrais et amendements TIMAC de Saint Malo (35)**

– CR visite 04/2000, F. Barthélémy

La société de Transformation Industrielle du Maërl en Amendement Calcaire fait partie du groupe Roullier, dont elle a été le noyau. Le site de St Malo produit environ 600 000 t/an d'engrais et amendements à partir de 15 matières premières : phosphates (de Tunisie), urée, sulfate d'ammoniaque, chlorure de potassium, magnésite, sulfate de magnésium, maërl, oligo-éléments, etc...

Le maërl est le nom donné à un sable récupéré en mer d'origine biodétritique, essentiellement constitué de fragments de squelettes calcaires d'une algue coralliaire : *Lithothamnium calcareum*. L'exploitation est soumise à autorisation renouvelable annuellement, et elle est sous surveillance de l'IFREMER.

- **le maërl** est extrait en mer de deux bancs situés au large du Cap Fréhel et de Paimpol, par 10 à 15 m de profondeur ; le dragage suit des lignes de bathymétrie préalablement enregistrée et la capacité du navire avoisine 1 000 tonnes

- la granulométrie du sable organique est en moyenne de 2 à 3 mm (les diamètres des squelettes intacts sont de 2 à 4 cm)
- le maërl subit un séchage (fours à gaz à tambour) et un broyage (broyeurs à boulets) avec séparation granulométrique
- le produit brut est commercialisé sous les deux catégories granulométriques 0.5-2 mm et 2-4 mm ; une partie est commercialisée sous l'appellation Timalite, pour la filtration d'eau
- mais la majeure partie de la production est commercialisée sous forme de lithothamne 400, où le maërl (réduit à 160 microns) est mélangé avec d'autres matières (dont des oligo-éléments) ; l'agglomération est faite à sec, avant granulation, enrobage et séchage par lit fluidisé
- l'extraction de maërl est de 100 000 t/an
- utilisation en engrais, amendements pour l'agriculture (grande porosité et grande surface spécifique, enrichissement minéral), et pour la filtration des eaux urbaines en substitut du charbon actif

❑ Carrières et usine Balthazard & Cotte de Neau (53)

– CR visite 04/2000, F. Barthélémy

La société Balthazard et Cotte exploite trois carrières qui fournissent calcaire et dolomie pour la calcination, et dolomie pour le frittage, traités sur place. Neau est le seul site français de production de dolomie frittée.

- **calcaire et dolomie** d'âge Cambrien inférieur, extraits à ciel ouvert sur trois sites
- exploitation par découverte modérée (formation superficielle argileuse de 15 m d'épaisseur maximum), et sur une puissance de 40 m maximum dans le calcaire, et de 80 m maximum dans la dolomie ; extraction non précisée et traitement non précisés, mais utilisation en castines pour calcination et frittage
- traitement considéré séparément, suivant la filière de valorisation, chaux ou dolomie frittée
- production totale/an de 800 000 t de calcaire, et de 500 000 t de dolomie (évaluations grossières à l'abattage)
- **filière production de chaux** : transformation en castines, mais traitement non précisé
- calcination des matières premières pour produire des chaux calciques et des chaux magnésiennes ; l'essentiel reste à l'état de chaux vive
- production annuelle d'environ 225 000 t de chaux calcique, et d'environ 160 000 t de chaux magnésienne
- commercialisation à 85 % à l'état de chaux vive, et le reste transformé en chaux éteinte (20 000 t)
- **filière production de dolomie frittée** : granulométrie des castines en entrée de 5-20 mm
- ultra-calcination à 2 000° dans un four rotatif d'une capacité de 200 tonnes/jour ; granulométrie de sortie de 0 à 16-18 mm et test de qualification axé sur la densité apparente (1.8 à 1.9)
- production annuelle de 15 000 t

- commercialisation, après adjonctions diverses (magnésie, goudron, huiles), sous la forme de poudre ou de granulé

La production totale de l'usine est ainsi ventilée, par finalités :

- amendements (50 %)
- BTP, dans travaux publics (10-30 %), et bétons et enduits (environ 2 %)
- traitement des eaux (10 %)
- sidérurgie, y compris les dolomies frittées servant au parement interne réfractaire des fours (5-10 %)
- chimie et traitement des fumées (5-10 %)

3- DONNEES ECONOMIQUES DU MARCHE NATIONAL ET DONNEES CIBLEES DU MARCHE INTERNATIONAL

3.1 Précisions à apporter sur les données traitées

Les chiffres collationnés et exploités dans ce mémento sont tirés de diverses sources :

- l'Union Nationale des Industries de Carrières et Matériaux de Construction (UNICEM)
- l'Union Nationale des Producteurs de Granulats (UNPG) ;
- la Chambre Syndicale Nationale des Fabricants de Chaux Grasses et Magnésiennes (CSNFCGM)
- la Commission d'Etude et de Liaison des Amendements Calciques (CélaC), qui s'occupe dorénavant d'établir les données statistiques à la place de l'Association Nationale Professionnelle Pour les Engrais et Amendements (ANPEA)
- le Syndicat Français de l'Industrie Cimentière (SFIC), et sa revue l'Industrie cimentière française
- le BRGM – Département des Ressources Minérales (REM) \ Unité Matériaux, qui produit les principales statistiques françaises et internationales par filières
- l'United States Geological Survey (USGS), qui produit à peu près toutes les statistiques des sciences de la terre dans le monde
- les données du commerce extérieur du Ministère de l'Economie français, réalisées sur la base des statistiques établies par la Direction des Douanes

Les données qui sont traitées posent d'abord un problème de comparaison entre catégories supposées identiques, selon les filières en France (carriers, chauffourniers, industriels des amendements, etc...), et a fortiori avec les données d'autres pays. S'ajoutent les problèmes de leur mise à jour et de leur disponibilité ; car certaines données relèvent du « secret statistique » ou ne sont pas fournies sous prétexte de secret technique et industriel. Les données croisées et les données cumulées, sont donc fréquemment la source de résultats un peu variants ou de divergences inconfortables. Les prix sont en francs courants.

L'appréciation du niveau et de l'évolution de la production, tant nationale qu'internationale, est réalisée sur les six dernières années à données disponibles, c'est-à-dire de 1994 à 1999.

3.2 Données économiques du marché national

3.2.1 Production nationale

① *Quelques productions significatives de substances minérales* carbonatées et autres ont été rassemblées pour fixer les enjeux et les ordres de grandeur (Tabl. 4). Sont ainsi comparés en tonnage et valeur les matériaux de carrière (ensemble des substances minérales extraites que la législation n'a pas classé dans les mines), dont les granulats concassés, les granulats alluvionnaires, les calcaires et dolomies à usage industriel et agricole, les pierres de construction carbonatées classées en produits finis, et les produits dérivés des matériaux de carrière (comprenant terres cuites, bétons prêts à l'emploi et

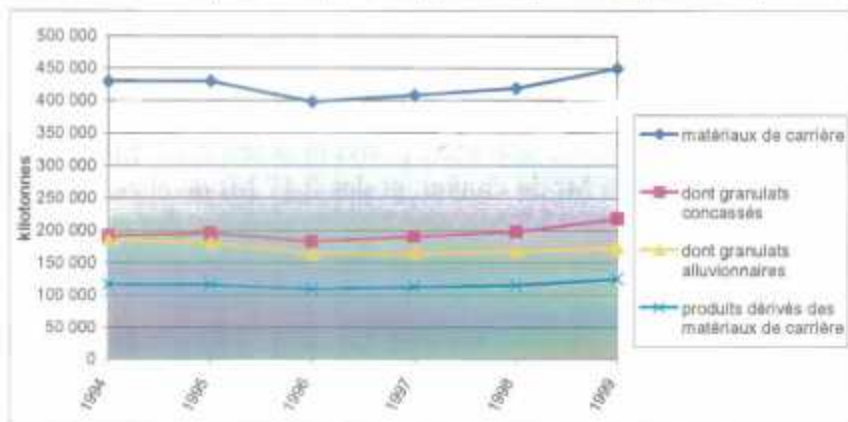
Exemples de minéraux industriels carbonatés et produits dérivés	1994				1995				1996				1997				1998				1999			
unités	kilo- tonnes	évolution %	kF	coût F/t	kilo- tonnes	évolution %	kF	coût F/t	kilo- tonnes	évolution %	kF	coût F/t	kilo- tonnes	évolution %	kF	coût F/t	kilo- tonnes	évolution %	kF	coût F/t	kilo- tonnes	évolution %	kF	coût F/t
a - matériaux de carrière	429 636	6.0	33 427 191	78	430 033	0.1	34 213 548	80	398 262	-7.4	32 348 543	81	407 919	2.4	33 539 942	82	418 911	2.7	34 657 536	83	448 708	7.4	37 571 165	84
dont granulats concassés	191 688	7.0	8 978 856	38	196 307	2.4	7 180 165	37	183 175	-6.7	6 762 868	37	190 768	4.1	7 142 242	37	198 622	4.1	7 488 530	38	218 507	10.0	8 533 851	39
dont granulats alluvionnaires	186 370	4.6	7 655 910	41	181 130	-2.8	7 478 931	41	163 650	-9.7	6 775 450	41	164 950	0.8	6 976 170	42	167 600	1.6	7 070 117	42	173 760	3.7	7 839 816	45
dont produits finis marbres et calcaires	1 075	9.8	735 393	684	1 044	-2.9	752 489	721	1 070	2.8	687 204	623	957	-10.6	693 430	725	1 071	12.0	766 503	716	1 082	1.0	779 103	720
dont calcaire-dolomite pour industrie-agriculture	12 364	29.3	1 483 680	118	13 591	9.9	1 552 051	114	13 729	1.0	1 578 958	115	14 592	6.3	1 705 753	117	14 387	-1.4	1 706 100	119	13 800	-4.1	1 665 000	121
b - produits dérivés des matériaux de carrière	116 438	6.6	68 647 868	590	116 107	-0.3	69 428 247	598	109 396	-5.8	68 041 758	622	112 624	3.0	70 724 688	628	115 144	2.2	71 623 927	622	125 036	8.6	74 671 921	597
dont produits réfractaires	356	14.3	2 176 118	6114	399	12.1	2 475 349	6205	365	-8.6	2 741 340	7517	398	9.1	2 844 917	7152	407	2.2	2 591 094	6372	374	-8.0	2 452 781	6554
c - gibberite-magnésie importées	197	34.9	243 356	1205	220	11.9	257 105	1168	196	-10.9	243 157	1238	194	-1.2	246 230	1269	209	7.9	248 274	1186	167	-20.4	219 108	1315
1- clinkers	16 732	2.1			16 485	-1.6			16 084	-2.3			15 488	-3.8			16 562	7.1			15 990	-3.5		
2- ciments (dont clinkers)	20 021	4.5			19 724	-1.5			18 337	-7.0			18 442	0.6			18 701	1.4			19 527	4.4		
3- CHN : chaux hydraulique naturelle	188	3.7			171	1.8			172	0.6			167	-2.9			168	-0.6			172	3.6		
4- liants hydrauliques routiers	0	ns			0	ns			0	ns			789	ns			765	-3.0			821	7.3		
total liants hydrauliques 2-3-4	20 189	4.5	11 195 000	555	19 895	-1.5	11 055 000	558	18 509	-7.0	10 393 000	562	19 398	4.8	10 265 000	529	19 632	1.2	11 091 000	585	20 520	4.5	11 961 000	583
total avec clinker 1-3-4	16 900	2.2			16 636	-1.6			18 256	-2.3			18 422	1.0			17 493	8.5			16 983	-2.9		
ajout calcaire au clinker	485	3.9			470	-3.1			551	17.2			516	-6.3			508	-1.7			498	-1.8		
total calcaire utilisé (# 130% du brut + ajout)	22 455	2.2			22 097	-1.6			21 884	-1.9			21 865	0.8			23 249	6.3			22 578	-2.9		

Tabl. 4 : Données comparées de quelques productions ou importations de substances minérales ou dérivées en France de 1994 à 1999 (statistiques BRGM et Industrie Cimentière)

productions en kilotonnes	1994	1995	1996	1997	1998	1999
matériaux de carrière	429 636	430 033	398 262	407 919	418 911	449 709
dont granulats concassés	191 688	196 307	183 175	190 768	198 622	218 507
dont granulats alluvionnaires	186 370	181 130	163 650	164 950	167 600	173 760
produits dérivés des matériaux de carrière	116 436	116 107	109 396	112 624	115 144	125 036

Tabl. 5a

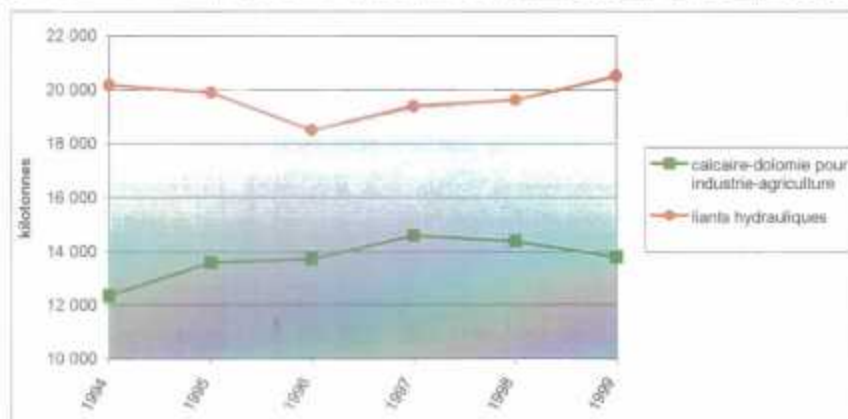
Fig. 3a



productions en kilotonnes	1994	1995	1996	1997	1998	1999
calcaire-dolomie pour industrie-agriculture	12 364	13 591	13 729	14 592	14 387	13 800
liants hydrauliques	20 189	19 895	18 509	19 398	19 632	20 520

Tabl. 5b

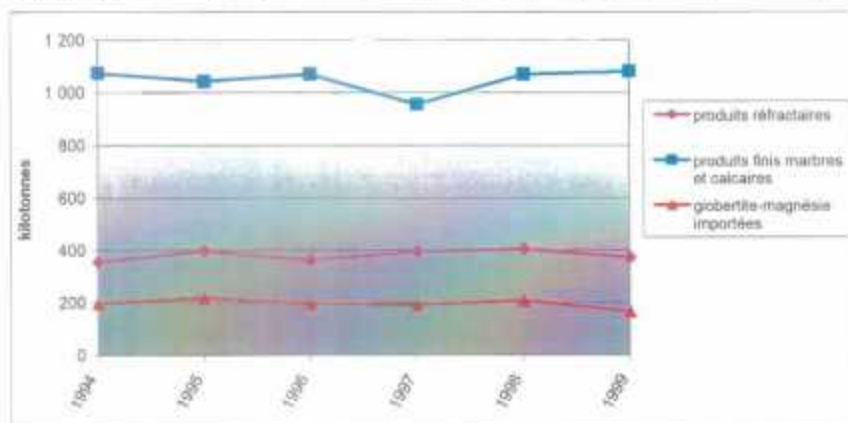
Fig. 3b



productions / importations en kt	1994	1995	1996	1997	1998	1999
produits réfractaires	356	399	365	398	407	374
produits finis marbres et calcaires	1 075	1 044	1 070	957	1 071	1 082
giobertite-magnésie importées	197	220	196	194	209	167

Tabl. 5c

Fig. 3c



Tabl. 5 a-b-c et Fig. 3 a-b-c : Diagrammes d'évolution de quelques productions ou importations de substances minérales ou dérivées en France de 1994 à 1999

préfabriqués, céramiques, verres, plâtres), dont les réfractaires, enfin les liants hydrauliques (source SFIC). Bien qu'importées, la giobertite (transformée en magnésium métal ou en magnésie) et la magnésie ont été ajoutées en raison de leur rôle de premier plan parmi les produits carbonatés magnésiens.

Sur un total de 398 à 450 Mt de matériaux de carrière produits, on observe que le poste des calcaires et dolomies à usage industriel et agricole (carbonates pour toutes charges inclus) représente 12.4 à 14.6 Mt, en comparaison des 183 à 218 Mt de granulats de roches concassées, des 164 à 186 Mt de granulats alluvionnaires, du 1 Mt pour les produits finis en marbre ou calcaire, des 16 Mt de clinker, et des 0.17 Mt de chaux hydraulique naturelle. En 1999, ce poste a représenté 13.8 Mt, soit 3 % du tonnage des matériaux de carrière, en comparaison des 87 % de l'ensemble des granulats.

Concernant les valeurs, dont l'évolution est plus étroitement associée à la fluctuation des tonnages qu'à celle des coûts, deux remarques seront faites (année de référence 1999). D'une part, le faible prix relatif des granulats concassés et des carbonates industriels et agricoles (39 à 121 F la tonne), est à comparer aux prix moyens des produits dérivés, produits finis, liants hydrauliques (583 à 720 F la tonne), et au prix élevé des réfractaires (6 554 F la tonne). D'autre part, les prix des carbonates industriels et agricoles sont restés au mieux stables de 1994 à 1999, si on considère qu'il s'agit de francs courants.

L'évolution globale en tonnage sur la période considérée montre une tendance faiblement positive pour la plupart des produits, à part le fléchissement correspondant à l'année 1996 (Tabl. 5a-b-c et Fig. 3a-b-c). Mais un autre fléchissement est enregistré en 1999 pour les carbonates industriels et agricoles (-4%), les produits réfractaires, la giobertite et la magnésie importées.

② *Les données de l'UNICEM* qui ont été exploitées, correspondent aux branches des « matériaux de carrière pour l'industrie et l'agriculture » et des « granulats calcaires de carrière ». La ventilation par filière d'utilisation comprend le calcaire industriel (castines ou poudres), les carbonates pour charges, les carbonates pour amendements crus, les fillers < 80 µ et les autres granulats de carrière (Tabl. 6 et Fig. 4). On notera qu'au niveau des présentations détaillées, les statistiques annuelles font abstraction de la dolomie, de la craie et des amendements composés (* secrets statistiques), et plus récemment des fillers < 80 µ (intégrés aux sables calcaires). En outre, les chiffres de l'année 1999 ont subi une modification notable avec l'intégration des postes « granulats de recyclage » et « cheminées d'intérieur ».

Sur la période considérée, le sous-groupe 1-a du calcaire industriel, rassemblant l'ensemble des castines, plus les poudres de fillers routiers, de verrerie et de céramique, a une production annuelle de 7.0 à 8.8 Mt. Cependant, les castines pour chaux intégrées aux « castines pour autres industries », sont loin d'être toutes représentées, car certains producteurs traitent directement des carrières, indépendamment de l'UNICEM (voir le paragraphe ④ traitant de la production de chaux). Le sous-groupe 1-b qui englobe les poudres pour charges de finalités insuffisamment différenciées, représente annuellement 2.2 à 2.4 Mt ; la couleur bleue des caractères signale les données non prises en compte

produits distingués en tonnes	1994	part %	1995	part %	1996	part %	1997	part %	1998	part %	1999	part %
1- calcaire industriel												
castines pour hauts-fourneaux et fonderies	4 094 900	34.0	4 578 900	34.5	4 115 300	30.7	4 597 700	32.4	4 641 000	32.1	4 365 500	31.6
castines pour autres industries	2 314 900	19.2	2 299 300	17.3	2 960 800	22.1	3 071 700	21.6	2 991 800	20.7	3 039 800	22.0
poudres pour fillers routiers	334 400	2.8	491 700	3.7	477 800	3.6	611 000	4.3	914 700	6.3	962 400	7.0
poudres pour verrerie et céramique	246 800	2.0	269 100	2.0	284 600	2.1	214 200	1.5	269 300	1.9	271 000	2.0
sous total 1a	6 991 000	58.0	7 639 000	57.5	7 838 500	58.4	8 494 600	59.8	8 816 800	61.0	8 638 500	62.6
évolution annuelle %		54.3		9.3		2.6		8.4		3.8		-2.0
poudres pour autres usages : surtout charges	1 779 300	14.8	1 723 400	13.0	1 708 000	12.7	1 803 500	12.7	1 812 400	12.5	1 948 000	14.1
poudres de marbre : surtout filière CCP	526 900	4.4	508 800	3.8	483 200	3.6	491 200	3.5	490 300	3.4	443 500	3.2
sous total annexe 1b	2 306 200	19.1	2 232 200	16.8	2 191 200	16.3	2 294 700	16.2	2 302 700	15.9	2 391 500	17.3
CA total HT (1) en MF	1 296		1 343		1 373		1 603		1 498		1 483	
2- dolomie												
dolomie sans distinction : secret statistique	*		*		*		*		*		*	
sous total 2												
CA total HT (2) en MF	177		207		200		156		172		158	
3- amendements "calcaires" crus												
amendements de calcaire-craie-dolomie	2 713 900	22.5	3 343 900	25.2	3 337 700	24.9	3 418 800	24.1	3 339 100	23.1	2 770 000	20.1
marnes - non comptabilisées	352 400		375 800		361 900		383 700		378 000		387 100	
amendements composés : secret statistique	*	0.0	*	0.0	*	0.0	*	0.0	*	0.0	*	0.0
sous total 3	2 713 900	22.5	3 343 900	25.2	3 337 700	24.9	3 418 800	24.1	3 339 100	23.1	2 770 000	20.1
évolution annuelle %		-3.0		23.2		-0.2		2.4		-2.3		-17.0
CA total HT (3) en MF	178		209		186		214		239		261	
4- granulats calcaires de carrières												
fillers à diam. < 80 microns	40 000	0.3	50 000	0.4	50 000	0.4	0	0.0	0	0.0	0	0.0
sous total 4a	40 000	0.3	50 000	0.4	50 000	0.4	0	0.0	0	0.0	0	0.0
évolution annuelle %		-50.0		25.0		0.0						
sables de diam. de 0.08 à 6.3mm	13 900 000	15.6	13 630 000	15.1	13 240 000	15.6		0.0		0.0		0.0
fillers et sables de diam. 6.3mm maximum		0.0		0.0		0.0	14 580 000	16.3	14 240 000	16.0	15 470 000	16.8
graviers, cailloux, petits blocs de d > 6.3 à 125mm	33 090 000	37.3	33 640 000	37.3	30 810 000	38.4	31 870 000	35.7	35 240 000	39.6	35 250 000	38.2
blocs et pierres d'enrochement de d > 125mm	5 820 000	6.6	5 560 000	6.2	4 760 000	5.8	5 640 000	6.3	4 700 000	5.3	5 670 000	6.1
graves tout venant de d > 6.3mm	36 010 000	40.5	37 340 000	41.4	35 870 000	42.4	37 240 000	41.7	34 840 000	39.1	35 880 000	38.9
sous total annexe 4b	88 820 000	100.0	90 170 000	100.0	84 680 000	100.0	89 330 000	100.0	89 020 000	100.0	92 270 000	100.0
CA total HT (4) en MF	2 838		2 935		2 826		3 036		3 058		2 797	
total carb. indus.- agricoles : 1a-2-3-4a	9 744 900	80.9	11 032 900	83.2	11 226 200	83.7	11 913 400	83.5	12 155 900	84.1	11 408 500	80.7
évolution annuelle %		31.6		13.2		1.8		6.1		2.0		-6.1
total carb. indus.- agricoles + charges : 1ab-2-3-4a	12 051 100	100.0	13 265 100	100.0	13 417 400	100.0	14 208 100	100.0	14 456 600	100.0	13 800 000	100.0
CA correspondant HT en MF - approximatif	1 651		1 759		1 759		1 903		1 909		1 872	
total des tonnages annexes : 1b-4b	91 126 200		92 402 200		86 871 200		91 624 700		91 322 700		94 661 500	
grand total : 1ab-2-3-4ab	100 871 100		103 435 100		98 097 400		103 536 100		103 478 600		106 070 000	

Tabl. 6 : Produits de carrière pour l'industrie, l'agriculture et le BTP, extraits en France de 1994 à 1999 (source UNICEM)

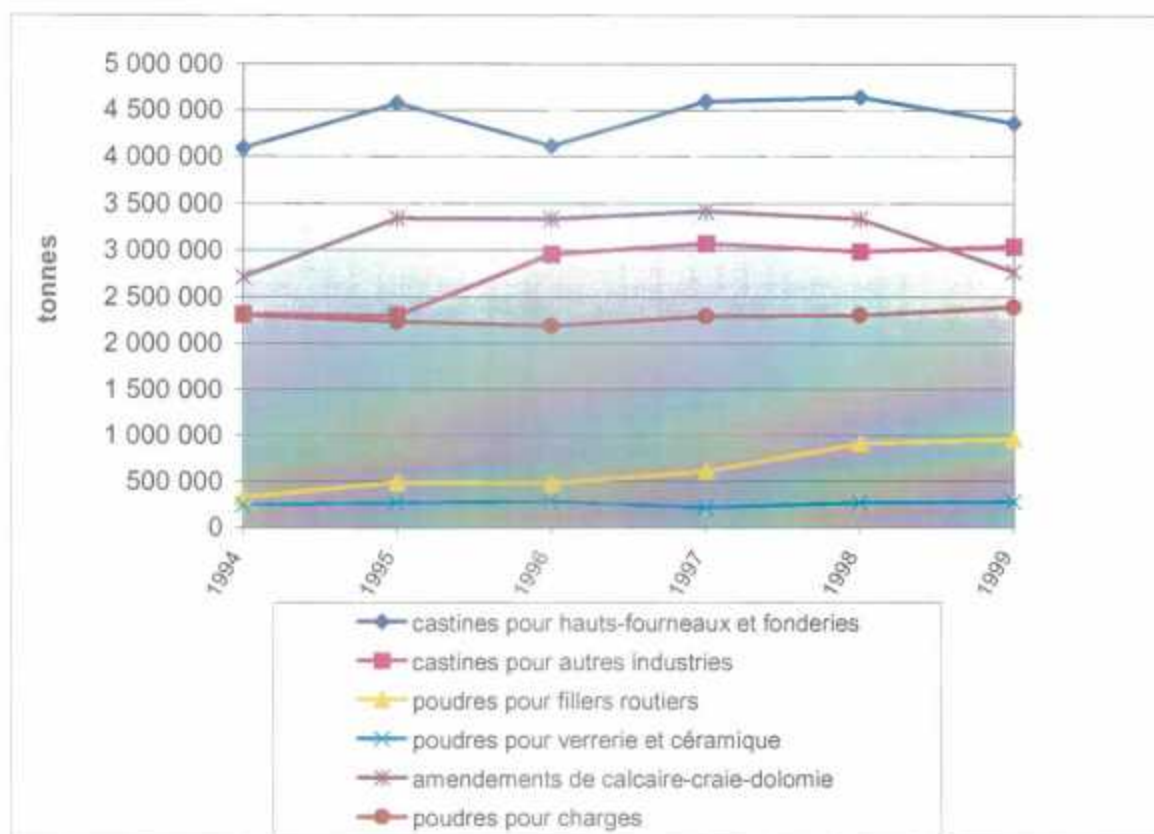


Fig. 4 : Evolution de la production de calcaire et dolomie à usage industriel et agricole par filière - en France de 1994 à 1999 (données UNICEM)

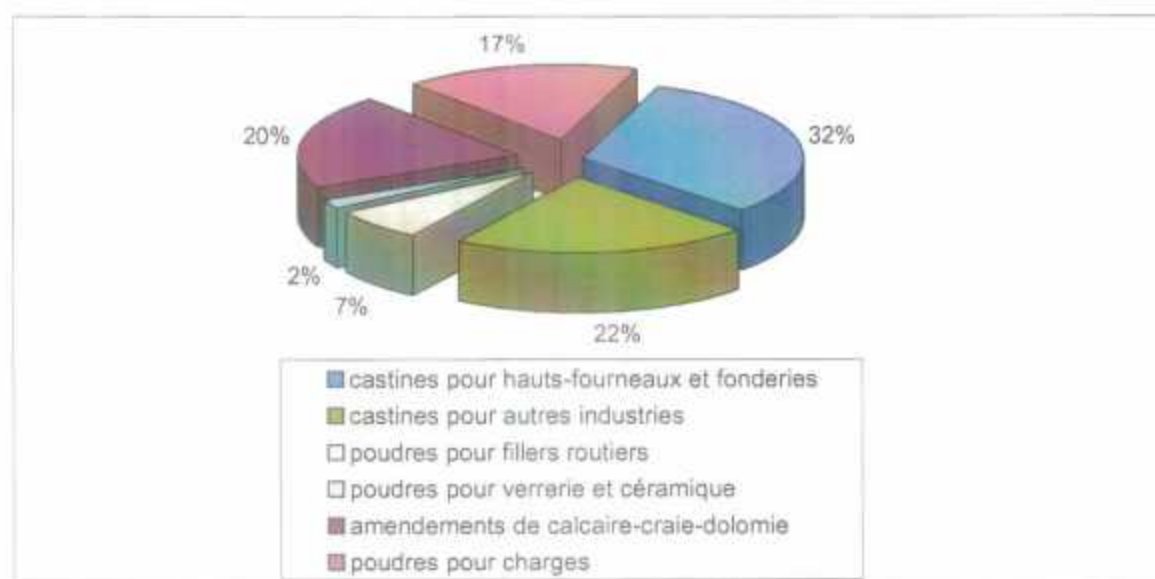


Fig. 5 : Ventilation de la production française 1999 de calcaire et dolomie à usage industriel et agricole

dans le 1^{er} total, parce qu'à périmètre d'usage indéfini (cas des charges), ou parce qu'à nature ou usage hors périmètre d'étude (mais laissées pour respecter la présentation UNICEM). Le chiffre d'affaire de la branche du calcaire industriel s'inscrit dans une fourchette étroite, de 1.3 à 1.5 milliards de francs.

Le poste 2 correspondant à la dolomie n'est pas renseigné, à l'exception du chiffre d'affaire, entre 158 et 200 MF, qui décroît depuis 1997. Dans le poste 3, les chiffres fournis pour les amendements crus, de 2.7 à 3.4 Mt (exclusion faite des marnes comptabilisées par l'UNICEM et par le traitement BRGM), sont supérieurs d'environ 1 Mt aux chiffres fournis par le Célac – ANPEA, soit environ 30 % de moins pour les chiffres du Célac ; le chiffre d'affaire est en constante progression, de 178 à 261 MF. Pour les fillers comptabilisés dans les granulats du poste 4, et produits à 40-50 000 tonnes/an avant 1997, leur intégration aux sables à partir de 1997 ne permet plus leur traçabilité.

La production de matériaux carbonatés à usage industriel et agricole sans les poudres pour charges (total 1a-2*-3-4a), s'établit dans une fourchette de 9.7 à 12.2 Mt. Elle montre une croissance très forte en 1994 et 1995 (taux à 2 chiffres), à l'exemple du + 31.6 % enregistré en 1994, qui correspond à la reprise après la dépression de l'année 1993. Puis l'amortissement de la croissance est rapide de 1996 à 1998 (taux à 1 chiffre), pour passer à un taux négatif en 1999 (- 6.1 %). En intégrant les charges (toutes les charges puisque les charges blanches ne sont pas distinguées, à l'exception des poudres de marbre réservées à la fabrication du CCP), la production s'établit dans une fourchette de 12.1 à 14.5 Mt, correspondant à un chiffre d'affaire de 1.7 à 1.9 milliards de francs (abstraction faite des fillers < 80 µ).

Au niveau des différents groupes de produits distingués, la croissance est modérément contrastée jusqu'en 1998, voire 1999 pour la plupart des produits, avec des augmentations chronologiquement décalées (amendements en 1995, castines pour autres industries en 1996, fillers routiers en 1998), suivies de paliers. En 1999 cependant, il y a fléchissement des « castines de la métallurgie » et net recul de 17 % des « amendements de calcaire-craie-dolomie » (Fig. 4).

Enfin, la ventilation par filières utilitaires principales de la production de l'année 1999, y compris les poudres pour charges, met en évidence les parts de 54 % des castines, de 20 % des amendements, et de 17 % des charges (Fig. 5).

③ **Les productions d'amendements agricoles** fournies par le Célac – ANPEA, sont présentées dans le tableau 7 et analysées figures 6 et 7. Très rapidement, on relève :

- une production globale de 1.84 à 2.56 Mt maximum, dont l'évolution saccadée montre deux hausses brusques en 1995 (+ 18.8 %), et en 1997 (+ 21.0 %), suivies de fléchissements des tonnages
- une production d'amendements cuits de 0.23 à 0.34 Mt maximum, en hausse modérée mais continue, sauf la dernière année
- une production d'amendements crus de 1.3 à 1.7 Mt, maximum atteint en 1997
- une production d'amendements mixtes assez constante, de 0.26 à 0.33 Mt maximum
- une production d'amendements - engrais de 0.05 à 0.30 Mt maximum, qui double de tonnage à partir de 1997

Produits distingués en tonnes	1994	part %	1995	part %	1996	part %	1997	part %	1998	part %	1999	part %
1- amendements cults												
chaux calciques	166 974	9.1	179 938	8.2	174 440	8.3	213 883	8.4	254 062	9.9	229 850	9.7
chaux magnésiennes	67 070	3.6	96 549	4.4	105 886	5.0	83 890	3.3	85 688	3.3	75 936	3.2
sous total 1	234 044	12.7	276 487	12.6	280 326	13.3	297 773	11.7	339 750	13.3	305 786	12.9
évolution annuelle %		4.1		18.1		1.4		6.2		14.1		-10.0
2- amendements crus												
amendements de calcaire pulvérisé	500 744	27.2	585 633	26.8	556 700	26.4	625 846	24.5	600 103	23.5	568 683	24.0
amendements de calcaire grossier et marne	283 844	15.4	349 354	16.0	314 598	14.9	387 169	15.2	328 354	12.8	382 952	16.2
maërl grossier après 1994, non distingué avant	103 916	5.6	29 602	1.4	26 602	1.3	43 439	1.7	41 804	1.6	29 546	1.2
maërl fin après 1994	0	0.0	67 283	3.1	48 347	2.3	73 232	2.9	85 015	3.3	83 425	3.5
dolomie grossière	135 905	7.4	36 950	1.7	32 179	1.5	52 430	2.1	28 483	1.1	22 716	1.0
dolomie fine	0	0.0	117 149	5.4	115 605	5.5	117 834	4.6	112 395	4.4	85 754	3.6
amendements calco-magnésiens	273 997	14.9	362 326	16.6	322 241	15.3	421 467	16.5	395 941	15.5	334 119	14.1
sous total 2	1 298 406	70.6	1 548 297	70.8	1 416 272	67.1	1 721 417	67.4	1 592 095	62.2	1 507 195	63.7
évolution annuelle %		0.3		19.2		-8.5		21.5		-7.5		-5.3
3- amendements mixtes												
amendements mixtes calciques	134 494	7.3	76 984	3.5	43 592	2.1	42 145	1.7	48 710	1.9	55 406	2.3
amendements mixtes magnésiens	127 803	6.9	228 451	10.4	281 233	13.3	291 005	11.4	284 319	11.1	270 601	11.4
sous total 3	262 297	14.3	305 435	14.0	324 825	15.4	333 150	13.1	333 029	13.0	326 007	13.8
évolution annuelle %		10.4		16.4		6.3		2.6		0.0		-2.1
4- amendements-engrais												
amendements-engrais	45 141	2.5	56 226	2.6	87 967	4.2	200 096	7.8	293 130	11.5	225 935	9.6
sous total 4	45 141	2.5	56 226	2.6	87 967	4.2	200 096	7.8	293 130	11.5	225 935	9.6
évolution annuelle %		2.1		24.6		56.5		127.5		46.5		-22.9
grand total	1 839 888	100.0	2 186 445	100.0	2 109 390	100.0	2 552 436	100.0	2 558 004	100.0	2 364 923	100.0
évolution annuelle %		2.2		18.8		-3.5		21.0		0.2		-7.5

Tabl. 7 : Livraisons d'amendements calciques et magnésiens et d'amendements-engrais - en France de 1994 à 1999 (source ANPEA-Célaç)

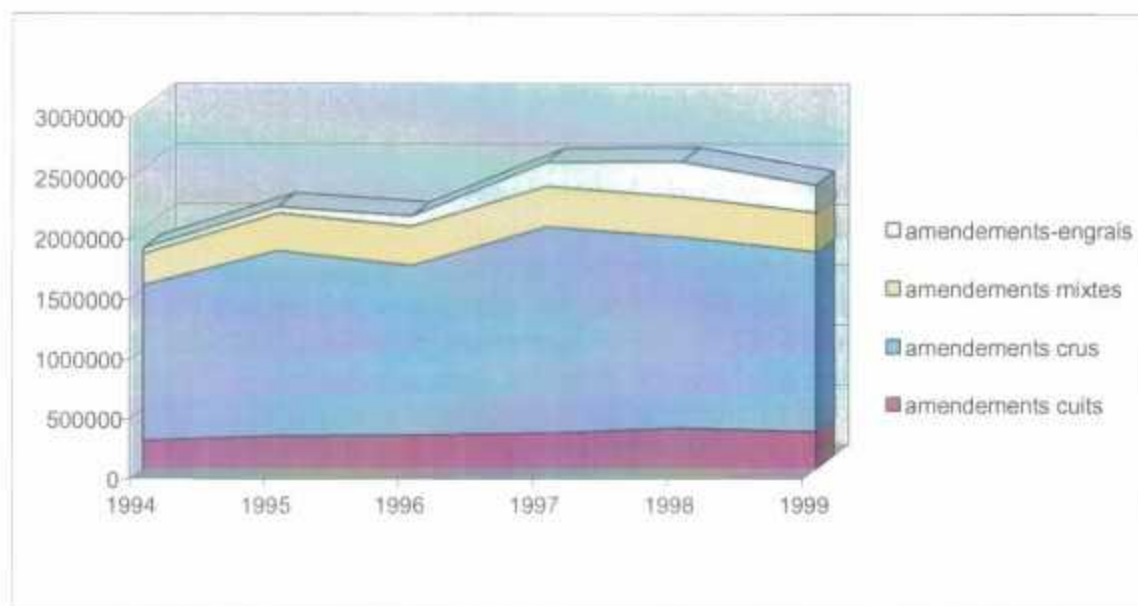


Figure 6 : Evolution des livraisons d'amendements en France de 1994 à 1999 (source ANPEA -Célaç)

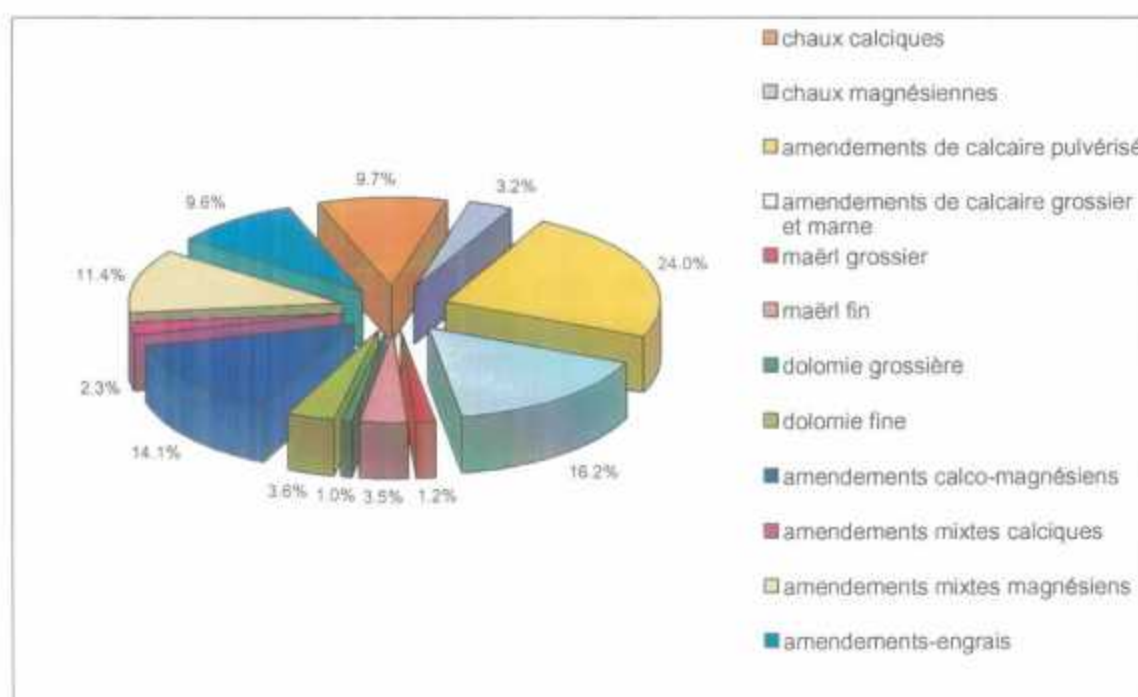


Figure 7 : Répartition qualitative des amendements livrés en France en 1999 (source ANPEA - Célaç)

L'évolution pour les trois premiers produits est assez semblable à celle des matériaux de l'UNICEM ; par contre, la croissance de la production dans les amendements - engrais révèle une demande récente soutenue. La dernière figure illustre la grande variété des amendements livrés en 1999, malgré la place privilégiée du calcaire pulvérisé ou grossier + marne (30.2 %).

④ *Les données de la Chambre Syndicale Nationale des Fabricants de Chaux Grasses et Magnésiennes* (CSNFCEGM), sont livrées in extenso dans le tableau 8. Subdivisées en chaux calcique vive, chaux calcique éteinte, et chaux magnésiennes, les données fournissent de façon précise des affectations de production par finalité. Mais il est important de noter qu'environ 17 % de la production de chaux française est hors statistiques ; c'est celle des productions intégrées non divulguées, à l'exemple de l'industrie sucrière (qui produit en même temps la chaux et le gaz carbonique nécessaires), et d'une partie des industries papetières, sidérurgiques et chimiques.

La production française, toutes variétés de chaux aériennes confondues, est très stable sur la période considérée, de 3.02 à 3.11 Mt (Fig. 8). Dans le détail, on observe une vraie stabilité pour la chaux calcique vive, une diminution de la chaux calcique éteinte, et en compensation l'augmentation de la part des chaux magnésiennes, due à l'usage agricole en progression. La stabilité du poste de la chaux vive est un peu incompréhensible en regard de son rôle clé dans l'environnement.

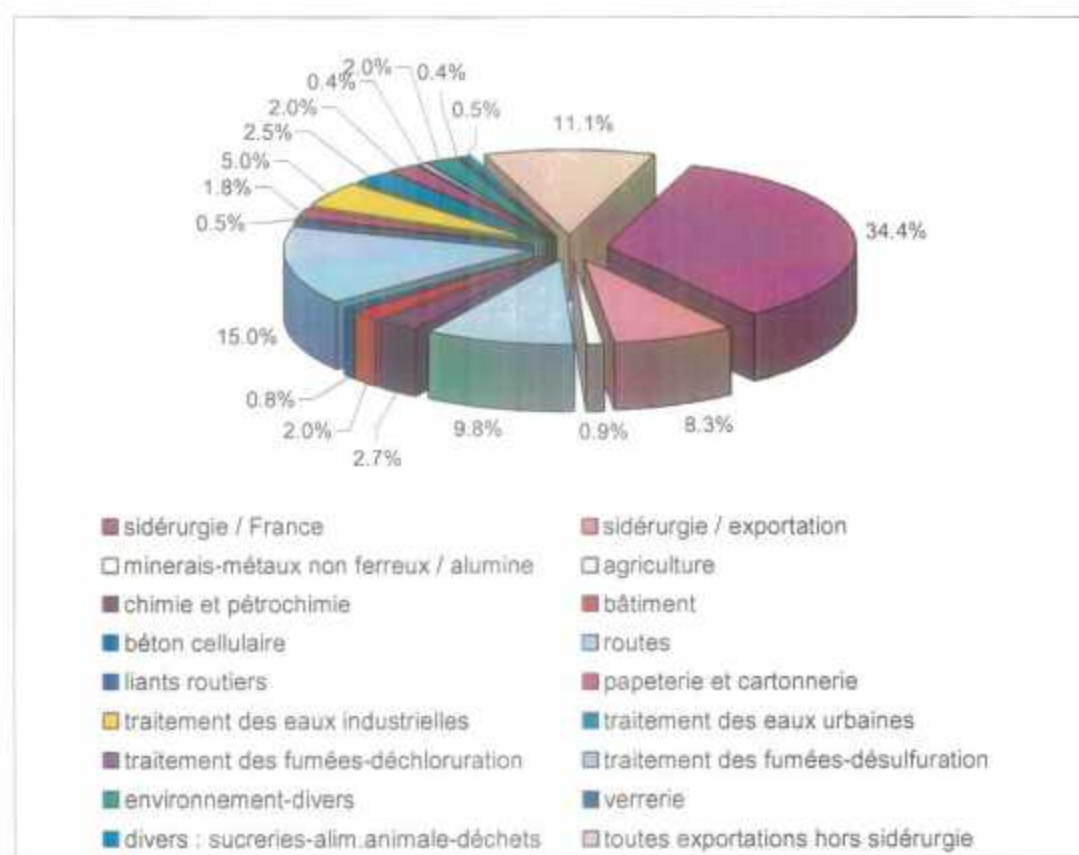
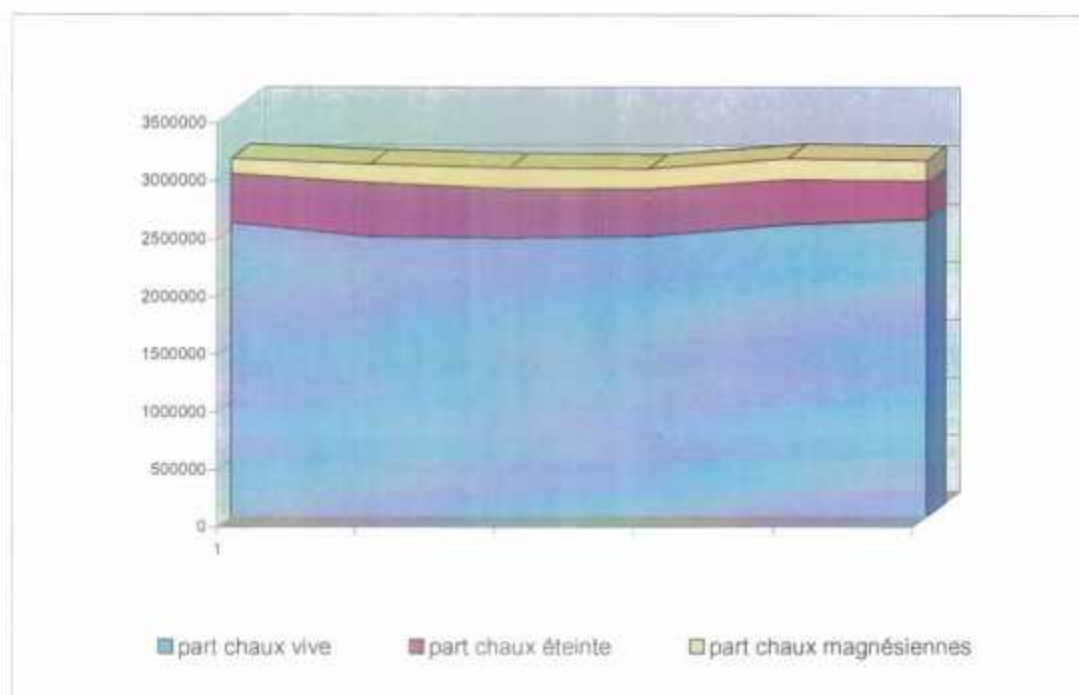
La répartition de la consommation de chaux en 1999 (Fig. 9) montre que le plus gros poste correspond à la sidérurgie (42.7 % avec l'exportation), suivi des usages routiers du BTP (15.0 %), de l'agriculture (9.8 %), et de la dépollution des eaux (7.5 %). L'analyse de détail de l'évolution des consommations par poste, met en évidence (Tabl. 8) :

- la stabilité du poste sidérurgie, mais avec une nette augmentation de la part des chaux magnésiennes ; au contraire du poste de la métallurgie des non-ferreux qui est passé en baisse
- la tendance positive du poste agriculture, alors qu'on attendait une croissance plus forte ; mais la part des chaux magnésiennes est en croissance relative soutenue
- la nette baisse de la consommation dans les sucreries ; probablement faut il envisager une autonomie croissante des sucriers, dont la consommation est pro parte hors statistiques
- la baisse dans le traitement des eaux industrielles, dont la signification serait une baisse de l'activité industrielle, ou le développement de produits de substitution ?
- le décollage difficile du poste environnement et divers

Carbonates calciques et magnésiens et produits dérivés à usage industriel et agricole

postes d'utilisation ou de ventilation chaux indifférenciées en tonnes	1994	%	1995	%	1996	%	1997	%	1998	%	1999	%
sidérurgie / France	1 020 374	32.9	1 022 265	33.4	987 052	32.6	1 059 472	35.1	1 087 901	35.0	1 062 116	34.4
sidérurgie / exportation	215 336	6.9	221 135	7.2	253 581	8.4	295 632	9.8	301 422	9.7	255 481	8.3
minerais-métaux non ferreux / alumine	53 806	1.7	61 446	2.0	68 790	2.3	69 127	2.3	41 937	1.3	28 551	0.9
agriculture	276 466	8.9	307 777	10.1	339 275	11.2	340 339	11.3	352 468	11.3	301 744	9.8
chimie et pétrochimie	80 955	2.6	79 581	2.6	61 709	2.0	59 106	2.0	54 883	1.8	84 165	2.7
bâtiment	102 213	3.3	101 812	3.3	56 886	1.9	56 168	1.9	57 840	1.9	62 678	2.0
béton cellulaire	0	0.0	0	0.0	35 403	1.2	28 212	0.9	22 190	0.7	25 617	0.8
routes	460 576	14.8	429 118	14.0	424 532	14.0	317 128	10.5	383 483	12.3	464 870	15.0
liants routiers	0	0.0	0	0.0	41 882	1.4	27 870	0.9	20 094	0.6	15 267	0.5
papeterie et cartonnerie	58 331	1.9	54 799	1.8	62 786	2.1	63 830	2.1	57 958	1.9	55 893	1.8
traitement des eaux industrielles	262 905	8.5	277 172	9.1	175 560	5.8	195 281	6.5	180 153	5.8	154 560	5.0
traitement des eaux urbaines	0	0.0	0	0.0	93 016	3.1	93 903	3.1	86 675	2.8	76 442	2.5
traitement des fumées-déchloration	63 894	2.1	87 436	2.9	53 553	1.8	62 454	2.1	62 422	2.0	61 556	2.0
traitement des fumées-désulfuration	41 781	1.3	43 058	1.4	60 030	2.0	29 945	1.0	24 749	0.8	12 313	0.4
environnement-divers	0	0.0	0	0.0	25 956	0.9	30 695	1.0	41 656	1.3	61 966	2.0
verrière	0	0.0	0	0.0	12 191	0.4	8 914	0.3	16 059	0.5	11 433	0.4
divers : sucreries-alim. animale-déchets...	237 642	7.7	138 964	4.5	15 814	0.5	10 563	0.4	18 158	0.6	14 616	0.5
toutes exportations hors sidérurgie	230 575	7.4	234 521	7.7	256 954	8.5	269 339	8.9	296 440	9.5	341 944	11.1
total	3 104 856	100.0	3 059 084	100.0	3 024 969	100.0	3 017 970	100.0	3 106 687	100.0	3 091 412	100.0
part chaux vive en tonnes												
sidérurgie / France	988 806	38.7	987 052	40.5	950 469	39.2	1 010 510	41.4	1 036 098	40.8	1 007 719	39.0
sidérurgie / exportation	213 838	8.4	221 135	9.1	250 641	10.3	294 088	12.1	299 892	11.8	255 481	9.9
minerais-métaux non ferreux / alumine	49 781	1.9	29 517	1.2	60 719	2.5	63 712	2.6	38 115	1.5	22 837	0.9
agriculture	193 797	7.6	197 084	8.1	207 487	8.6	220 092	9.0	226 395	8.9	181 993	7.0
chimie et pétrochimie	36 500	1.4	36 023	1.5	24 519	1.0	23 605	1.0	25 953	1.0	59 866	2.3
bâtiment	61 036	2.4	52 270	2.1	12 645	0.5	11 864	0.5	12 448	0.5	11 864	0.5
béton cellulaire	0	0.0	0	0.0	35 403	1.5	28 212	1.2	22 182	0.9	25 617	1.0
routes	456 686	17.9	427 128	17.5	419 707	17.3	314 214	12.9	380 090	15.0	462 275	17.9
liants routiers	0	0.0	0	0.0	40 102	1.7	25 986	1.1	20 094	0.8	15 267	0.6
papeterie et cartonnerie	55 371	2.2	52 269	2.1	59 229	2.4	59 851	2.5	57 088	2.2	54 742	2.1
traitement des eaux industrielles	95 057	3.7	92 881	3.8	61 536	2.5	72 125	3.0	74 694	2.9	58 113	2.2
traitement des eaux urbaines	0	0.0	0	0.0	25 864	1.1	32 527	1.3	32 978	1.3	33 452	1.3
traitement des fumées-déchloration	2 323	0.1	23 321	1.0	15 194	0.6	14 225	0.6	12 480	0.5	15 624	0.6
traitement des fumées-désulfuration	6 000	0.2	0	0.0	1 639	0.1	1 521	0.1	1 228	0.0	979	0.0
environnement-divers	0	0.0	0	0.0	11 813	0.5	12 759	0.5	15 890	0.6	31 827	1.2
verrière	0	0.0	0	0.0	11 953	0.5	8 716	0.4	15 674	0.6	11 080	0.4
divers : sucreries-alim. animale-déchets...	199 534	7.8	118 479	4.9	10 639	0.4	6 638	0.3	3 902	0.2	6 712	0.3
toutes exportations hors sidérurgie	197 565	7.7	199 918	8.2	225 080	9.3	238 441	9.9	262 818	10.4	328 696	12.7
sous total 1	2 566 294	100.0	2 436 977	100.0	2 424 639	100.0	2 439 086	100.0	2 538 019	100.0	2 584 144	100.0
part chaux éteinte en tonnes												
sidérurgie / France	3 694	0.9	4 423	1.0	4 493	1.1	6 893	1.7	7 623	2.0	11 727	3.6
sidérurgie / exportation	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
minerais-métaux non ferreux / alumine	4 025	1.0	31 929	7.0	5 651	1.3	5 415	1.3	3 822	1.0	5 714	1.7
agriculture	587	0.1	451	0.1	478	0.1	1 001	0.2	633	0.2	507	0.2
chimie et pétrochimie	44 455	10.7	42 134	9.2	33 954	8.1	36 491	8.8	28 908	7.5	22 664	6.9
bâtiment	36 669	8.8	44 979	9.8	39 590	9.5	39 486	9.8	41 030	10.7	46 602	14.1
béton cellulaire	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	8	0.0	0	0.0
routes	3 818	0.9	1 978	0.4	4 825	1.2	2 914	0.7	2 377	0.6	2 337	0.7
liants routiers	0	0.0	0	0.0	1 780	0.4	1 884	0.5	0	0.0	0	0.0
papeterie et cartonnerie	2 960	0.7	2 530	0.6	3 566	0.8	3 979	1.0	870	0.2	1 151	0.3
traitement des eaux industrielles	163 731	39.5	181 404	39.6	114 016	27.2	123 153	30.5	102 735	26.8	96 233	29.2
traitement des eaux urbaines	0	0.0	0	0.0	67 152	16.0	61 376	15.2	53 697	14.0	42 990	13.1
traitement des fumées-déchloration	61 571	14.8	63 403	13.9	38 359	9.2	48 229	11.9	49 942	13.0	44 673	13.6
traitement des fumées-désulfuration	35 781	8.6	43 058	9.4	58 391	13.9	28 424	7.0	23 520	6.1	11 334	3.4
environnement-divers	0	0.0	0	0.0	9 711	2.3	11 345	2.8	20 187	5.3	24 538	7.5
verrière	0	0.0	0	0.0	238	0.1	198	0.0	385	0.1	353	0.1
divers : sucreries-alim. animale-déchets...	24 633	5.9	6 739	1.5	5 148	1.2	3 617	0.9	14 197	3.7	6 953	2.1
toutes exportations hors sidérurgie	33 010	8.0	34 703	7.6	31 253	7.5	30 447	7.5	33 109	8.6	11 593	3.5
sous total 2	414 914	100.0	457 731	100.0	418 595	100.0	404 052	100.0	383 043	100.0	329 389	100.0
part chaux magnésiennes en tonnes												
sidérurgie / France	27 874	20.9	30 790	18.7	32 090	17.7	42 069	24.1	44 180	23.8	42 670	24.0
sidérurgie / exportation	1 500	1.1	0	0.0	2 940	1.6	1 544	0.9	1 530	0.8	0	0.0
minerais-métaux non ferreux / alumine	0	0.0	0	0.0	2 420	1.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0
agriculture	82 102	61.4	110 242	67.1	131 310	72.3	119 246	68.2	125 440	67.6	119 244	67.0
chimie et pétrochimie	0	0.0	1 424	0.9	3 236	1.8	10	0.0	22	0.0	1 635	0.9
bâtiment	4 508	3.4	4 563	2.8	4 651	2.6	4 818	2.8	4 362	2.3	4 412	2.5
béton cellulaire	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
routes	72	0.1	12	0.0	0	0.0	0	0.0	1 016	0.5	258	0.1
liants routiers	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
papeterie et cartonnerie	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
traitement des eaux industrielles	4 117	3.1	2 887	1.8	8	0.0	3	0.0	2 724	1.5	214	0.1
traitement des eaux urbaines	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
traitement des fumées-déchloration	0	0.0	712	0.4	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1 259	0.7
traitement des fumées-désulfuration	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
environnement-divers	0	0.0	0	0.0	4 432	2.4	6 591	3.8	5 779	3.1	5 601	3.1
verrière	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
divers : sucreries-alim. animale-déchets...	13 475	10.1	13 746	8.4	27	0.0	108	0.1	59	0.0	951	0.5
toutes exportations hors sidérurgie	0	0.0	0	0.0	621	0.3	451	0.3	513	0.3	1 655	0.9
sous total 3	133 648	100.0	164 376	100.0	181 736	100.0	174 840	100.0	185 625	100.0	177 899	100.0

Tabl. 8 : Production de chaux grasses et magnésiennes en France de 1994 à 1999 (source Chambre Syndicale)





Carte - Annexe 1B. Localisation de la production de chaux aériennes en France, et des principaux sites industriels consommateurs à l'échelle du 1 : 2 000 000^e

On dénombre 55 usines de production de chaux aériennes sur la carte présentée, dont une partie est répertoriée dans la liste du Syndicat national des producteurs. Les zones de concentration correspondent à presque toutes les grandes régions industrielles : Nord, Lorraine, Rhône-Alpes, Fos - Marseille, et à une certaine échelle la région sud-ouest de Bordeaux à Toulouse. Les cas de régions industrielles moins bien pourvues sont le mégapôle parisien et les pôles dispersés du Massif central, pour les raisons respectives d'insuffisances de carbonate de qualité et de gisement de proximité.

Les sites industriels consommateurs de chaux aériennes (et de produits crus calciques et magnésiens) qui sont portés sur la carte, ne fournissent pas un inventaire exhaustif. Néanmoins, les sites représentés font partie des filières grosses consommatrices : ce sont les centres sidérurgiques, l'usine d'alumine de Gardanne, et les usines chimiques de la filière carbonate de soude du groupe Solvay.

3.2.2 Principaux prix commerciaux

Les données disponibles sont abordées de façon très synthétique, car les prix dépendent en fait de quantité de normes et/ou de qualités précises. De plus, les prix fournis sont approximatifs en raison :

- de l'extrapolation des prix affichés de 1994 à 1996 (chiffres en italiques) par rapport aux prix 1997, sur la base d'une stabilité des prix sur la période 1994 - 1997
- d'une étude sommaire des prix de 1999

Les prix regroupés dans le tableau 9 ci-dessous fournissent néanmoins des ordres de grandeur satisfaisants.

Postes d'utilisation	Catégories distinguées	cas des prix CIF ou FOB	coûts 1994 en Ft	coûts 1995 en Ft	coûts 1996 en Ft	coûts 1997 en Ft	coûts 1998 en Ft	coûts 1999 en Ft
Carbonates pour l'industrie et l'agriculture	castines pour sidérurgie	x	50-250	50-250	50-250	50-250	50-250	50-250
	calcaire pour amendement	x	150-250	150-250	150-250	150-250	150-250	150-250
	calcaire blanc pour charges	x	300-400	300-400	300-400	300-400	300-400	300-400
	calcaire blanc pour couchage papier	x	600-800	600-800	600-800	600-800	600-800	600-800
Chaux grasses et magnésiennes	qualités courantes	x	500	500	500	500	500	500
	qualités pures	x	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Giobertite et magnésie	giobertite grecque	FOB	250-300	250-300	250-300	250-300	300-350	350-400
	magnésie chinoise calcinée à mort	FOB	500-750	500-750	500-750	500-750	600-800	800-1000
	magnésie industrielle	CIF	1600-2700	1600-2700	1600-2700	1600-2700	1600-2700	1600-2700
	magnésie agricole	CIF	1000-1200	1000-1200	1000-1200	1000-1200	1000-1200	700-800
Ciment et chaux hydraulique	liants hydrauliques non distingués	x	420-520	400-560	410-560	410-550	350-600	420-610
Tous réfractaires	prix moyen	x	6100	6200	7500	7150	6370	6560

Tableau 9 : Prix indicatifs de quelques produits carbonatés ou dérivés.

3.2.3 Flux commerciaux restreints et limitation des données comparées

Le faible coût général limite le transport de nombre de substances entrant dans les catégories explicites des produits pondéreux et de proximité : castines, amendements, chaux, liants hydrauliques, etc... Il a été dit, dès l'introduction à l'étude, que les carbonates calciques et magnésiens bruts ou crus, ou même cuits, sont des marchandises dont le faible coût limite l'importance du transport envisageable. Si cette caractéristique induit logiquement un circuit économique régional, elle induit tout aussi logiquement un flux transfrontalier pour les secteurs industriels ou agricoles excentrés, dont la région Nord lilloise, la Lorraine et l'Alsace sont de bons exemples. Avec la situation symétrique chez nos voisins européens, sont ainsi générés des circulations internationales pour des produits à faible coût.

Le « rayon d'action économique » est normalement augmenté en cas de nécessité, à l'exemple des poudres fines calciques et magnésiennes indispensables à certaines régions agricoles, ou en cas de survaleur ajoutée à l'exemple des produits cuits. Il sera maximum dans les exemples de la giobertite, des carbonates pour réfractaires, et a fortiori des produits élaborés réfractaires (magnésie ultra-pure, dolomies frittées...) ; le transport est alors envisageable sur des parcours internationaux et intercontinentaux à l'instar de nombre de minéraux industriels et autres minerais (concentrés) métalliques.

La traçabilité parfois insuffisante de certains produits (à l'exemple des regroupements simplificateurs de la normalisation douanière) a aussi contribué à limiter le nombre d'exemples, tout en considérant qu'une revue complète n'est pas le but du mémento. En conséquence, les flux commerciaux français traités concernent les produits traçables les plus significatifs.

3.2.4 Principaux flux commerciaux et consommations apparentes

Les flux de quelques catégories de matériaux carbonatés ou dérivés à usage industriel et agricole sur les six années considérées de 1994 à 1999 (base de données BRGM), figurent dans trois tableaux (Annexe 2 – Tabl. A – B – C). On notera ici les conventions suivantes :

- la balance (économique) fait la soustraction entre l'export (solde positif) et l'import (solde négatif)
- le volume (d'échange économique) fait l'addition de l'export et de l'import
- l'usage des abréviations nc pour non communiqué, et ns pour non significatif

① Dans le tableau traitant des **flux des calcaires et dolomies industriels et agricoles** (An. 2 - Tabl. A), huit pays sont ciblés en raison de leur activité commerciale privilégiée avec la France. Sur ces huit pays, le binôme Belgique - Luxembourg représente près de la moitié du volume commercial sur six ans, et l'Allemagne plus d'un quart, soit environ 73 % pour ces seuls pays. Le reste est partagé à raison de 3-4 % chacun avec l'Espagne, l'Italie, la Norvège, les Pays Bas et la Suisse. Entre un export total sur six ans à 5.3 Mt et un import total à 3.1 Mt, la balance est positive de 2.2 Mt. C'est grâce aux exports vers l'Allemagne (2.1 Mt, et solde + de 1.9 Mt), le Belgique - Luxembourg (1.3 Mt), la Norvège (pays éloigné mais très tributaire : 0.35 Mt), les Pays Bas (0.33 Mt), et la Suisse (0.23 Mt). Les principaux imports viennent de Belgique - Luxembourg (2.47 Mt), et accessoirement d'Allemagne (0.23 Mt), d'Italie (0.20 Mt), et d'Espagne (0.11 Mt).

La balance commerciale affiche un solde positif de 660 MF sur six ans. Ce commerce est pérenne avec tous les pays frontaliers : Allemagne, Belgique - Luxembourg, Espagne, Italie, Suisse (sauf en 1999), et il fait l'objet de relations entretenues avec des pays non frontaliers comme les Pays Bas et la Norvège.

② Dans le tableau traitant des **flux des chaux grasses et magnésiennes** (An. 2 - Tabl. B), les pays ciblés sont au nombre de dix ; l'Afrique du Sud en fait partie car elle a peut être démarré en 1999 un flux pérenne. Sur ces dix pays, l'Allemagne représente plus de la moitié du volume commercial sur six ans, et le binôme Belgique - Luxembourg environ 18 %, soit 72 % encore pour ces seuls pays ; les autres échanges notables se font avec l'Espagne, la Finlande et la Suède (0.2 à 0.5 Mt chacun), plus accessoirement avec l'Italie et le Royaume-Uni (0.1 Mt chacun). Entre un export total sur six ans à 3.6 Mt et un import total à 1.8 Mt, la balance est positive de 1.8 Mt. L'Allemagne absorbe 63 % de nos exportations, suivie de la Finlande (15 %), du Belgique - Luxembourg (9 %), et de la Suède (moins de 6 %). Les imports sont limités à pratiquement cinq pays, dont trois

principalement : Allemagne (37 %), Belgique - Luxembourg (35 %), Espagne (18 %) ; le reste vient d'Italie et du Royaume-Uni (environ 5 % chacun).

La balance commerciale affiche un solde positif de 789 MF sur six ans. Ce commerce est pérenne avec la plupart des pays frontaliers : Allemagne, Belgique - Luxembourg, Espagne, Italie, et il fait l'objet de relations entretenues avec des pays non frontaliers comme la Finlande, le Royaume-Uni, et la Suède. Des exportations ont eu lieu vers la Guinée de 1994 à 1996, et vers l'Australie en 1999.

③ Dans le tableau traitant des *flux de giobertite et de magnésie* (An. 2 - Tabl. C), douze pays sont ciblés ; bien qu'acteur sur ce marché pour la seule année 1996, le Royaume-Uni y figure en raison du volume échangé. On notera que la France n'étant pas productrice de giobertite, les exports indiqués concernent la seule magnésie. Entre un export total sur six ans à 0.1 Mt et un import total à 1.2 Mt, la balance est négative de 1.1 Mt. Concernant les volumes et les balances, on voit que les échanges français sont répartis sur un plus grand nombre de pays, et que la quasi-totalité est en solde négatif ; la Pologne fait exception avec un solde positif. Sur les douze pays mentionnés, cinq ont un volume plus important compris entre 20.0 % et 8.5 % : ce sont l'Espagne (20 %), la Grèce (12.1 %), la Corée du Nord (11.3 %), la Chine (9.4 %), et le couple Belgique - Luxembourg (8.5 %). Les exports (de magnésie) portent sur sept pays, dont les quatre principaux représentent 68.5 % du total : Belgique - Luxembourg (22 %), Pologne (21 %), Allemagne (17 %), Pays Bas (8 %), et Italie, Espagne, Royaume-Uni pour 3-4 % chacun. Les imports viennent en majorité de huit pays, dont cinq principaux : Espagne (21.4 %), Grèce (13.1 %), Corée du Nord (12.3 %), Chine (10.3 %), Belgique - Luxembourg (7.3 %).

La balance commerciale affiche un solde négatif de 1 116 MF sur six ans. Nos exports sont pérennes avec l'Allemagne et le binôme Belgique - Luxembourg, et ont commencé avec la Pologne en 1995, et avec les Pays Bas en 1996. Nos sources attitrées de magnésite sont la Chine et l'Espagne ; le flux venant de Corée du Nord a cessé fin 1997, et celui de Grèce fin 1998, tandis que le flux australien a démarré en 1998. Les imports de magnésie sont au compte principal de l'Allemagne et du binôme Belgique - Luxembourg.

Les consommations apparentes ont été calculées pour les trois postes précédents, plus les ajouts des postes « liants hydrauliques » et « tous réfractaires », dont l'évolution est intéressante en raison de la présence des chaux hydrauliques dans le premier, et des réfractaires d'origine carbonatée dans le second.

④ Les consommations apparentes reportées sur le tableau 10 sont déduites des éléments d'export - import figurant dans les tableaux A-B-C (Annexe 2) et des chiffres de production. L'évolution des quatre éléments dans chaque poste est illustrée, figures 10a-b-c-d-e.

	1994			1995			1996			1997			1998			1999			moyennes sur les six années	
ORIGINE	QUANTITE (kt)	VALEUR (MF)	COUT (F/l)	QUANTITE (kt)	VALEUR (MF)	COUT (F/l)	QUANTITE (kt)	VALEUR (MF)	COUT (F/l)	QUANTITE (kt)	VALEUR (MF)	COUT (F/l)	QUANTITE (kt)	VALEUR (MF)	COUT (F/l)	QUANTITE (kt)	VALEUR (MF)	COUT (F/l)	QUANTITE (kt)	VALEUR (MF)
Calcaire et dolomie pour l'industrie et l'agriculture																				
Production	12 364	1 464	118	13 591	1 552	114	13 729	1 579	115	14 592	1 706	117	14 387	1 706	119	13 800	1 665	121	13 744	1 612
Importations	486	108	223	471	128	271	508	130	255	514	162	316	553	191	346	570	182	319	517	150
Exportations	1 062	306	288	1 009	280	277	837	239	286	766	238	311	789	243	308	860	256	297	887	260
Consommation apparente	11 788	1 266	107	13 054	1 400	107	13 401	1 470	110	14 340	1 630	114	14 151	1 655	117	13 511	1 581	118	13 374	1 502
Chaux grasses et magnésiennes																				
Production	3 105	1 552	500	3 059	1 530	500	3 025	1 513	500	3 018	1 509	500	3 106	1 553	500	3 094	1 547	500	3 068	1 534
Importations	267	112	418	241	102	425	250	99	395	331	141	427	375	156	417	384	166	401	308	129
Exportations	535	222	415	528	212	403	632	242	383	651	259	397	650	319	492	645	310	481	607	261
Consommation apparente	2 837	1 442	508	2 773	1 420	512	2 642	1 369	518	2 698	1 392	516	2 831	1 390	491	2 833	1 402	495	2 769	1 402
Giobertite et magnésie																				
Production	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Importations	197	243	1235	220	257	1166	196	243	1239	194	246	1268	209	248	1186	167	219	1315	197	243
Exportations	17	69	4053	15	67	4404	22	61	2714	21	55	2638	17	47	2763	13	43	3336	18	57
Consommation apparente	180	175	969	205	191	928	174	182	1049	173	191	1102	193	202	1047	154	176	1144	180	186
Ciment et chaux hydraulique																				
Production	20 189	10 394	515	19 895	11 055	556	18 509	10 394	562	18 609	10 265	552	18 867	11 091	588	19 527	11 961	613	19 266	10 880
Importations	1 447	611	422	1 522	611	402	1 747	724	414	2 185	895	410	2 290	913	398	2 810	1 107	394	2 000	810
Exportations	2 390	1 095	458	2 280	1 106	484	1 923	1 047	545	2 378	1 214	511	1 883	669	355	1 363	574	421	2 037	951
Consommation apparente	19 246	9 910	515	19 134	10 560	552	18 333	10 071	549	18 416	9 946	540	19 274	11 335	588	20 974	12 494	596	19 230	10 719
Tous réfractaires																				
Production	356	2 176	6114	399	2 475	6205	365	2 741	7517	398	2 845	7152	407	2 591	6372	374	2 453	6554	380	2 547
Importations	103	821	8006	287	809	2815	91	779	8538	108	830	7687	112	792	7088	92	705	7686	132	789
Exportations	143	1 209	8470	153	1 411	9224	150	1 714	11442	161	1 671	10350	155	1 407	9095	166	1 329	8011	155	1 457
Consommation apparente	316	1 789	5684	530	1 873	3512	306	1 806	5900	344	2 005	5821	364	1 976	5434	300	1 829	6094	361	1 880

Tabl. 10 : Productions, flux et consommations apparentes de quelques substances minérales en France de 1994 à 1999 (source BRGM / Direction des Douanes)

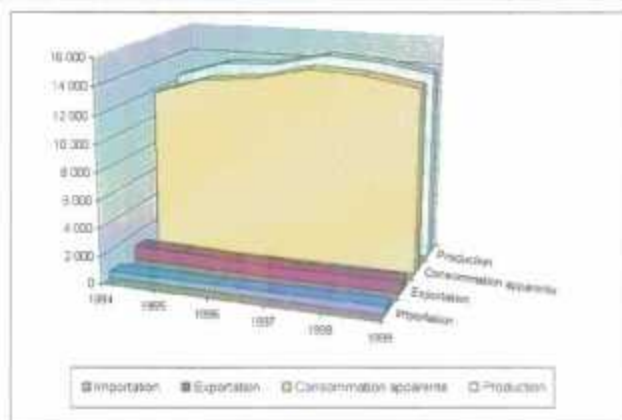


Figure 10-a : Production, consommation et flux de calcaire et dolomite pour l'industrie et l'agriculture, en France de 1994 à 1999

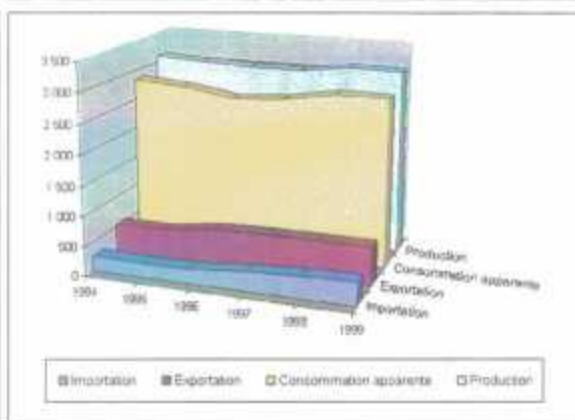


Figure 10-b : Production, consommation et flux des chaux grasses et magnésiennes, en France de 1994 à 1999

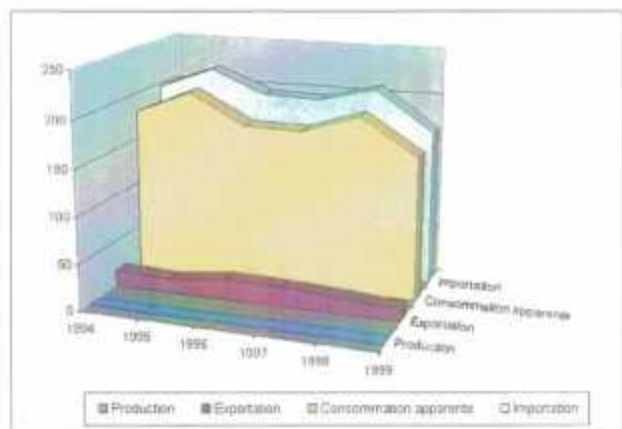


Figure 10-c : Production, consommation et flux de giobertite et de magnésie, en France de 1994 à 1999

Unité de masse commune : kilotonne

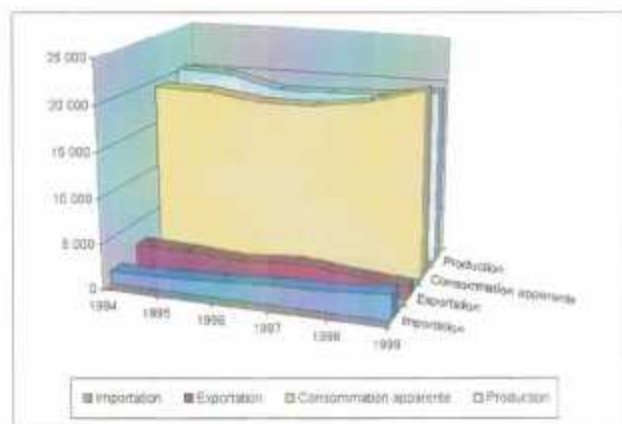


Figure 10-d : Production, consommation et flux de ciment et chaux hydraulique, en France de 1994 à 1999

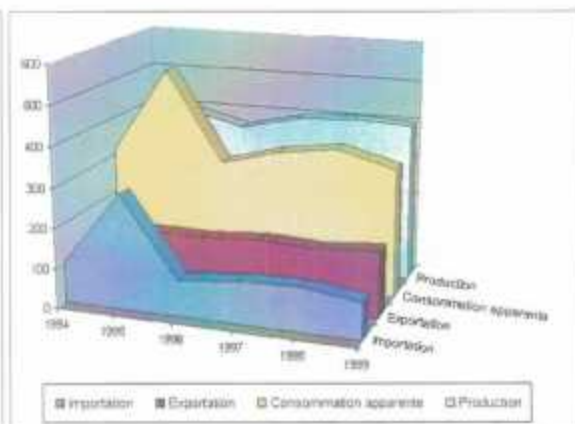


Figure 10-e : Production, consommation et flux de produits réfractaires (tous confondus), en France de 1994 à 1999

La consommation apparente annuelle de calcaire et dolomie à usage industriel et agricole est de 11.8 Mt à 14.3 Mt maximum. Elle a progressé par paliers, 1995-1996 et 1997-1998, avant le net fléchissement de 1999. Le tonnage annuel moyen consommé sur six ans est de 13.5 Mt, pour une valeur annuelle moyenne de 1.5 milliards de Francs. Exportations et importations étant assez stables et limitées en volume, on voit que la production s'ajuste sur la tendance générale positive de la consommation (Fig. 10-a).

La consommation apparente annuelle de chaux grasses et magnésiennes est globalement stable, s'établissant autour de la moyenne 2.77 Mt ; la fourchette est étroite, et comprise entre 2.6 Mt et 2.8 Mt (c'est à dire de - 2.5 % à + 4.7 %). Au tonnage annuel moyen sur six ans de 2.8 Mt, correspond une valeur annuelle moyenne de 1.15 milliards de Francs. Avec une production et des exportations quasi-stables, ce sont les importations qui compensent la tendance positive de la consommation (Fig. 10-b).

La consommation apparente annuelle de giobertite et de magnésie se montre instable dans une fourchette comprise entre 0.15 Mt à 0.20 Mt. On note que la consommation 1999 est la plus faible enregistrée sur les six années considérées. Le tonnage annuel moyen sur six ans est de 0.18 Mt, pour une valeur annuelle moyenne de 0.19 milliards de Francs. En l'absence de production et avec des exportations étales, le graphique montre l'ajustement précis des importations sur la consommation (Fig. 10-c).

La consommation apparente annuelle de ciment et de chaux hydraulique est assez stable autour de la moyenne à 19.2 Mt jusqu'en 1998. La fourchette est comprise entre 18.3 Mt et 21.0 Mt, c'est à dire de - 4.7 % à + 9.4 % (hausse 1999). Au tonnage annuel moyen sur six ans de 19.2 Mt, correspond la valeur annuelle moyenne de 10.72 milliards de Francs. L'année 1999 semble confirmer les tendances apparues l'année précédente : avec une production stagnante, l'évolution positive de la consommation est assumée par la diminution des exportations et le relèvement des importations (Fig. 10-d).

Mis à part le pic enregistré en 1995 à 0.53 Mt, la consommation apparente annuelle de réfractaires est globalement stable dans une étroite fourchette autour de 0.33 Mt. Le tonnage annuel moyen sur six ans est de 0.36 Mt, pour une valeur annuelle moyenne de 1.88 milliards de Francs. Avec une production stable les dernières années, le fléchissement de la consommation en 1999 justifie les tendances inversées des exportations (en hausse) et des importations (en baisse) (Fig. 10-e).

3.2.5 Evolution comparée du chiffre d'affaire, des valeurs des produits et des effectifs

A défaut de disposer de toutes les données économiques détaillées, sont comparés ici les chiffres de l'UNICEM (Tabl. 11) et de sa branche des matériaux carbonatés de carrière à usage industriel et agricole (cf Tabl. 10 et Fig. 11a-b-c-d-e).

On observe au niveau de l'ensemble UNICEM, à partir d'un palier de production à 514 000 Kt et de la baisse brutale de 1996, une hausse continue depuis 1997 (+ 2.7% en 1997 et 1998 ; + 4.4% en 1999, mais à périmètre élargi : cf 3.2.1). Au niveau de la branche ciblée, la tendance est à la hausse du tonnage de 1994 à 1997, suivie d'un tassement en 1998 et 1999 autour de 14 000 Kt. Les flux (modérés) montrent dans les deux cas un

	Tonnages en kilotonnes	1994	1995	1996	1997	1998	1999*
Ensemble UNICEM	Production	514 000	514 000	476 000	489 000	502 000	524 000
	Importation	10 080	8 799	9 933	10 788	11 833	13 576
	dont CEE	9 292	7 959	9 305	9 859	10 542	12 461
	Exportation	17 392	17 617	16 166	17 336	16 998	17 045
	dont CEE	12 740	12 554	11 801	12 938	12 331	11 885
	Consommation apparente	506 688	505 182	469 767	482 452	496 835	520 531
Branche calcaire et dolomie pour l'industrie et l'agriculture	Production	12 364	13 591	13 729	14 592	14 387	13 800
	Importation	486	471	508	514	553	570
	Exportation	1 062	1 009	837	766	789	860
	Consommation apparente	11 788	13 054	13 401	14 340	14 151	13 511
	CA-HT ou valeur en MF						
Ensemble UNICEM	Production	58 354	59 012	55 779	57 571	59 175	65 454
	Importation	3 334	3 508	3 476	3 795	4 182	4 808
	dont CEE	2 879	3 016	3 019	3 229	3 602	4 154
	Exportation	3 739	3 928	3 845	3 768	3 873	3 907
	dont CEE	2 737	2 833	2 754	2 730	2 771	2 734
	Consommation apparente	57 949	58 592	55 410	57 598	59 484	66 355
Branche calcaire et dolomie pour l'industrie et l'agriculture	Production	1 464	1 552	1 579	1 706	1 706	1 665
	Importation	108	128	130	162	191	182
	Exportation	306	280	239	238	243	256
	Consommation apparente	1 266	1 400	1 470	1 630	1 655	1 591
	Effectifs						
UNICEM	Production	69 400	69 520	68 214	65 961	65 538	66 417
Branche calc. et dol. à usage industriel-agricole	Production	1 812	1 858	1 880	1 770	1 765	1 818

Tableau 11 : Production, chiffre d'affaire ou valeur, et effectif comparés de l'UNICEM et de sa branche des calcaires et dolomies d'usage industriel et agricole

* Les résultats de l'année 1999 intègrent les postes granulats de recyclage et cheminées d'intérieur, et ne sont donc pas strictement comparables aux résultats antérieurs

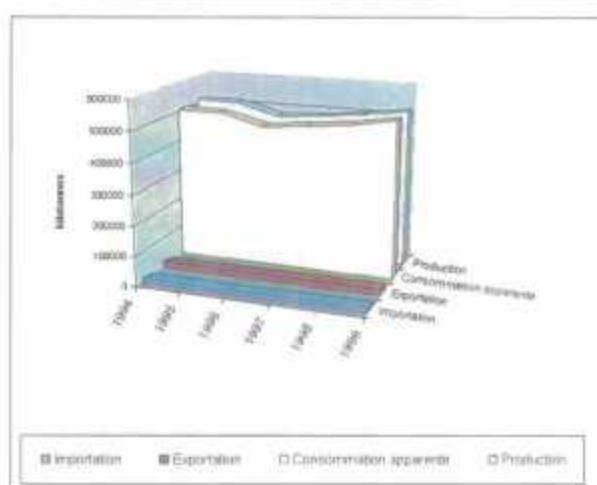


Fig. 11a : Production, flux et consommation apparente à l'échelle globale UNICEM

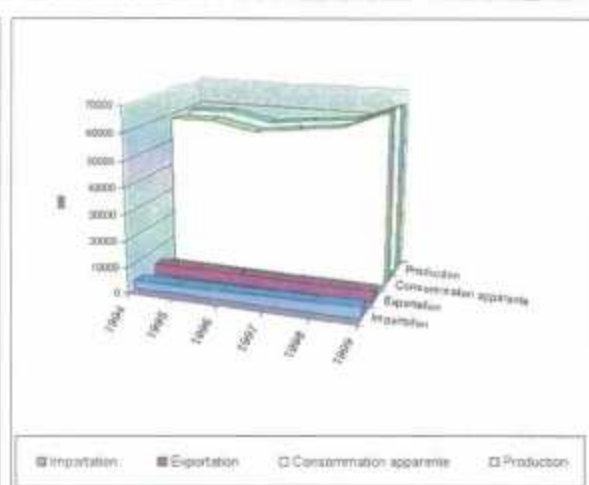


Fig. 11b : Chiffre d'affaire HT et valeurs de flux et de consommation apparente à l'échelle globale UNICEM

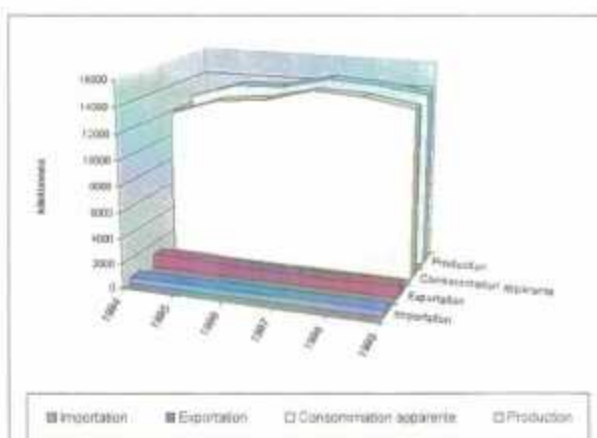


Fig. 11c : Production, flux et consommation apparente de la branche des calcaires et dolomies d'usage industriel et agricole

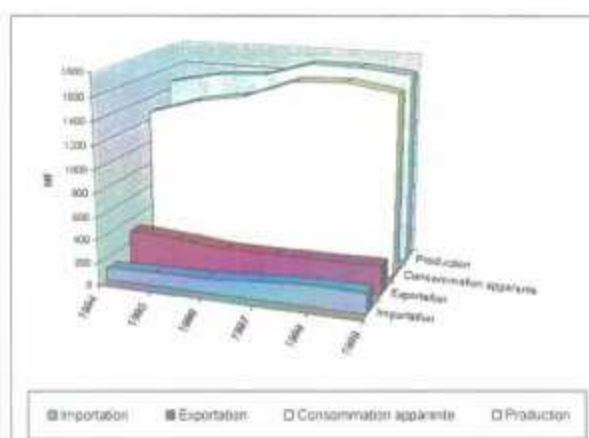


Fig. 11d : Chiffre d'affaire HT et valeurs de flux et de consommation apparente de la branche des calcaires et dolomies d'usage industriel et agricole

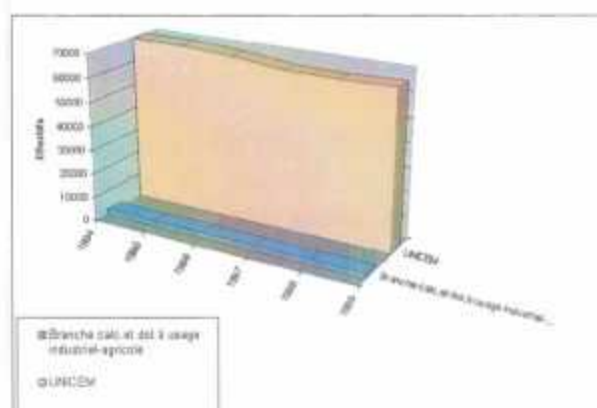


Fig. 11e : Effectifs comparés de l'UNICEM et de sa branche des calcaires et dolomies d'usage industriel et agricole

grignotage de la balance positive du fait de la hausse continue à l'importation et de la stagnation à l'exportation. En conséquence du bilan quasi-neutre des flux, la production continue de suivre au plus près la demande interne.

L'évolution du chiffre d'affaire de l'UNICEM réplique à peu près celle de la production (vers 58-59 milliards de francs), avec un effet de changement de périmètre 1999 plus accentué (de 59 à 65 milliards de francs). En comparaison, la branche ciblée montre une hausse plus affirmée jusqu'à 1997, grâce au levier de la progression rapide de valeur, avant un palier vers 1.7 milliard de francs.

Enfin, les effectifs au niveau des activités globales de l'UNICEM, en baisse continue de 1995 à 1998, amorcent une reprise en 1999 (+ 1.3 %). En comparaison, les effectifs de la branche ciblée sont assez constants autour du chiffre de 1 800 personnes, avec une fluctuation de 2 à 4 % en plus ou en moins.

3.2.6 Producteurs sur le sol français

Les producteurs de carbonates crus et/ou de chaux aériennes œuvrant sur le territoire national, sont mentionnés en annexe sous forme de listes sans prétention d'exhaustivité (Annexes 3-4).

3.3 Données économiques ciblées du marché international

Conséquence du foisonnement de la filière des carbonates calciques et magnésiens et des traçabilités insuffisantes, les données comparées internationales sont ciblées sur trois produits d'intérêt technique et économique mieux circonscrit, qui sont la chaux aérienne, la magnésite naturelle, et la magnésie fondue réfractaire.

3.3.1 Production mondiale de chaux aérienne

Les productions des principaux pays producteurs retenus par l'USGS, sont présentées dans le tableau 12. Leur comparaison est significative, même si les données ne sont pas strictement équivalentes car certaines comptent seulement la chaux vive, et d'autres incluent a contrario la chaux hydraulique. De plus, il faut savoir que les ratios de production hors statistiques ne sont pas partout identiques ; à titre d'exemple, aux USA ces dernières années, la production hors statistiques était estimée à 11 %, en comparaison des 17 % de la situation française.

Au premier rang des pays producteurs figurent la Chine et les Etats-Unis avec des productions respectives en 1999 de 22.0 et 20.5 Mt. Le groupe suivant des producteurs fournissant de 8.2 à 5.7 Mt comprend par ordre décroissant : le Japon, l'Allemagne, la

Pays	rem.	Productions annuelles de chaux en kilotonnes						part % sur an. 1999
		1994	1995	1996	1997	1998	1999	
Afrique du Sud		1 597	1 743	1 518	1 514	1 500	1 600	1.4
Allemagne		8 511	8 000	7 570	7 600	7 600	7 800	6.6
Australie		1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1.3
Autriche	R1	1 850	1 908	1 990	1 900	1 900	1 900	1.6
Belgique		1 750	1 800	1 800	1 750	1 750	1 800	1.5
Brésil		5 700	5 700	5 700	5 700	5 700	5 700	4.8
Bulgarie	R1	665	952	1 000	1 200	1 100	1 100	0.9
Canada		2 390	2 398	2 402	2 477	2 514	2 500	2.1
Chine		19 500	20 000	20 000	20 500	21 000	22 000	18.6
Colombie		1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1 300	1.1
Etats Unis		17 400	18 500	19 100	19 700	20 100	20 500	17.3
France	R2	3 105	3 059	3 025	3 018	3 107	3 091	2.6
Italie	R3	3 500	3 500	3 500	3 500	3 500	3 500	3.0
Japon	R4	7 712	7 871	7 744	8 104	8 100	8 200	6.9
Mexique		6 500	6 580	6 600	6 600	6 600	6 600	5.6
Pologne		2 516	2 526	2 363	2 500	2 500	2 500	2.1
Roumanie		1 621	1 763	1 712	1 750	1 700	1 750	1.5
Royaume Uni		2 500	2 500	2 500	2 500	2 500	2 500	2.1
Russie	R1	9 000	9 263	7 822	7 626	7 000	7 000	5.9
Tchèque Rép.	R1	1 206	1 186	1 176	1 200	1 200	1 200	1.0
Autres pays		13 300	13 000	13 000	13 300	14 100	14 300	12.1
Total mondial		113 123	115 049	113 322	115 239	116 271	118 341	100.0
<i>idem arrondi</i>		113 000	115 000	113 000	115 000	116 000	118 000	

R1 : chiffres en italiques extrapolés

R2 : chiffres ajustés sur données Chambre Syndicale Nationale

R3 : comprend la chaux hydraulique

R4 : chaux vive seulement

Tableau 12 : Production mondiale de chaux aériennes de 1994 à 1999 (source USGS)

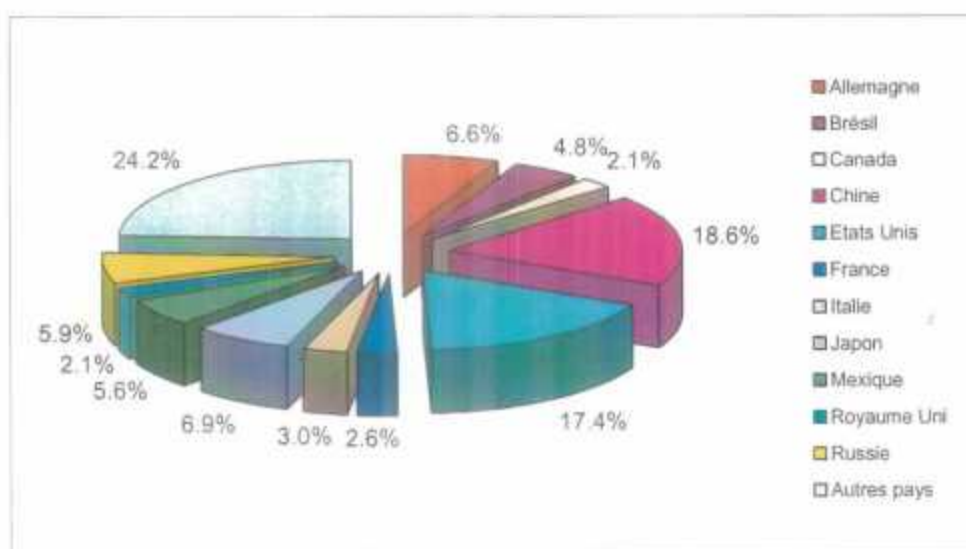


Figure 12 : Répartition de la production mondiale de chaux aériennes en 1999 (source USGS)

Russie, le Mexique, le Brésil. La production française (3.1 Mt) se situe vers la tête des producteurs de troisième rang.

Sur l'année 1999, Chine et Etats-Unis représentent à eux seuls 35.9 % de la production mondiale, et les cinq pays suivants 29.8 % (Fig. 12). Soit 65.7 % au total des sept pays, c'est à dire les deux tiers de la production mondiale.

3.3.2 Production mondiale de magnésite naturelle

La production mondiale de magnésite naturelle, de 1994 à 1999, est présentée dans le tableau 13 (données USGS). La France n'étant pas productrice, elle doit importer ; la magnésite qui alimente l'usine Péchiney Electro-Métallurgie de Marignac produisant du magnésium métal, provient d'Espagne.

De 8.7 Mt en 1994, la production mondiale a atteint dès 1995 un palier, qui se situe dans la fourchette 10.6-11.8 Mt. Sept pays représentent 82.9 % du total mondial de l'année 1999 (Fig. 13). Avec de 2.50 à 0.65 Mt annuels (de 23 % à 6 % en parts de marché), les plus gros producteurs sont la Turquie, la Chine, la Corée du Nord, la Russie, la Slovaquie, l'Autriche, et la Grèce. Les six pays suivants représentent 15.7 % du marché mondial : ce sont l'Espagne, l'Inde, le Brésil, l'Australie, le Canada et les Etats-Unis. De petites quantités sont produites en Afrique du Sud, en Iran, en Pologne, en Serbie et au Montenegro, etc... .

Cependant, la production de magnésite ne reflète pas la capacité de production de composés de base magnésiens (magnésie caustique, magnésie réfractaire, hydroxyde, carbonate purifié, sulfate) d'un pays. C'est en particulier le cas des Etats-Unis, où la fabrication des ces composés est à 62 % d'origine eau de mer et sels d'évaporites (sur la totalité de la production nationale + imports en matières premières). Mais sur la seule production nationale, cette part serait de 89.8 à 87.8 %, soit une part de 10.2 à 12.2 % pour la magnésite.

Les réserves mondiales de magnésite naturelle sont principalement localisées en Asie, si on considère que la Russie s'étend principalement sur ce continent. En 1998, ces réserves étaient estimées à 2 580 Mt, et ainsi réparties :

	Mt		Mt
Chine	745	Brésil	45
Russie	650	Grèce	30
Corée du Nord	445	Inde	30
Australie	90	Reste du monde	480
Turquie	65		

Pays	rem.	Productions annuelles de magnésite en tonnes						part % sur an. 1999
		1994	1995	1996	1997	1998	1999	
Afrique du Sud		69 668	84 639	71 358	76 869	74 300	75 000	0.7
Australie		286 000	263 249	237 707	245 192	360 113	195 000	1.8
Autriche		681 000	784 000	624 000	650 000	650 000	650 000	6.0
Brésil	R1	280 000	315 978	305 737	294 629	308 300	310 000	2.9
Canada	R2	180 000	180 000	180 000	180 000	180 000	180 000	1.7
Chine		1 200 000	2 050 000	2 100 000	2 400 000	2 400 000	2 450 000	22.6
Corée du Nord		1 600 000	1 600 000	1 600 000	1 600 000	1 600 000	1 000 000	9.2
Espagne		400 000	491 397	483 728	500 000	500 000	500 000	4.6
Etats Unis	R3	119 900	127 800	156 300	162 100	145 800	147 600	1.4
Grèce		200 000	565 720	682 346	623 050	650 000	650 000	6.0
Inde		333 368	335 189	373 306	362 929	355 033	360 000	3.3
Iran		40 000	40 000	40 000	40 000	40 000	40 000	0.4
Pologne		16 400	21 500	19 300	6 403	5 745	6 000	0.1
Russie		700 000	1 000 000	1 000 000	1 040 000	851 845	900 000	8.3
Serbie-Monténégro		68 000	75 000	89 000	95 000	100 000	30 000	0.3
Slovaquie		1 200 000	814 500	824 800	863 600	877 840	850 000	7.8
Turquie		1 279 614	1 928 064	2 339 138	1 409 768	2 703 343	2 500 000	23.0
Autres pays		18 537	33 938	25 261	28 538	18 952	18 475	0.2
Total mondial		8 672 487	10 710 974	11 151 979	10 577 878	11 821 271	10 862 975	100.0
<i>idem arrondi</i>		8 700 000	10 700 000	11 200 000	10 600 000	11 800 000	10 900 000	

R1 : produit concentré

R2 : dolomite magnésienne et brucite mises en équivalent $MgCO_3$

R3 : secret statistique : estimation BRGM en italiques

Tableau 13 : Production mondiale de magnésite naturelle de 1994 à 1999 (source USGS)

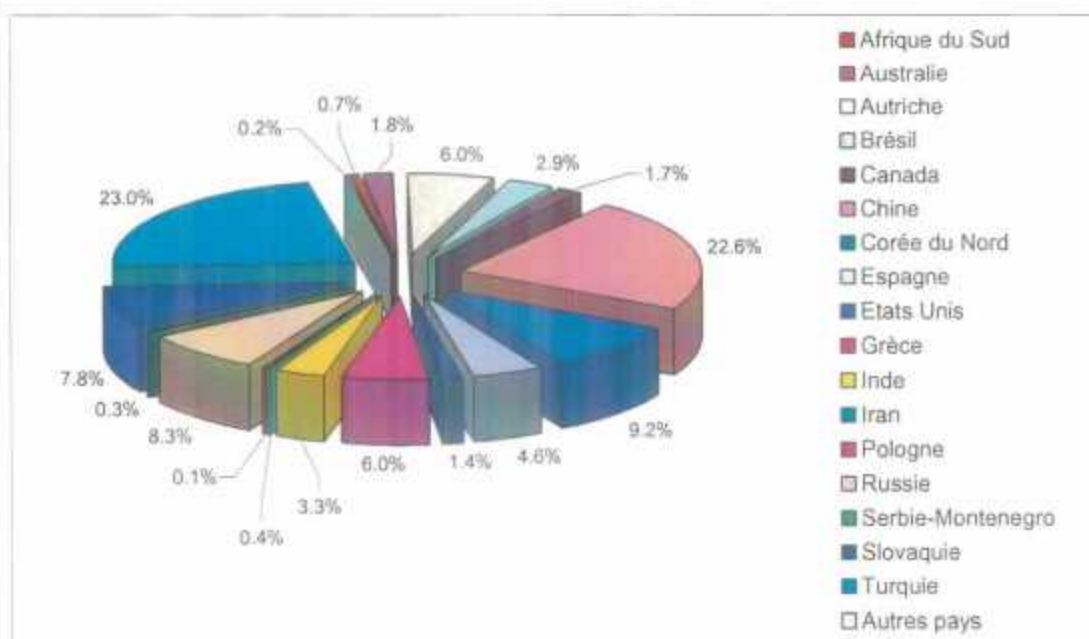


Figure 13 : Répartition de la production mondiale de magnésite naturelle en 1999 (source USGS)

3.3.3 Production mondiale de magnésie fondue

La magnésie fondue est un réfractaire et isolant électrique de top niveau. Très résistante, elle entre dans la fabrication de réfractaires blindés, de réfractaires au carbone, et d'isolants électriques. Sa fabrication à partir de magnésite et/ou de magnésie dans des fours électriques portés à très haute température (cf 4.2.5), engendre un coût énergétique très important : il faut de 3 500 à 4 500 kwh par tonne de magnésie fondue produite. Aussi, les pays autosuffisants au plan énergétique et possédant leurs propres sources de minerais, sont-ils avantagés. La production mondiale en 1999 est estimée à 0.66 Mt.

La Chine a effectué une entrée en force dans le marché de la magnésie fondue au début des années 1990. Actuellement, les fondeurs chinois produisent annuellement 0.5 Mt de magnésie fondue, dont plus de la moitié est exportée (50 à 60 %). Il existe une centaine d'opérateurs chinois, dont une quinzaine a une certaine importance, avec des productions individuelles de 10 000 à 60 000 tonnes. Face à l'émergence des produits chinois, le marché s'est considérablement modifié. D'abord, l'abaissement des prix dû aux exportations chinoises, de pair avec une disponibilité accrue, ont ouvert au produit des créneaux d'utilisation jusque là fermés ou négligés, favorisant une demande croissante. Ensuite, l'effectif des acteurs du marché non-chinois s'est resserré, pour atteindre une vingtaine de fondeurs actuellement, qui produisent au total 150 000 à 160 000 tonnes par an ; le principal fondeur non-chinois est l'australien Queensland Magnesia avec 17 500 tonnes produites.

Si la magnésie chinoise est mondialement imbattable en terme de coût, les fondeurs non-chinois exploitent le créneau de la qualité supérieure. En général, les produits chinois vendus de 300 à 550 US\$ la tonne, sont purs à 96.0-97.5 %, et comportent des cristaux de périclase de 400-600 microns. Les produits des autres acteurs du marché ont des cristaux de périclase de taille > 600-700 microns et une pureté supérieure, alliées à une densité plus élevée ; les produits de très haute qualité à pureté > 99 % peuvent atteindre plus de 1 200 US\$ la tonne.

On note qu'en France, Péchiney Electro-Métallurgie a abandonné la fabrication de magnésie de qualité « électrique » en 1996.

4. APERÇU DES TRAITEMENTS, UTILISATIONS, ET SPECIFICATIONS INDUSTRIELLES

4.1 Modes de traitement

4.1.1 Des matériaux carbonatés bruts vers les produits crus

Tous les matériaux carbonatés extraits passent par des traitements essentiellement mécaniques pour être broyés et criblés. En amont de la chaîne, un lavage, pour enlever les argiles par exemple, peut être nécessaire ; mais à ce niveau, la réduction granulométrique ne nécessite pas en général de séchage. Pour obtenir des grains d'une certaine finesse, du micron à quelques dizaines de microns, le broyage est possible par « voie sèche », ou a contrario parfois, par « voie humide ».

L'extraction et le fractionnement des produits jusqu'à la granulométrie souhaitée se fait d'amont en aval par la cascade de moyens suivante :

- abattage à l'explosif et/ou au marteau hydraulique ou enlèvement direct si le matériau est déjà débité (éluvions calcaires par exemple)
- débitage au marteau hydraulique, ou par « pétardage » sur place des très gros blocs
- concassage ; concasseurs rotatifs à rouleaux - mâchoires, à mâchoires, à boulets
- broyage ; broyeurs à mâchoires, à billes, cylindriques à rouleaux
- pulvérisation - micronisation ; broyeurs à cônes emboîtés espacés, à billes, à anneaux, et procédé par interaction avec un abrasif au sein d'une pulpe

Le procédé de micronisation s'effectue par « voie humide » dans le cas des calcaires crayeux. Ils sont introduits (réduits en grains d'1mm) avec 15 % d'eau dans des trommels pour constituer une pulpe ; celle-ci est brassée avec du sable abrasif jusqu'à atteindre la finesse désirée (jusqu'à moins de 1 micron pour certaines utilisations en charge).

La séparation granulométrique se pratique par criblage (égrillage, scalpage), par centrifugation, par aspiration (classificateurs dynamiques à air), en fonction de la taille des particules. Les fines non récupérées sont fréquemment éliminées par cyclonage. La séparation par liqueur dense de composants différents est rare ; elle s'applique par exemple pour la séparation giobertite – dolomie.

4.1.2 Des produits crus vers les produits cuits et frittés

Une partie des produits carbonatés va être utilisée après une *calcination* (facteurs intervenants : température, durée de cuisson, paliers possibles), qui confère au nouveau matériau des propriétés particulières. La fabrication de clinker de ciment étant hors périmètre d'étude, nous allons considérer la fabrication de la chaux (toutes les variétés), qui demande une température de calcination entre 900° et 1 100°, et la fabrication des carbonates frittés, qui demande une température d'ultra-calcination ou frittage, de 1 300° à 2 000°.

La chaux est obtenue par cuisson de carbonates à moins de 1 300°. C'est un produit si particulier, par son utilisation depuis des millénaires et sa variété de finalités, qu'elle fait l'objet d'un chapitre spécial (chapitre 4.2).

Le processus de frittage s'observe à partir d'une température de cuisson supérieure à 1 300°, et correspond pour le matériau à une sorte de vitrification obtenue par début de fusion ; elle s'accompagne d'une perte de porosité alliée à un gain de cohésion ou de compacité. Les matériaux calco-magnésiens et magnésiens ainsi traités, qu'ils soient au départ carbonates ou oxydes, apportent certaines qualités de résistance mécanique et/ou thermique, ou de mauvaise conductivité électrique (isolants). Très utilisées dans la fabrication des réfractaires, la dolomie frittée est généralement calcinée entre 1 800°/1 900° et 2 000°, alors que la magnésie frittée -encore appelée magnésie calcinée à mort - est obtenue à plus de 1 450°/1 500°.

4.1.3 Filière chimique et traitements spécifiques

D'une façon générale, crus ou cuits, oxydes ou hydroxydes, les matériaux calciques carbonatés sont utilisés pour leur propriété alcaline alliée à une température modérée de déstabilisation et/ou de fusion. Cette facilité d'échanges ioniques permet, soit les substitutions entre carbonates, sels de calcium et eau (où la molécule CO_2 tient une place particulière), soit la stabilisation, souvent sous forme silicatée (silice par apport d'oxygène, ou silicates de calcium par apport de calcium).

Les matériaux calco-magnésiens ont un intérêt direct par le magnésium contenu, soit en tant que métal valorisé pour ses qualités physico-chimiques, soit en tant qu'oligo-élément dont la fonction biochimique est indispensable à la vie animale et végétale. Mais ils présentent un second intérêt, lié à la présence d'autres métaux (Mn, Sr, Cd, Si...) ; sélectionnés, ils améliorent dans certaines limites les réactions et leur rendement, par un rôle de catalyseur.

C'est bien évidemment la chaux qui sert de produit de base à la filière chimique, qui va utiliser son alcalinité (base forte) et sa réactivité. La chaux intervient plus particulièrement comme :

- agent d'échange de CO_2 et d' H_2O grâce à la réversibilité des réactions chimiques
- plus généralement, réactif (base forte) apportant ses ions dans la synthèse de molécules
- fondant, servant encore à purifier en piégeant les impuretés
- contrôleur de pH
- régénérateur de réactifs plus onéreux
- agent coagulant ou flocculant d'impuretés colloïdales ou neutralisant d'ions par formation de précipités insolubles
- désinfectant, grâce au caractère caustique induit par sa basicité

Les produits en poudre peuvent recevoir des traitements de surface spécifiques : poudres rendues hydrophobes par association d'acides gras ou chaux traitées pour éviter les émissions de poussière lors des manutentions et de la mise en oeuvre.

4.1.4 Transport, conditionnement, manutention

Tous les produits carbonatés, ainsi que les chaux vives ou éteintes, font partie des produits pondéreux (densités supérieures à 1 tonne par m³), et sont considérés comme une marchandise générale, qui n'entre pas dans la Réglementation du Transport de Marchandises Dangereuses (RTMD). Cependant, les chaux vives sont des matières présentant une certaine dangerosité.

La chaîne logistique des produits carbonatés comprend :

- les produits en vrac, ou « bennés », qui peuvent être transportés sans précaution particulière, sinon des bâches protégeant des intempéries, ou évitant poussière et pertes ; c'est l'exemple de la chaux en roche qui peut être criblée ou non (fourchette granulométrie 5-120 mm), et de tous les produits crus
- les produits en vrac qui nécessitent un transport protégé, en citernes (route ou chemin de fer), avec transvasements pneumatiques par des tubes souples ; c'est l'exemple de la chaux vive finement broyée, pour éviter son hydratation, et de la chaux éteinte pour sa granulométrie très fine
- le stockage de poudres libres en silos nécessite une fluidisation pour parer au colmatage
- le conditionnement en toutes tailles des produits (de 20-25 kg aux big bags d'une tonne), fûts métalliques, sacs de plastique, sacs textiles ou de papier fort pour les petites quantités ; la chaux vive exige des emballages étanches plus chers
- la mise sur palettes des conditionnements qui s'y prêtent, facilitant en particulier la manutention du départ d'usine à l'arrivée chez les utilisateurs

On peut noter que les mesures prises à la fabrication pour éviter les émissions de poussière, sont étendues à toute la chaîne logistique. Sont ainsi généralisés l'utilisation de capots posés sur les trémies et les bandes transporteuses, et le confinement des parties de la chaîne où les sources d'émission sont possibles (par fermeture isolante et bardage, ou mise sous bâches et plastiques). Pour les transvasements, sont utilisés des manches dans le cas de chargement gravitaire ou des tubes dans le cas de transvasement pneumatique par air pulsé.

4.2 Cas de la chaux

4.2.1 Préhistoire et histoire d'un matériau artificiel extraordinaire

La chaux est un matériau tellement courant qu'on en oublie ses multiples variétés, rôles et capacités. La chaux utilisée dans la construction était connue dès la Haute Antiquité (Mésopotamie, Egypte, civilisation de l'Indus, Chine...), soit 4 000 ans av. JC, et son apparition pourrait remonter à 8 000 ans av. JC. Puis les civilisations grecque, romaine, maya, inca, indienne Mogul, etc... (sur trois des cinq continents), en ont fait un usage intensif, élargissant parfois son emploi à l'assèchement des voiries et aux amendements. L'usage s'est entretenu par la suite. A partir du XVIII^e siècle et la description de ses

propriétés physico-chimiques, son utilisation devient plus rationnelle et reste abondante jusqu'à l'apparition des liants artificiels au milieu du XIX^e siècle.

Dans l'histoire contemporaine, les qualités qui font de la chaux un produit aussi indispensable, sont l'alliance de sa polyvalence et de son faible coût, avec sa facilité de préparation et d'utilisation. La chaux a un champ d'action extrêmement étendu, notamment en métallurgie, industrie chimique minérale ou organique, industrie du BTP, agriculture et agro-alimentaire, assainissement des eaux.

Si la chaux est utilisée majoritairement dans les fonderies de métaux ferreux ou non ferreux, dans l'agriculture et la voirie, elle a été remise en valeur dans son secteur de prédilection qui est la construction traditionnelle. Et son rôle clé dans le traitement et l'épuration des eaux et fumées est en constant renforcement.

4.2.2 Fabrication et classification des chaux

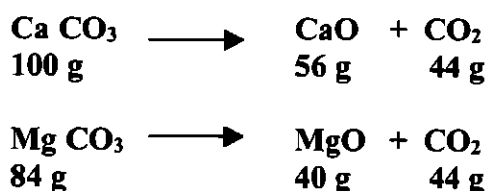
Le premier clivage fondamental de la classification concerne la composition chimique du produit de base, qui va permettre la définition des deux grands groupes de chaux :

- les calcaires renfermant de 65 à 99 % de Ca CO_3 / Mg CO_3 , plus quelques autres substances, principalement des oxydes (voir plus loin), **sans argile**, permettent de produire les **chaux aériennes**
- les calcaires renfermant de 40 à 95 % de Ca CO_3 , plus quelques autres substances, principalement des oxydes (voir plus loin), **avec de l'argile** (5 à 22 %, en général 15 à 20 %), permettent de produire les **chaux hydrauliques**

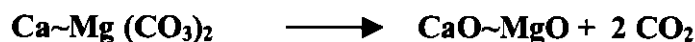
➤ Chaux aériennes

☛ Chaux aériennes vives

La chaux est obtenue par calcination d'un calcaire pur ou d'un carbonate à teneur en $[\text{CaO}, \text{MgO}]$ définie ou de giobertite, à une température supérieure à 800°. Si la réaction de dissociation commence vers 400°-500°, la fourchette des températures de calcination rapide industrielle est 800°-1 300° (plus généralement 900°-1 100°), car au-dessus, les propriétés acquises sont différentes. Si on considère la calcination s'appliquant à l'espèce minérale (calcite ou giobertite) ou la roche quasi-pure (calcaire pur, giobertite pure), la réaction chimique donnant respectivement chaux calcique et magnésie est la suivante :



La calcination de carbonates intermédiaires magnésiens (calcaires magnésiens, dolomies), produit à la fois magnésie et chaux calcique entrant dans la composition des chaux magnésiennes ou chaux dolomitiques :



Dans tous les cas de figure, la chaux produite est dite « vive » du fait de sa réactivité en présence d'eau (réhydratation), la réaction étant fortement exothermique ; il résulte des considérations faites sur le degré de cuisson que les chaux obtenues aux températures les plus basses sont plus poreuses (et de densité plus faible), donc plus réactives. La qualification de chaux « aérienne » tient à sa capacité naturelle à réagir à l'air en durcissant, par recarbonatation grâce au CO_2 présent. Sensible à l'humidité de l'air, c'est un matériau très hygroscopique qui doit être protégé.

De la composition du carbonate brut dépend la composition et la nature de la chaux produite. Les constituants des chaux sont scindés en composants majeurs et mineurs. A noter que MgO peut figurer en tant que majeur ou mineur, et que peuvent apparaître des « incuits », reliquats du minéral d'origine, et à l'inverse des « surcuits », parcelles carbonisées (constituant le grappier, qui est éliminé ; une tolérance pour les particules non éliminées existe). Voici la liste des composants potentiels :

Composants majeurs

oxyde de calcium	: CaO	oxyde de magnésium	: MgO
------------------	----------------	--------------------	----------------

Composants mineurs

calcite (incuit)	: Ca CO_3	giobertite (incuit)	: Mg CO_3
silice	: SiO_2	oxyde de fer ferrique	: Fe_2O_3
oxyde de sodium	: Na_2O	oxyde de potassium	: K_2O
oxyde d'alumine	: Al_2O_3	sulfate de calcium	: Ca SO_4
oxyde de magnésium	: MgO		

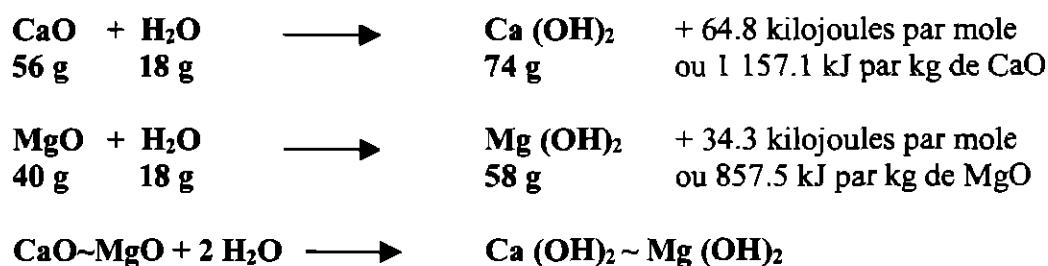
On distingue ainsi dans les chaux calciques :

- les chaux vives pures ou chimiquement pures, produites à partir de calcaires à 99 % de Ca CO_3 , à teneur en $\text{CaO} \geq 97 \%$
- les chaux vives grasses, produites à partir de calcaires à 90 % de Ca CO_3 minimum, qui ont une teneur $97 \% > \text{CaO} \geq 85 \%$
- les chaux vives maigres, produites à partir de calcaires à 75-90 % de Ca CO_3 , à teneur en $\text{CaO} < 85 \%$

Pour la magnésie obtenue à température modérée, on parle de magnésie caustique ou encore de magnésie légère, à teneur en $\text{MgO} < 85 \%$, tandis qu'une magnésie obtenue à haute température est dite calcinée à mort, et présente une teneur en $\text{MgO} > 85 \%$.

☛ Chaux aériennes éteintes

Ces chaux éteintes (on dit aussi fleur de chaux ou chaux blutée, ou encore chaux hydratée) sont produites par l'extinction de chaux vives mises en présence d'eau, qui se fait avec un fort dégagement de chaleur (réaction exothermique). Les produits obtenus sont des hydroxydes :



La composition des chaux éteintes est symétrique de la composition de départ des chaux vives, pour une transformation réussie à 100 %. Le flux thermique produit par la première réaction est de 64.8 kilojoules par mole ou encore de 15.5 kilocalories par mole. Notons ici que les chaux vives mises en présence d'eau, s'éteignent mais ne durcissent pas.

La classification utilisée pour les chaux éteintes est adaptée de celle des chaux vives, et cette fois par le dosage de Ca (OH)_2 :

- chaux éteintes pures ou chimiquement pures, produites à partir de calcaires à 99 % de Ca CO_3 , à teneur en $\text{Ca (OH)}_2 \geq 96$ %
- chaux éteintes grasses, produites à partir de calcaires à 90 % de Ca CO_3 minimum, qui ont une teneur $96 \% > \text{Ca (OH)}_2 \geq 85$ %
- chaux éteintes maigres, produites à partir de calcaires à 75-90 % de Ca CO_3 , à teneur en $\text{Ca (OH)}_2 < 85$ %

➤ Chaux hydrauliques (naturelles)

Les calcaires argileux qui se prêtent à la transformation (moins de 95 % de Ca CO_3), doivent être calcinés à une température supérieure à 1 200°, mais inférieure à la température de frittage. Se forment au cours de la calcination des silicates complexes de calcium et de magnésium, ainsi que des sels doubles Ca-Al, Ca-Fe, en quantité suffisante pour conférer au produit la propriété de faire prise après hydratation. Ces chaux durcissent également à l'air. La présence de magnésium est limitée à quelques % en raison de la formation de périclase (CaO), qui est instable et augmente de volume en présence d'eau.

D'où la dénomination de chaux hydrauliques ou chaux hydrauliques naturelles (CHN, et NHL en anglais), par opposition aux chaux dites improprement « hydrauliques artificielles », qui résultent du broyage simultané de clinker de ciment et de matériaux inertes.

Les chaux hydrauliques sont intermédiaires entre les chaux aériennes et les ciments. Elles diffèrent des chaux aériennes maigres, moins par leur teneur importante en éléments argileux, que par leur plus fort degré de cuisson (température plus élevée et durée plus longue).

La teneur croissante en éléments argileux de la roche mère, et par contrecoup sa teneur décroissante en calcium, va déterminer une classification en :

- chaux faiblement hydrauliques, provenant de la calcination de calcaires renfermant 90 à 95 % de Ca CO_3 , à teneur en $\text{CaO} > 85 \%$; la durée de prise, après gâchage avec l'eau, est importante (15 à 20 jours)
- chaux moyennement hydrauliques, provenant de la calcination de calcaires renfermant 75 à 90 % de Ca CO_3 , à teneur en CaO de 60 à 85 % ; la durée de prise, après gâchage avec l'eau, est moyenne (2 à 15 jours)
- chaux éminemment hydrauliques, provenant de la calcination de calcaires renfermant 40 à 75 % de Ca CO_3 , à teneur en CaO de 50 à 60 % ; la durée de prise, après gâchage avec l'eau, est rapide (moins de 2 jours)

4.2.3 Mise en œuvre industrielle de la fabrication

Les fours de fabrication de chaux sont verticaux-fixes (comme les fours primitifs), ou horizontaux-rotatifs (Figures 14a-b-c). Les matériaux originaux sont concassés à 140 mm maximum, puis criblés. Les grosses castines (40-140 mm) passent dans les fours verticaux fixes, les moyennes (5-40 mm) vont dans les fours horizontaux rotatifs, et les fines < 5 mm sont vendues crues.

Les fours verticaux, aujourd'hui à cuve cylindrique d'acier tapissée de briques réfractaires, sont à principe de fonctionnement simple :

- le four en activité, de l'air est insufflé du bas vers le haut pour activer la combustion ;
- l'alimentation mixte en carbonate (castines) et combustibles (coke, charbon) est faite par le haut du four
- en haut, les produits sont préchauffés par le flux ascendant de gaz chauds
- au milieu, le combustible brûle en calcinant le carbonate qui libère du CO_2
- en bas, la chaux est refroidie par l'air extérieur injecté, puis elle est évacuée par bande transporteuse ou camion
- les émissions de gaz, dont le CO_2 , et de poussière sont canalisées au sommet du four pour passer dans un dépoussiéreur

Ils fonctionnent à températures généralement comprises entre 900° et $1\ 250^\circ$. Leur capacité est aujourd'hui de l'ordre de 600 à 800 tonnes/jour, grâce aux améliorations apportées pour augmenter le rendement :

- par l'utilisation de combustible liquide (fuel lourd) ou gazeux (gaz naturel), à la place du coke traditionnel
- par le couplage de deux cuves fonctionnant en cycles alternés, qui optimisent le rendement énergétique

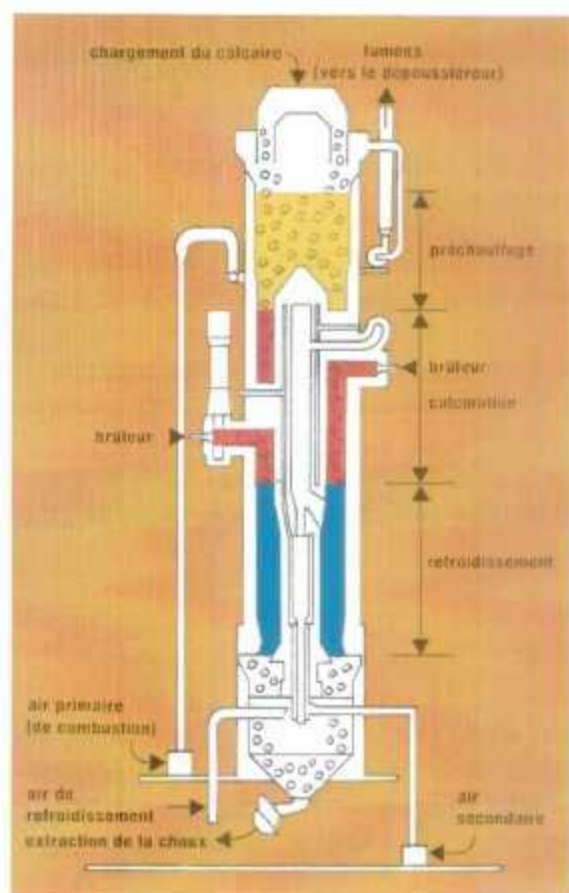


Figure 14-a : Four à chaux vertical de type basique

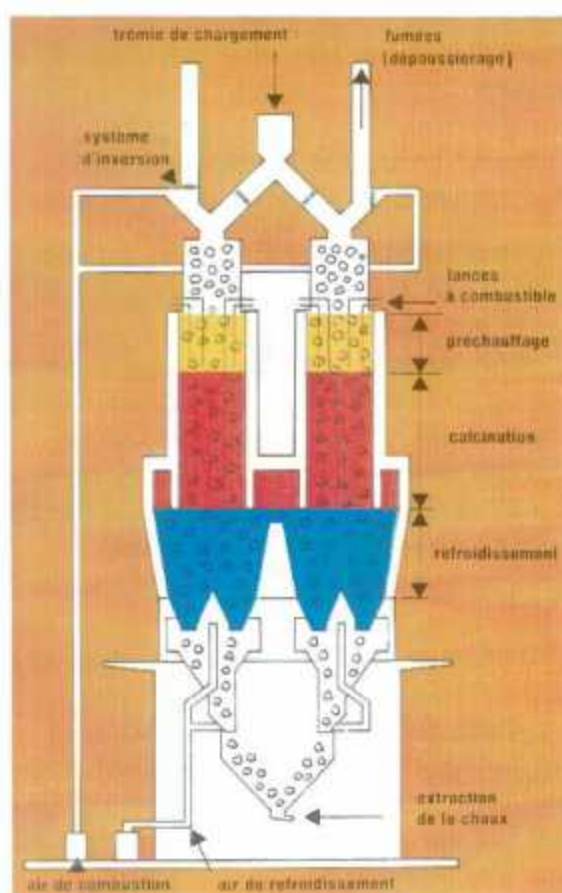


Figure 14-b : Double-four vertical à cycles alternés

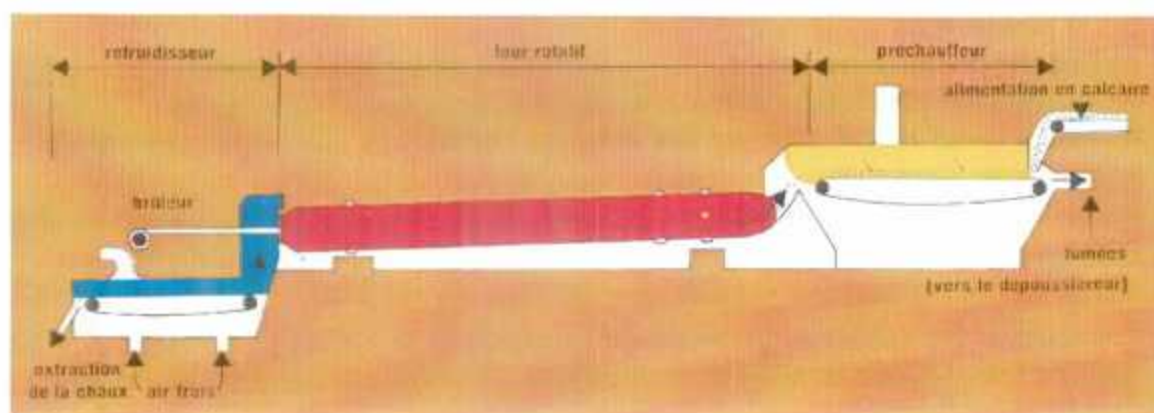


Figure 14-c : Four rotatif

Illustrations reproduites avec l'aimable autorisation de la Lettre de l'Industrie de la Chaux (CSNPCGM) et de la société Balthazard & Cotte

Les fours horizontaux-rotatifs sont inspirés des fours à ciment ; ils sont en fait faiblement inclinés pour faciliter l'écoulement gravitaire des produits. Le procédé est dit à « contre courant », car le carbonate est introduit en amont, tandis que le flux thermique vient de l'aval. L'air est insufflé à niveau de la sortie pour remonter vers la tête en entraînant les fumées. Le mouvement continu rotatif permet une décarbonatation maximale de l'ensemble du matériau, et évite sa fusion instantanée, à l'origine des incidents de collage ou d'accrochage dans les fours verticaux. Ils fonctionnent à températures comprises entre 1 100° et 1 300°, et leur capacité est de l'ordre de 1 000 tonnes/jour. Ils ont encore l'avantage de brûler toutes sortes de combustibles, solides, liquides, gazeux, ou encore mixtes. Mais leur rendement thermique est médiocre en comparaison des fours verticaux, du fait de leur mobilité qui les prive de revêtement isolant performant.

Sur le coût de revient des chaux, intervient en premier lieu la matière première : il faut près de deux tonnes de calcaire pour produire une tonne de chaux. Le coût de transport des crus étant limité par l'installation des fours à chaux à proximité des carrières, le coût énergétique interviendrait pour 30 à 40 % du prix de revient. En France, en 1994, les combustibles servant dans les fours à chaux sont à 71 % du gaz naturel, à 23 % du coke, et à 6 % du fuel lourd.

La fabrication de magnésie à partir du carbonate se fait à températures de 800° à 1 000° pour la qualité standard (dite magnésie caustique), dont la réactivité est un critère important justifiant, par exemple, ses usages agricoles (amendement) et métallurgiques (fondant). La fabrication de magnésie à température supérieure à 1 000° est réservée aux usages en réfractaire basique (cf 4.2.5).

La magnésie est également produite à partir d'eau de mer, par réaction à la chaux précipitant de l'hydroxyde de magnésium : $Mg(OH)_2$, qui est ensuite calciné. La Compagnie des Salins du Midi a ainsi produit de la magnésie sur son site de Salin de Giraud (13) jusqu'en 1992.

L'extinction des chaux se fait dans des hydrateurs. Avec un ajustement de la quantité d'eau nécessaire, c'est à dire dans les proportions de la réaction chimique de base, le produit obtenu reste sec. Cet ajustement des quantités est réalisé avant le mélange chaux-eau ; pour la chaux, est utilisée une vis sans fin à vitesse contrôlée.

La transformation en hydroxydes dans les cuves des hydrateurs se pratique en portant le mélange de chaux et d'eau à 110° ; le flux thermique généré est de 1 157 kilojoules par kilogramme de chaux calcique produite, et de 858 kilojoules dans le cas de magnésie. La capacité des hydrateurs est de 8 à 20 tonnes/heure ; il faut moins d'1 m³ d'eau par tonne de CaO (hydratation + vapeur libérée).

Les chaux hydrauliques sont produites par les cimentiers dans les mêmes fours rotatifs, mais à températures de 1 200°-1 300°, c'est à dire juste au-dessous de la température de frittage réel.

Le traitement de la chaux produite, qui se pratique dès la sortie des fours, correspond principalement à la réduction mécanique des castines pour en faire des produits finis ou intermédiaires. Cela comprend un concassage et/ou broyage pour obtenir les classes

granulométriques souhaitées. Ces classes courantes, dans l'exemple de l'agriculture, sont (en mm) 0/2, 2/5, 5/20, 20/60 ; et dans le cas de broyage fin sous 80 microns, le passant est compris entre 20 et 99 %.

En cours de fabrication industrielle, une part déterminée de la chaux vive produite est aussitôt stockée en sûreté, tandis que le reste est dirigé vers l'hydrateur pour obtenir la variété éteinte, qui est stockée à son tour (Fig. 15 d'ensemble du traitement).

Les chaux peuvent recevoir des traitements de surface physico-chimiques qui se font dès l'usine. Il peut s'agir de les rendre hydrophobes par association d'acides gras ou d'éviter l'émission de poussière. Dans l'exemple de la « chaux sans poussière » (Proviacal, brevet déposé du groupe Lhoist), le produit est obtenu à partir d'une chaux vive 0/2 mm répondant à la norme NF P 98-101 et garde son efficacité pendant toute la manutention et le stockage. Lors de la mise en œuvre, le taux de réduction d'émission de poussière est variable de 65 % à 92 %. Le traitement disparaît aussitôt la chaux mise en présence d'eau dans le sol et il est réputé ne pas modifier les caractéristiques d'origine de la chaux, et ne pas apporter de nocivité.

Le pilotage des unités industrielles se doit d'être précisé en quelques lignes, car il en va de la qualité des produits fabriqués, et de l'ergonomie générale. On peut dire que la plupart de ces unités sont entièrement automatisées, permettant la régulation de tous les paramètres en jeu, notamment dans le cas des fours horizontaux-rotatifs. Car aux normes des produits recherchés, doivent correspondre certaines caractéristiques présentant une dispersion minimale. Le contrôle de qualité se pratique en continu, par les analyses adéquates aux différents stades d'élaboration des produits.

4.2.4 Caractéristiques physico-chimiques et indices utilisés les plus courants

Teneur en CaO (ou MgO) disponible (ou actif ou libre), dosable par acidimétrie ou complexométrie ; le CaO total correspond à la quantité de CaO théorique, y compris le calcium combiné à l'état de sel, tandis que le CaO disponible l'exclut.

Surface spécifique, qui correspond à la surface de contact du matériau par unité de volume, et prend donc globalement en compte les caractéristiques physico-chimiques du matériau et son état fractionné (granulométrie) ; elle influe sur la densité apparente et sur la réactivité

Densité apparente, c'est la masse volumique de la chaux en vrac. Pour les chaux vives cette densité apparente est dans la fourchette 700-1 200 kg/m³, et pour les chaux éteintes dans la fourchette 300-650 kg/m³.

Indice d'extinction ou réactivité, qui correspond à l'élévation de température provoquée par l'adjonction d'eau, mesurée sur un échantillon de 150 g dans des conditions précises de laboratoire (vase Dewar de 750 cm³ avec couvercle hermétique et isolant, granulométrie de

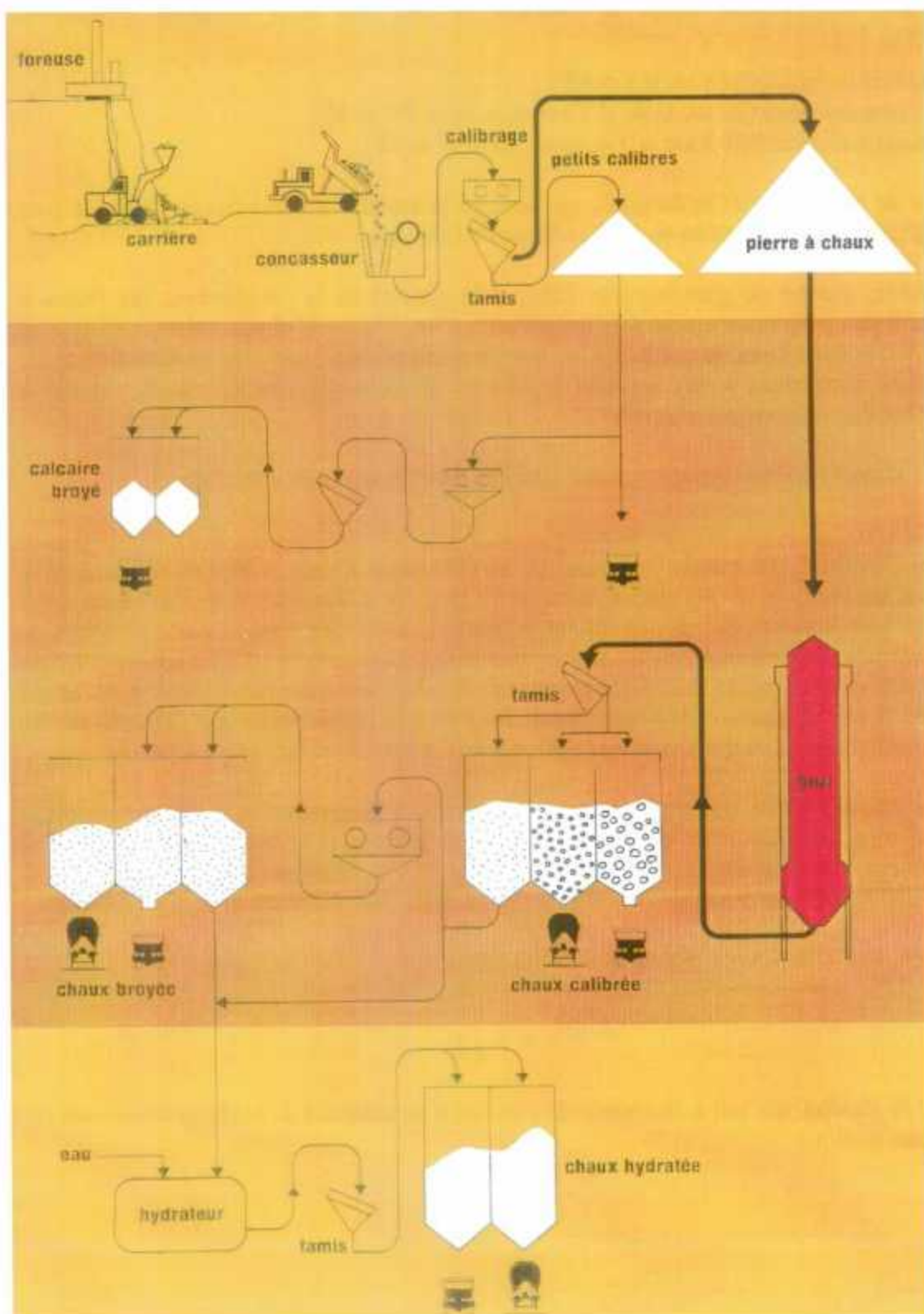


Figure 15 : Schéma général de fabrication de la chaux

Illustration reproduite avec l'aimable autorisation de la Lettre de l'Industrie de la Chaux (CSNPCGM) et de la société Balthazard & Cotte

la chaux < 2 mm, 600 ml d'eau à température de départ 20° +/- 0.5°, agitateur à 300 tours/mn, thermomètre, temps de réaction 10 mn). Les trois catégories distinguées sont (Fig. 16) :

- extinction - réactivité vive si T > 40°
- extinction - réactivité modérée si T compris entre 15° et 40°
- extinction - réactivité lente si T compris entre 0° et 15°

Indice de pH (potentiel hydrogène), qui mesure la basicité d'une solution de chaux pour une solution à concentration de CaO croissante (Tabl. 14).

Solubilité, d'ordre de grandeur très faible. Elle dépend de la composition des chaux et évolue à peu près inversement à la température (Fig. 17). Si la chaux calcique éteinte est peu soluble dans l'eau, la magnésie éteinte est pratiquement insoluble. Notons que le lait de chaux correspond à une solution sursaturée. Entre catégories de chaux, l'ordre de solubilité décroissante est le suivant :

Chaux aérienne éteinte > chaux aérienne vive >> chaux dolomitique

Indice d'activité, qui mesure la vitesse de neutralisation d'eaux acides en fonction de la quantité de chaux et du pH atteint. Il existe de grandes différences entre des chaux vives suivant leur cuisson (T° et durée), et a fortiori entre des chaux vives, éteintes, et hydrauliques. Si le calcaire cru est l'agent alcalin le moins coûteux, il a un pouvoir basique faible et il est bien moins réactif que les chaux ; en effet, son potentiel disponible est utilisé à 60-80 % lors de réaction de neutralisation avec de l'acide sulfurique par exemple, du fait de l'« emballage » des grains par une pellicule de Ca SO₄ inactivant leur partie centrale.

Indice d'hydraulicité, qui correspond à l'étalonnage de la proportion d'éléments argileux qui ont réagi avec le CaO à la cuisson, car plus abondants, la prise sera plus rapide. Il se calcule par une formule exposée ci-dessous. Les chaux faiblement hydrauliques ont un indice de 0.10 à 0.16, les moyennement de 0.16 à 0.40, les éminemment de 0.40 à 0.50.

$$L = \frac{\% \text{ Si O}_2 + \% \text{ Al}_2 \text{ O}_3 + \% \text{ Fe}_2 \text{ O}_3}{\% \text{ CaO} + \% \text{ MgO}}$$

Degré de fluidité, qui sert à déterminer la capacité d'écoulement de la chaux transvasée par voie pneumatique.

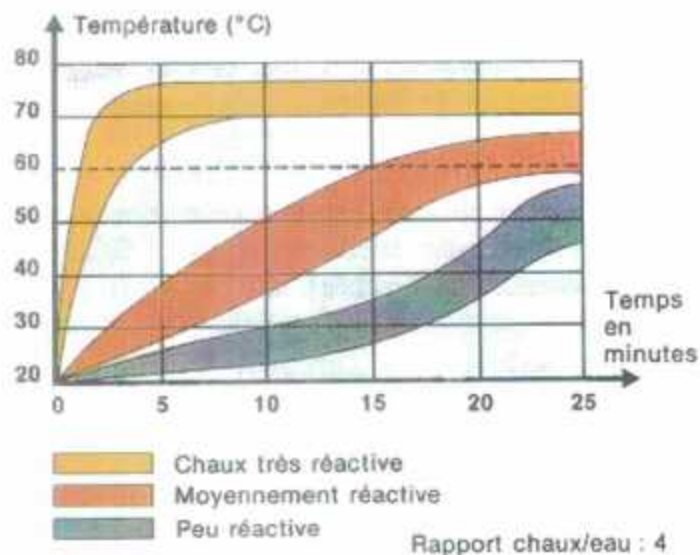


Figure 16 : Exemple de courbes de réactivité des chaux vives

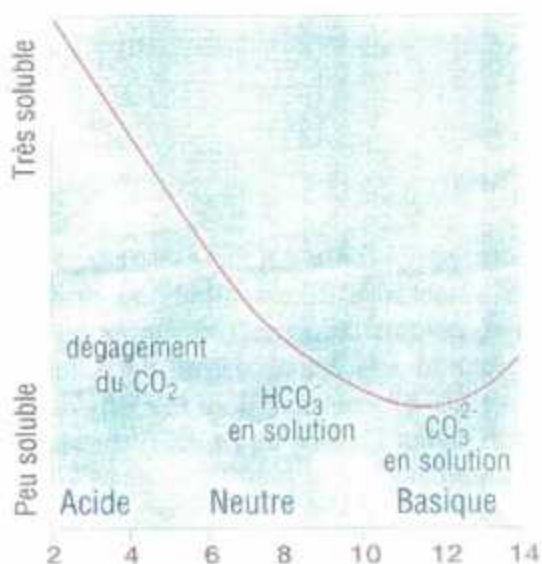


Figure 17 : Solubilité apparente de CaCO_3 en fonction du pH

pH des solutions de chaux à 25°C	
CaO g/l	pH
0,064	11,27
0,065	11,28
0,122	11,54
0,164	11,66
0,271	11,89
0,462	12,10
0,680	12,29
0,710	12,31
0,975	12,44
1,027	12,47
1,160	12,53

Tableau 14 : Evolution du pH des solutions de chaux à 25 °C

Illustrations reproduites avec l'aimable autorisation de la Lettre de l'Industrie de la Chaux (CSNPCGM) et de la société Balthazard & Cotte

4.2.5 Transition vers les produits à calcination poussée

Il s'agit presque exclusivement des produits magnésiens et calco-magnésiens, dont les qualités réfractaires et isolantes électriques sont associées à un changement d'état physico-chimique qui s'obtient à température de calcination plus élevée que pour l'obtention de chaux.

Dans la filière magnésie, le produit de base appelé magnésie caustique, est obtenu à une température inférieure à 1 000° (caustic calcined magnesia). Grosso modo, les qualités réfractaires et isolantes électriques recherchées sont d'autant plus affirmées que la température de calcination est élevée :

- la magnésie très calcinée (hard burned magnesia), est obtenue dans une plage de température très large, 1 100°-1 650°
- la magnésie calcinée à mort ou frittée (dead-burned magnesia), est obtenue à une température supérieure à 1 450°
- la magnésie hautement pure s'obtient par électrofusion de giobertite placée dans un four à arc, trois électrodes étant implantées dans la masse du minerai (fused magnesia) ; portée à 2 800°, la partie centrale autour des électrodes fond en s'épurant pour donner du MgO très pur, la partie externe servant de réfractaire

4.3 Utilisations

4.3.1 Sidérurgie : fabrication de fonte et d'acier

La fabrication d'acier nécessite le passage intermédiaire par la fonte. La fonte correspond à la réduction indirecte (hauts fourneaux mélangeant minerai et combustible) ou directe (fours à gaz naturel ou à oxygène, utilisant CO et/ou H₂ comme réducteur), des minerais de fer (oxydes, plus rarement carbonates). L'acier correspond à la décarburation de la fonte par oxydation du carbone contenu. Le clivage fonte – acier est conservé pour la clarté de la présentation de cette filière des utilisations des carbonates Ca-Mg et de leurs produits dérivés, dont le tableau 15 résume les postes d'utilisation.

Fabrication de fonte

➤ Castines crues

L'utilisation de castines de roches carbonatées dans les hauts fourneaux producteurs de fonte, est le poste de consommation de carbonates crus le plus important en France. Le calcaire est nécessaire pour les minerais dont la gangue ne peut assurer elle-même le rôle de fondant, au contraire des minerais dits autofondants.

L'addition de roche calcaire a en fait un rôle double :

- de fondant du minerai de fer ; un fondant sert à accélérer la fusion du métal obtenue à température moindre, et à constituer un bain distinct du métal ou laitier, qui piège les impuretés
- d'agent contrôlant l'indice de basicité du laitier, favorable à la diminution de la teneur en soufre

En complément du calcaire, la dolomie peut être utilisée pour obtenir une meilleure fluidité du laitier, l'optimale étant obtenue pour 6 à 8 % d'équivalent MgO ; son emploi a pour autre avantage de faciliter la déphosphoration des fontes.

Le composé calcaire - dolomie fondu (température du four avoisinant 1 300°), forme un liant séparé de la fonte. Ce laitier de fonte, qui accumule les impuretés des minerais : oxydes de phosphore, calcium, silicium, aluminium, magnésium, est ensuite facilement éliminé. La fonte produite a une composition voisine de 94 % Fe, 4 % C (carbone), 2 % d'impuretés.

> Poudres et chaux frittées

L'évolution concomitante des minerais et de leur préparation (concentration, utilisation des fines), et de la sidérurgie, a conduit à l'introduction et au développement de la technique d'agglomération qui constitue un traitement thermique. Cette technique a permis de passer à la préparation intégrale des charges des hauts fourneaux, qui facilite leur régularité de marche tout en économisant substantiellement la consommation de coke (réduite à 400-540 kg/t).

L'agglomération est le cas d'application aux minerais fins (0.5-7 mm, voire 10 mm), tandis que la pelletisation est le cas d'application aux minerais très fins (quelques microns à 300 microns). Les procédés d'agglomération suivent deux filières, qui sont l'agglomération en boulettes ou pellets, et l'agglomération sur grille (utilisée par Sollac à Dunkerke et Fos).

La production d'aggloméré basique incorporant des fondants, est réalisée par frittage (vers 1 800°) en présence de dolomie, de calcaire et de serpentine broyés, et de chaux, dont l'ajustement de quantité plus aisé sert au contrôle de la productivité de l'agglomération. La justification de l'ajout de dolomie (et de serpentine) est l'incorporation de magnésium dans les agglomérés, qui contribue à la résistance des réfractaires des fours.

> Chaux

La désulfuration des fontes se pratique maintenant avec des chaux fluidisées, calciques et dolomitiques.

	calcaire	dolomie	chaux Ca vive	chaux Ca hydratée	chaux dolomitique	mélanges et produits spéciaux
Agglomération : fondant et ajustement du pH basique	X	X	X			X
Haut-fourneau : fondant et ajustement du pH basique	X	X				
Désulfuration des fontes			X		X	X
Fours-convertisseurs	X	X	X		X	X
Fours électriques			X		X	X
Affinage en poche			X		X	X
Décapage				X		X
Traitement des sous-produits			X	X	X	X

Tableau 15 : Exemple de charte d'utilisation des carbonates et des chaux dans la sidérurgie, d'après la société productrice de carbonates et de chaux Carmeuse (cf site carmeuse.com).



Fabrication d'acier

➤ Chaux

La transformation de fonte en acier qui s'effectue dans les fours - convertisseurs à oxygène ou électriques, revient à diminuer la part de carbone à moins de 2 %, et à éliminer les impuretés : phosphore, silicium, manganèse, soufre. La chaux qui est utilisée dans ces fours, représente le poste de consommation de chaux le plus important en France.

Par sa propriété de fondant, la chaux affine l'acier en piégeant ses impuretés sous forme de scorie liquide (vers 1 600°) ou laitier d'acier qui est éliminé. La consommation est de 40-70 kg par tonne d'acier en fonction de la quantité d'impuretés. L'évolution récente avec la généralisation des convertisseurs à oxygène, a montré l'intérêt de substituer à une partie de la chaux calcique (25-50 %), de la chaux dolomitique (dolomie d'enfournement), qui protège mieux le revêtement réfractaire de l'agressivité de certaines impuretés, allongeant ainsi sa durée de vie. Sa consommation est de 15-30 kg par tonne d'acier produit. La tendance actuelle dans la sidérurgie est à la recherche de chaux de qualités améliorées permettant d'abaisser la consommation.

L'affinage poussé des aciers, qui répond à une demande croissante, se pratique de plus en plus par la technique de la métallurgie en poche, dans laquelle la chaux intervient pour désulfurer à 80 % le métal.

Enfin, le décapage des produits et le traitement des sous-produits, utilisent les chaux vives (calciques et dolomitiques) et les chaux hydratées.

➤ Castines et poudres de dolomie frittée

L'industrie des réfractaires à base de dolomie ou de magnésite, concerne la fabrication des revêtements internes très résistants des fours métallurgiques (cf 4.3.6).

➤ Produit dérivé

Le calcium métal (cf 4.3.4) est utilisé en cours d'affinage de certains aciers spéciaux pour les décarburer et les désoxyder.

4.3.2 Production du magnésium métal et de composés chimiques magnésiens

➤ Magnésium métal : minerais en castines, castines frittées, saumures, chaux

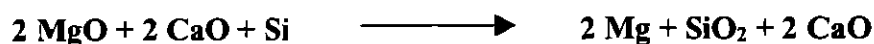
Une partie de la production mondiale du métal magnésium est réalisée à partir de carbonates ou de produits dérivés. Les deux procédés de fabrication possibles sont :

- le procédé par réduction, réduction de magnésie par la méthode Pidgeon, ou réduction de giobertite et de dolomie par la variante française Magnétherm
- le procédé électrolytique permettant l'extraction directe de l'eau de mer, de saumures, ou d'eaux saturées résultant de la dissolution de sels d'évaporites (le produit obtenu est l'oxyde ou le métal)

Ces procédés ont pour matières premières des matières naturelles ou des produits dérivés de carbonates, et/ou ils utilisent en cours de processus des produits dérivés de carbonates. Les deux types de matières premières sont :

- les matières naturelles qui sont les minerais carbonatés, les saumures actuelles ou résultant de la dissolution d'évaporites, l'eau de mer
- les produits issus de la calcination de carbonates, c'est à dire la chaux vive magnésienne, et la chaux calcique vive ou éteinte

Le procédé Pidgeon fait appel à la réduction de magnésie par du silicium en présence de chaux vive calcique, qui sert à neutraliser et isoler la silice produite sous forme de silicates de calcium. Magnésie, silicium et chaux calcique sont broyés et agglomérés en briquettes, puis chauffés dans un four à 1 150°-1 200° sous vide :



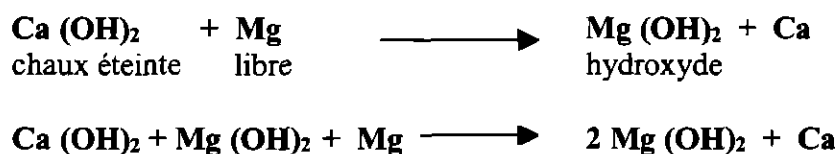
L'utilisation de ferrosilicium en proportion de 70 à 85 %, donne la réaction suivante :



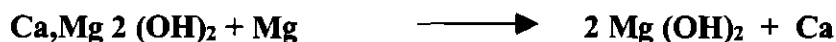
Le procédé Magnétherm utilisé en France, est un procédé original de réduction de carbonates magnésiens (en activité depuis 1964 à Marignac ; cf 2.4 Marignac - Péchiney). Les minerais, qui sont constitués de dolomies à haute teneur en MgO, ainsi que de giobertite, sont débités en castines de tranche granulométrique 4-25 mm, puis calcinés (frittés) dans des fours à 1 500°. Les produits frittés et broyés sont mélangés en présence de ferrosilicium et d'aluminium, puis réduits dans un four électrique à 1 700° pour vaporiser le magnésium, qui est récupéré par condensation sous vide.

La production annuelle de Marignac avoisine 16 000 tonnes, et nécessite environ 12 000 kwh par tonne de magnésium produite.

Le procédé électrolytique permet la fabrication de magnésium à partir de solutions salines magnésiennes. Les solutions sont concentrées par évaporation, puis mises en présence de lait de chaux (calcique ou dolomitique), qui sert en première étape à précipiter la magnésie hydratée :



Le rendement est doublé avec l'utilisation de la chaux magnésienne à la place de la chaux calcique :



L'étape finale utilise l'attaque de l'hydroxyde de magnésium par l'acide chlorhydrique (HCl), qui produit du chlorure de magnésium (Mg Cl₂), dont on va extraire l'oxyde de magnésium (magnésie) ou le magnésium par séparation électrolytique.

Ce procédé est largement répandu dans le monde, à l'exemple de l'Israël, où les saumures de la Mer Morte sont exploitées (société Tateho Dead Sea Fused Magnesia). Il a été en activité en France sur le littoral méditerranéen jusqu'en 1992, à Salin de Giraud (Compagnie des Salins du Midi).

➤ Filière des composés chimiques magnésiens de base

La chaux dolomitique et la magnésie constituent la matière première d'une *filière chimique*, qui est un autre poste utilisateur important de la branche magnésium. Elles servent à fabriquer des composés magnésiens de base, dont les principaux sont

l'hydroxyde, le chlorure, et le sulfate. Que dans les méandres des processus chimiques, un produit utilisé soit d'origine non carbonatée, voire synthétique, il n'en reste pas moins que le plus souvent, il y a utilisation au départ de chaux dolomitique ou de magnésie, obtenues par calcination de carbonates.

L'hydroxyde : $\text{Mg}(\text{OH})_2$, est obtenu par extinction (hydratation) de magnésie d'origine carbonatée, ou par réaction de chaux dolomitique sur des saumures provenant d'eau de mer, ou d'évaporites actuelles ou anciennes. Il existe sous forme naturelle, appelée brucite (le plus souvent associée aux serpentinites, comme produits d'altération hydrothermale de roches ultrabasiques riches en magnésium, telles dunites et périclites). Il est notamment utilisé dans la fabrication des papiers, dans les textiles comme agent retardateur du feu, dans l'alimentation animale, dans l'élaboration de spinelles synthétiques (MgAl_2O_4 , par réaction avec Al_2O_3) pour la fabrication de briques et de moules réfractaires, et comme fertilisant.

Le chlorure : Mg Cl_2 , est obtenu par réaction d' HCl sur l'hydroxyde, ou par chloruration de magnésie, ou encore comme sous-produit de la chimie des sels de potassium. Outre la production du métal, il est notamment utilisé comme réducteur de poussière dans le BTP au moment de l'élaboration des couches de forme routières, comme fertilisant, comme agent anti-gel, pour fabriquer l'oxychlorure entrant dans la composition du ciment Sorel.

Le sulfate : Mg SO_4 , est obtenu par sulfuration de magnésie, mais il existe sous forme naturelle appelée sel d'Epsom, ou epsomite : $\text{Mg SO}_4 \cdot 7 \text{ H}_2\text{O}$. Il est notamment utilisé dans les industries pharmaceutiques et chimiques, dans l'industrie des couleurs – pigments – teintures, dans les textiles comme agent retardateur du feu et agent blanchissant, dans les composés inflammables (allumettes et explosifs), comme fertilisant.

➤ Zoom sur le rôle économique du magnésium

Contrairement au calcium métal, d'usage limité, le magnésium est largement utilisé. Pour éclairer l'information disséminée dans ce chapitre, un aperçu des filières d'utilisation ne paraît pas superflu, rompant momentanément le plan suivi (arborescence finalité → produit carbonaté naturel ou dérivé utilisé).

Dans ses filières d'utilisations, le magnésium métal (environ 75 % du magnésium industriel total), est d'abord un métal d'alliage, le plus souvent allié avec les aciers, avec l'aluminium, avec le zinc (exemple du zamac). Ses avantages sont une température de fusion relativement basse (651°) et une masse spécifique faible, qui est près de cinq fois inférieure à celle de l'acier, et un tiers inférieure à celle de l'aluminium. Positionné par son prix dans les créneaux « haute technologie » d'industries exigeantes comme l'aéronautique et l'espace, il est actuellement de plus en plus sollicité dans d'autres secteurs clefs, comme l'automobile (moteurs), où il reste toutefois réservé aux produits « haut de gamme ».

Le magnésium est encore notamment utilisé en tant que :

- composant en chimie des organo-magnésiens
- agent réducteur dans la métallurgie du titane, de l'uranium, du béryllium, du zirconium, de l'hafnium, etc...(cf 4.3.3)

- agent catalyseur dans la pétrochimie (cf 4.3.16)
- agent de protection contre la corrosion, dite protection « cathodique »
- protection sous forme de gainage de tubes utilisés par l'industrie nucléaire

Ses formes combinées carbonatées et oxydées (chaux) ont également trouvé de nombreuses niches d'utilisation dans des branches industrielles variées, dans les rôles principaux :

- d'agent désulfurisant et déphosphorisant des acier fondus et affinés (cf 4.3.1)
- de charges fonctionnelles dans les industries du verre et de la céramique (cf 4.3.5 et 4.3.16)
- de bases de produits réfractaires et isolants (cf 4.3.6)
- d'amendement et de fertilisant agricole (cf 4.3.9)

Notons à partir de la magnésie, la recombinaison de magnésite pure, qui sert dans l'industrie pharmaceutique (cf 4.3.15), dans la constitution de charges pour caoutchoucs, peintures, dans la fabrication de verres, de céramiques et d'isolants thermiques.

4.3.3 Production d'autres métaux non ferreux et de métaux précieux

Dans la filière métallurgique des non-ferreux, les carbonates interviennent dans le traitement des minerais oxydés, parfois sulfurés ou carbonatés, pour amener le métal sous forme d'oxyde par la formation d'un sel alcalin soluble. Ils interviennent soit directement, à l'exemple de l'utilisation du calcaire ou de la chaux, soit indirectement, à l'exemple de l'utilisation du carbonate de sodium synthétisé à partir de calcaire et d'ammoniac (cf 4.3.4).

➤ Poudres crues

Le rôle de fondant des carbonates, si important en sidérurgie, s'étend à la production des métaux non-ferreux. Par exemple, l'extraction du cobalt de minerais arséniés utilise un produit fondant, mélangeant calcaire et silice broyés.

➤ Chaux et carbonate de sodium (produit dérivé)

① Il s'agit principalement en France de chaux consommée pour la production d'**aluminium** par le procédé Bayer. Dans ce procédé, le réactif d'attaque du minerai bauxitique est en principe la lessive de soude, dont la filière de fabrication utilise la chaux ; mais la bauxite peut aussi être directement attaquée par la chaux. Les aluminates en solution obtenus sont séchés, puis calcinés, pour en extraire l'aluminium. Dans le cas de minerai bauxitique fortement siliceux, ce procédé engendre des silico-aluminates insolubles et une perte de métal ; pour y pallier, le procédé le plus intéressant consiste à associer dans un bain, chaux et soude, la chaux éliminant les composants siliceux par précipitation de silicates de calcium. La consommation variant en fonction des minerais, on

retiendra que le traitement d'une tonne de minerai bauxitique à 1 % de silice nécessite de 30 à 40 kg de chaux éteinte.

Le carbonate de sodium (Na_2CO_3) est à la base du procédé Sainte-Claire Deville pour la production d'aluminium, en alternative au procédé Bayer. Le procédé se fait à sec en milieu oxydant, à température de 1 000°-1 100°.

② Le traitement des minerais oxydés (oxydation naturelle ou provoquée) et concentrés, par formation d'un sel alcalin soluble, s'applique également à la production de **chrome**, **molybdène**, **tungstène**, **vanadium**. Le réactif d'attaque du sel est soit une solution de soude, soit du carbonate de sodium, à l'exemple de l'attaque des minerais de chromite ; les sels de sodium formés sont ensuite récupérés par lixiviation, avant la séparation finale.

Le carbonate de sodium intervient dans la fabrication de composés de **chrome** et de **vanadium** par le procédé de calcination dans un courant d'air.

③ Les productions de **cuivre**, **zinc**, **plomb**, **or**, **argent**, **uranium**, et **calcium métal**, utilisent la chaux soit dans le processus de concentration, soit dans le processus d'extraction.

La chaux intervient dans les procédés de séparation par flottation des différents sels métalliques ou des impuretés, dans les cas de minerais de cuivre, zinc, molybdène. Par exemple, l'utilisation de chaux sur des minerais à pyrite – chalcoppyrite - sphalérite, permet de flotter relativement les minéraux à cuivre et à zinc par son effet dépresseur sur la pyrite ; l'ordre de grandeur de la consommation est de 1 à 3 kg de chaux éteinte par tonne de minerai traité.

Dans la métallurgie thermique, la réduction des oxydes métalliques à forte énergie de liaison parce qu'en solution solide ou phase mixte, est facilitée par l'insertion d'une opération d'oxydation au moyen de chaux par exemple, qui libère l'oxyde métallique originel pour en faire un oxyde libre plus aisément réductible.

④ La chaux intervient plus généralement pour contrôler le pH en cours de fabrication des métaux cités. C'est en particulier le cas pour la lixiviation de l'**or** par des solutions cyanurées ; la chaux permet de maintenir à pH basique la pulpe, pour éviter la formation de gaz toxique hydrocyanuré, et elle intervient aussi pour la régénération des réactifs cyanurés.

⑤ L'affinage des métaux par oxydation, qui peut entraîner une contamination par l'incorporation de composants tels l'hydrogène et l'azote, utilise l'injection de chaux qui permet la formation d'une scorie piégeant les éléments indésirables.

⑥ L'usage de la chaux est aussi très répandu dans le traitement des effluents de ces industries (dont la neutralisation), et dans l'épuration des fumées (cf 4.3.12 et 4.3.13).

➤ Calcium (produit dérivé)

Le calcium métal (voir 4.3.4) est utilisé en tant qu'agent réducteur dans la métallurgie du **plutonium** et de l'**uranium** : sous atmosphère d'argon et dans un creuset revêtu d'une couche protectrice de fluorure de calcium, les formes tétrafluorées respectives sont dissociées et les métaux libérés.

➤ Magnésiothermie

En tant que produit dérivé potentiel de la filière des carbonates, on peut noter que le magnésium est à la base d'un procédé métallurgique utilisé dans la production de **titane**, **zirconium**, **uranium**, **hafnium**, **béryllium**. La magnésiothermie fait appel aux qualités réductrices du magnésium pour l'extraction de ces métaux.

4.3.4 Industries chimiques

On peut noter en préambule que les polycarbonates sont des matières plastiques transparentes, donc synthétiques et sans rapport avec les carbonates naturels.

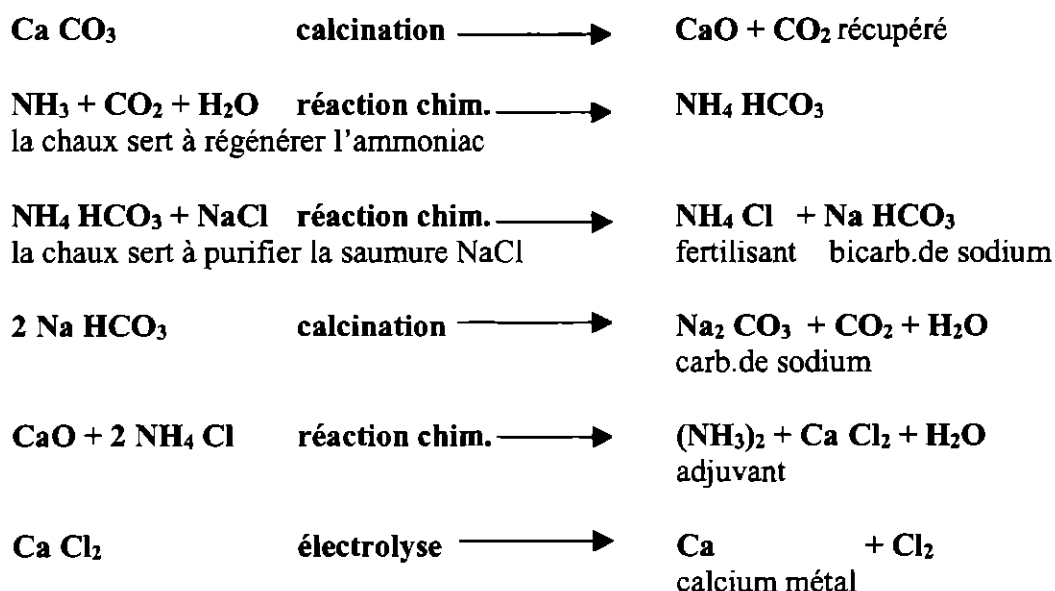
➤ Castines et poudres crues

La chimie minérale consomme des calcaires, en tant que matière première, pour les transformer généralement en chaux, qui sert directement à la fabrication de quelques produits de base. L'utilisation de poudres crues n'existe que pour la fabrication d'insecticides ou de pesticides dans la composition desquels elles rentrent.

➤ Chaux

Le calcaire est une matière essentielle de la fabrication du **carbonate de sodium**, qui se fait généralement par le procédé Solvay (le plus répandu). Après calcination, le CO₂ récupéré est mis en réaction avec l'ammoniac, puis avec le chlorure de sodium ; la chaux sert en particulier à régénérer l'ammoniac. La production d'une tonne de carbonate de sodium nécessite 1 100 à 1 200 kg de calcaire. Le carbonate de sodium est un produit de base utilisé directement dans la métallurgie, la fabrication du verre, des détergents et autres produits ménagers, dans l'environnement (traitement des eaux et recyclage des batteries au plomb). Outre les produits sodiques dérivés mentionnés ci-dessous, il sert encore à fabriquer l'oxyde, le silicate et le phosphate, aux nombreuses utilisations.

Au cours des réactions, certains produits intermédiaires sont récupérés pour d'autres utilisations :



Sont également récupérés :

- du chlorure d'ammonium, mis dans les fertilisants
- du bicarbonate de sodium ; il est utilisé en pharmacie, agro-alimentaire (fabrication de gélatine), en chimie et pétrochimie (graisses, etc...), dans l'environnement, dans la fabrication des papiers, adhésifs, émaux, teintures
- du chlorure de calcium (fondant de viabilité hivernale de routes et adjuvant pour bétons)
- du calcium métal obtenu à partir de l'électrolyse du chlorure de calcium

On peut mentionner la variante constituée par le procédé japonais développé par Asahi Glass, dont les avantages principaux sont de diminuer la production de chlorure d'ammonium non commercialisé, tout en simplifiant sa récupération par évaporation ; il est ensuite mis en réaction avec de la chaux.

L'utilisation industrielle du *calcium métal*, très réactif, est assez limitée. Outre, la métallurgie de non-ferreux (cf 4.3.3), il sert en laboratoire à déshydrater des alcools ou à absorber les traces gazeuses à l'intérieur de tubes électroniques fonctionnant sous vide poussé (allié à d'autres métaux : aluminium, béryllium, cuivre, magnésium, etc...).

La fabrication de l'*hypochlorite de calcium* se fait par réaction de chlore gazeux mis en présence de poudre de chaux fraîchement éteinte. Il sert au blanchiment des fibres textiles et à la désinfection des eaux.



La fabrication d'**oxyde de propylène**, matière de base de la chimie organique, fait intervenir la chaux au stade de transformation du chlorure de propylène en oxyde, qui neutralise en même temps l'acide chlorhydrique produit en excès. Pour 100 kg d'oxyde de propylène produit, il faut 110 à 130 kg de chaux. La chaux intervient dans la fabrication d'autres produits organiques de synthèse comme la glycérine.

La fabrication de **carbonate de calcium précipité** (CCP) est mentionnée à titre indicatif, car elle concerne spécifiquement les charges blanches (hors périmètre de travail). Le CCP est plus souvent produit à partir de lait de chaux + gaz carbonique (réaction ci-dessous), mais il peut encore être produit avec chaux + carbonate de sodium ou carbonate de sodium + chlorure de calcium.



La fabrication du **carbure de calcium** (Ca C_2), qui servait en particulier à obtenir l'acétylène (C_2H_2) et la cyanamide calcique ($\text{CN}_2\text{ Ca}$), est devenue accessoire. L'acétylène a été remplacé par l'éthylène pour les synthèses organiques, tandis que la cyanamide calcique n'a plus qu'un emploi accessoire comme engrais.



4.3.5 Fabrication du verre

> Castines crues

La fabrication du verre en France utilise du calcaire ou de la dolomie très purs pour leur pouvoir stabilisant qui bonifie la résistance mécanique et la résistance chimique, tandis que le carbonate de soude (voir 4.3.4) sert de fondant principal. Les oxydes alcalins nécessaires sont : CaO et Na_2O , et éventuellement MgO (0 à 4 %) et K_2O . Les proportions des constituants de base entrant dans la fabrication d'une tonne de verre sont les suivantes (cas de castines de calcaire) :

	kg
Sable.....	700
Castines de calcaire.....	280
Carbonate de soude.....	230
Stabilisants, colorants, etc...	30
Masse totale des constituants	1 240
Perte de masse (dégazage, divers)	240
Verre produit.....	1 000

Pour la fabrication des verres à plat, la dolomie est préférée au calcaire pour sa meilleure contribution à leur résistance mécanique et chimique. Pour sa pureté, la magnésite de synthèse est aussi utilisée dans l'industrie verrière.

➤ Chaux

Son utilisation dans la fabrication du verre à la place de castines n'est pas habituelle en France, au contraire d'autres pays, en particulier des Etats-Unis. D'une part, elle permet d'obtenir des verres plus brillants et de meilleure couleur, d'autre part, il est considéré que son coût plus élevé est compensé par l'économie de décarbonatation des castines et par une fusion plus rapide du verre, donc une augmentation de productivité.

CaO et MgO sont cités pour leur pouvoir stabilisant à l'instar des carbonates (meilleure résistance mécanique et chimique). Na₂O, c'est à dire Na₂CO₃ (voir 4.3.4), est aussi utilisé pour abaisser le point de fusion.

4.3.6 Fabrication de réfractaires et d'isolants électriques

Parmi les principales classes de produits réfractaires denses traditionnels, se placent les produits à base de dolomie ou de magnésite, à base de magnésie, à base de chrome - magnésie. Pour mémoire, les autres classes sont les produits siliceux, alumineux, silico-alumineux, chromeux, carbonés et graphiteux.

➤ Castines et poudres frittées

Les réfractaires de qualité standard à base de produits carbonatés magnésiens, sont utilisés sous forme de briques ou de blocs moulés dans des industries variées : hauts fourneaux de métallurgie, dont la sidérurgie est le principal poste d'utilisation (revêtements de fours, tuyères, fonds de convertisseurs...), verreries et cimenteries. Les dolomies et les giobertites servant à la confection de la matière première (avec d'autres minéraux : brucite, kiésérite, chromite, forstérite, etc...) doivent être frittées. Le degré de calcination des dolomies ou giobertites frittées, est variable dans un intervalle de températures fortes à très fortes, bien au-delà des 1 300° de la limite théorique du frittage.

Dans le cas des dolomies, les roches trop pures doivent être additionnées de silice et d'oxydes de fer, manganèse, aluminium, chrome, etc..., pour être convenablement frittées. On observe en pratique deux catégories de produits commercialisés correspondant à deux stades de frittage :

- le premier stade de frittage se passe à des températures comprises entre 1 600° et 1 700°
- le deuxième stade, dit « calcination à mort », se passe à des températures comprises entre 1 800°/1 900° et 2 000° ; la dolomie ainsi frittée est utilisée, soit dans la fabrication des briques composant les revêtements internes de fours (sidérurgiques et de métaux non ferreux, verriers, cimentiers, etc...), soit en produit granulé servant à leur réparation

Dans le cas des giobertites (ou magnésites), leur frittage nécessite une teneur en fer limitée à 8 % maximum (Fe₂O₃). Les produits commercialisés sont obtenus par calcination à tous

les degrés de température possibles (cf 4.2.5) :

- les magnésies très calcinées ont la partie haute de leur plage de calcination possible (1 300°-1 650°) dans le domaine des frittés
- les magnésies calcinées à mort sont obtenues à température supérieure à 1 450° ; la magnésite, qui se prête mieux que la dolomie à ce degré de frittage, peut atteindre jusqu'à 96 % de MgO (épurée des ferrites de chaux néoformées par passage dans un tambour magnétique)

Si la pureté de la magnésite de synthèse est parfois mise à contribution pour la fabrication d'isolants thermiques par exemple, les impuretés des carbonates apparaissent indispensables à la fabrication de réfractaires, dans certaines limites :

- Fe est un minéralisateur énergique de la magnésie
- Al_2O_3 , à faible teneur, améliore la résistance mécanique
- la présence de SiO_2 permet d'obtenir des produits très réfractaires, mais ne doit pas dépasser au départ un certain indice (ratio CaO sur SiO_2 supérieur ou égal à 1.8)
- dans le produit final, la chaux doit être absente, car réhydratable trop facilement

La réalisation de « laines de roches » isolantes, est faite par mélange de dolomie avec des roches silicatées : basalte, diabase. MgO entre pour 2 à 13 % dans la composition de la laine.

> Magnésie fondue ou électro-fondue

La magnésie fondue de haute pureté (teneur MgO > 96 %), est un produit réfractaire de haute qualité allouant une résistance thermique et une longévité améliorées, mais à un prix supérieur aux réfractaires basiques telle la magnésie calcinée à mort. Ses qualités sont dépendantes de sa pureté, de la taille des cristaux de périclase néoformés (nom cristallographique du minéral MgO à structure cubique holoèdre), et de sa densité ; une haute qualité correspond à une pureté > 97.5 %, une taille des cristaux de périclase > 1 000 microns, et une densité approchant 3.58 g/cm^3 . Elle est fabriquée soit à partir de magnésite, soit à partir de magnésie caustique d'origine carbonatée ou saline ; enfin, elle peut être associée au chrome.

La qualité réfractaire trouve son marché principal dans la protection interne des fours (fours à oxygène, fours - convertisseurs de fer en acier, fours à arc électriques), en particulier à niveau de la résistance à la corrosion : la magnésie mise en granules, est mélangée à du carbone et à du magnésium pour constituer les briques réfractaires. La qualité réfractaire la plus pure est utilisée en optique, dans les réacteurs nucléaires, et dans les boucliers protégeant les nez des fusées.

La qualité électrique est surtout utilisée comme isolant des composants électriques chauffants sous forme de ciment : ce ciment est obtenu par mélange de la magnésie fondue avec des matières plastiques et des produits durcisseurs. Ces ciments isolants sont également utilisés dans des appareils électroménagers, soit directement, soit pour permettre l'apposition de couches de silice thermo-isolantes.

4.3.7 BTP – construction

➤ Poudres crues

Des fillers (granulométrie < 80 microns) plus généralement calciques que dolomitiques, sont mélangés au bitume pour produire des asphaltes d'étanchéité.

➤ Chaux

La chaux (grasse ou dolomitique) aérienne sous forme éteinte et la chaux hydraulique naturelle sont utilisées dans la construction à la fabrication de liants, enduits, et badigeons. Délaiées pour les ciments quand il s'agit de privilégier la vitesse de prise et d'acquisition de résistance élevée, elles conservent des avantages dans bien des cas grâce à leurs propriétés principales, qui sont :

- une prise lente (par durcissement à l'air après évaporation de l'eau de gâchage, précédé pour la chaux hydraulique par une première prise à l'eau)
- une bonne adhérence
- une élasticité (on parle aussi d'onctuosité), qui évite la fissuration et le « faïençage »
- un bon rendement volumique
- une bonne imperméabilité à l'eau, tout en laissant passer la vapeur d'eau grâce à leur microporosité
- une durabilité, en partie grâce à sa recarbonatation au contact du CO₂ de l'air (nombreux exemples de bonne conservation dans les bâtiments et décorations antiques), qui renforce leur bonne résistance aux intempéries

Elles sont utilisées sous forme de mortier associant liant, granulat, additifs empiriques et eau, dont les proportions sont très variables. Le liant peut être pur (chaux hydraulique ou chaux aérienne) ou « bâtard », c'est à dire mixte. Leur rôle est l'utilisation comme enduits (ou sa variété stuc) : enduits intérieurs et extérieurs (trois couches traditionnels, deux couches), comme crépis, ou comme badigeons (laits de chaux). Dans tous les cas, les qualités reconnues de ces produits à base de chaux sont un séchage sans retrait (générateur de fissures), des capacités d'isolation thermique et phonique, ignifuges (bon comportement au feu), et de désinfection bactérienne et cryptogamique.

La chaux peut servir de base à des matériaux mixtes (torchis, ou pisés faits avec de la paille et de la terre argileuse, ou avec du sable et des cendres, etc...), et à des enduits décoratifs colorés, dits « rustiques » (à sables colorés et/ou à pigments minéraux et autres).

La chaux entre également dans la fabrication de briques silico-calcaires, qui ont une place importante dans certains pays, alors que leur utilisation est rare en France. Les briques sont obtenues par le mixage intensif de chaux et de sable siliceux, dont le produit est compacté puis étuvé.

Plus généralisée est l'utilisation de bétons cellulaires, légers et isolants, qui trouvent leur emploi dans les préfabriqués (murs non porteurs, panneaux, blocs modulaires). Cette catégorie de bétons dits poreux, s'obtient par adjonction d'aluminium en poudre au mortier (contenant chaux, ciment et sable siliceux), qui éteint la chaux en créant des bulles au moment du mouillage.

4.3.8 BTP - utilisations routières

➤ Poudres crues

Du calcaire cru est introduit en guise de filler dans les mélanges routiers à base de bitume et dans les asphaltes d'étanchéité ; ajouté en certaine proportion, le filler correspond à un matériau inerte finement broyé, qui joue surtout un rôle de remplissage. Notons au passage qu'en règle générale, les couches constituant les assises des chaussées admettent une diminution de qualité des couches descendante.

La craie, utilisée en remblais et couches de forme, doit être considérée en tant que granulat (hors périmètre de travail), malgré ses spécificités de « roche évolutive » pouvant aboutir à une auto-fragmentation et auto-compaction dans le cas des faciès les plus fragiles de la classification GTR (Guide Technique pour la réalisation des Remblais et des couches de forme).

➤ Chaux

La chaux d'utilisation routière intervient soit à niveau des sols en place (pistes, plates-formes...), soit à niveau des remblais (assises de chaussées, de parkings ou de voies ferrées, dites « couches de forme »).

La chaux est utilisée dans le traitement des pistes en terre pour améliorer leur viabilité, suivant deux finalités possibles :

- leur assèchement par épandage de chaux vive qui va immédiatement s'éteindre en absorbant l'eau du sol dans les proportions connues de la réaction d'extinction
- la résorption de la plasticité de l'argile contenue, dont la chaux va modifier la structure en quelques heures par réaction physico-chimique complexe, avec échanges ioniques et floculation ; à teneur en eau du sol égale, et par déplacement du domaine de plasticité de l'argile qui passe à un état grumeleux stable, le sol gagne en consistance et devient apte à être travaillé et compacté

La réaction pouzzolanique est une propriété intéressante des chaux, qui est mise à profit dans la constitution de couches de forme. Certains matériaux naturels tels que pouzzolanes (roches volcaniques basaltiques) et basaltes, ont la faculté de réagir avec la chaux en présence d'eau, pour former des silicates et aluminates de chaux de propriétés hydrauliques analogues à celles des ciments. Un exemple de composition de couche de forme est le

mélange de 84 % de granulats, avec 13 % de matériau pouzzolanique et 3 % de chaux, qui vont constituer le liant.

Un autre grand intérêt du procédé est de pouvoir substituer aux matériaux naturels des sous-produits industriels : laitiers de hauts fourneaux, cendres volantes de centrales thermiques, phosphogypse résultant de la fabrication d'acide phosphorique. Plus riches en calcium, ils nécessitent seulement 1 % de chaux. On parle ainsi de graves traitées ; les graves, qui peuvent être constituées de granulats naturels ou artificiels, de graviers et de sable, voire de filler, sont dénommées en fonction des composants associés :

- graves – pouzzolanes – chaux
- graves – basaltes – chaux
- graves – laitiers – chaux
- graves – cendres volantes – gypse – chaux

La mise en œuvre à l'état solide, exige un malaxage de la chaux et du sol, qui se fait en général in situ pendant ou après l'épandage, mais se pratique dans certains cas, via une unité mobile de malaxage. Autre technique prisée des américains, l'injection de lait de chaux dans le sol. Dans tous les cas, le dosage de la chaux et l'optimisation de son efficacité par un bon malaxage sont très importants.

Le chaulage peut s'appliquer aux calcaires non argileux crus, massifs ou en granulats, calcaire banal ou craie par exemple. Leurs performances mécaniques sont notablement améliorées grâce à une réaction complexe faisant intervenir de façon concomitante :

- l'assèchement du matériau, l'extinction de la chaux qui augmentant de surface spécifique, forme une pellicule autour des grains (dit « pralinage »)
- le colmatage des microcavités (porosité) grâce à la précipitation de calcite dont la résistance est confortée par la basicité due à la chaux, et/ou le colmatage des interstices entre particules du matériau par la formation de granules de chaux éteinte

La résistance au choc est augmentée par une amélioration générale de compacité et de cohésion, tant au niveau brut ou granulaire (porosité moindre, carbonatation de la chaux de pralinage), qu'au niveau intergranulaire (granules jouant le rôle de « billes »).

Un cas plus atypique est constitué par la réalisation d'un mélange de limon et de 2 % de chaux, pour corriger le déficit en particules fines présenté par le sable utilisé dans les couches de forme de l'autoroute A16 (entre Amiens et Boulogne) ; le tout a été ensuite traité aux liants hydrauliques additionnés de fibres minérales.

Dans les mélanges routiers à base de bitume, la chaux peut être utilisée comme filler en remplacement de calcaire cru pulvérisé. L'amélioration porte sur son action vis à vis des argiles et de l'eau (décrite plus haut), et sur le ralentissement de la dégradation du bitume (qui se manifeste par un durcissement et une fissuration).

4.3.9 Agriculture (et arboriculture)

➤ Aperçu du problème des sols acides et des carences Ca-Mg

Les sols acides ont une causalité naturelle ou anthropique. Dans le premier cas, la localisation sur le territoire métropolitain des sols acides cantonnés aux vieux socles presque dépourvus de carbonates, a déjà été abordée à l'échelle régionale (cf 2.2.1). Dans le deuxième cas, il s'agit d'acidification résultant d'utilisation intensive des engrais chimiques et de l'irrigation.

L'acidité des sols inhibe la nutrition végétale (blocage du phosphore, au contraire d'autres éléments et oligo-éléments rendus toxiques par de trop fortes teneurs) et la vie microbienne (bactéries), perturbant l'ensemble de l'activité biologique. Alors que les valeurs de pH de sols dits acides sont comprises dans la fourchette de 4.5 à 6.6, la croissance végétale optimum est obtenue (en règle générale) à pH des sols quasi-neutres, soit 6.5 à 7.5.

Dans le cas de la chaux calcique, par saturation du complexe absorbant argilo-humique, elle permet d'éviter le lessivage des anions fertilisants PO_4^{3-} et NO_3^- et d'améliorer la capacité d'échanges, tout en renforçant la cohésion du complexe. De plus, les sols argileux et limoneux ainsi neutralisés, deviennent plus souples (floculation des argiles, augmentation de perméabilité), pour le profit du développement racinaire et du travail par l'homme.

Sous un autre angle, les ions Ca et surtout Mg, élément indispensable à la photosynthèse, qui sont contenus dans les carbonates ou leurs oxydes dérivés, sont aussi des fertilisants.

Cependant, il faut tenir compte de la réglementation qui distingue amendements et engrais, c'est à dire les produits destinés plus spécifiquement soit à l'amélioration des caractéristiques des sols, soit à la nutrition végétale (cf tableaux des annexes 5A-5B : extraits des normes NF U 44-001 et NF U 42-001). Si les amendements entrent naturellement dans le cadre du mémento, on ne peut complètement escamoter le rôle d'engrais des matériaux traités. En résumé, l'agriculture trouve avec les carbonates et les chaux en particulier, un amendement et fertilisant minéral concentré à action rapide et faible coût, qui contribue à l'augmentation des rendements.

➤ Poudres crues

Les sols acides sont régulièrement traités par l'épandage de calcaire ou de craie, et/ou de dolomie crus, pour neutraliser l'acidité et améliorer la texture (amendement), et pour compenser les carences en calcium et magnésium (fertilisant). La réactivité de ces produits crus est améliorée par un broyage fin (80 microns) qui va augmenter leur surface spécifique ; néanmoins, les temps de réaction sont très longs, appréciables en général après quelques années. A titre d'information, trois exemples variés d'emploi de calcaire / Ca CO_3 sont cités, qui mentionnent les doses en kilogrammes par hectare.

En tant qu'amendement dans un cas de terre sableuse :

- 800 à 2 000 kg/ha pour une élévation de pH de 0.5

En tant que fertilisant :

- 50 kg/ha pour la culture de blé
- 300 kg/ha pour la culture de luzerne

L'utilisation de carbonates magnésiens et/ou de giobertite est intéressante pour cibler sur la carence de magnésium. Les fertilisants magnésiens simples sont utilisés la plupart du temps en association avec d'autres engrais, en particulier azotés ou potassiques.

Ces produits sont autorisés à la vente tant comme engrais que comme amendement. Il est à noter qu'en France, nombre d'exploitants, de coopératives agricoles ou de communes, continuent d'exploiter directement du calcaire ou de la craie, dont l'extraction dans ce cadre précis, est à nouveau exemptée de l'autorisation préfectorale depuis 1997.

> Chaux

En tant qu'amendement, la chaux calcique est depuis longtemps le meilleur produit utilisé pour neutraliser l'acidité des sols, et accessoirement améliorer leur texture. En tant que fertilisant, les chaux utilisées sont essentiellement des chaux vives broyées, calciques et/ou dolomitiques suivant le niveau de carence à traiter. En équivalence de ce qui se passe dans les crus, l'utilisation de magnésie est ciblée sur le traitement des carences graves en magnésium.

L'hétérogénéité des sols à amender rend les doses très variables. En règle générale, les doses sont de 1 à 5 tonnes d'oxyde (CaO et/ou MgO) à l'hectare, par an ou à intervalles plus longs. L'élévation d'un demi-point du pH peut aussi être évaluée.

Chaux calcique en tant qu'amendement dans un cas de terre sableuse :

- 400 à 1 000 kg/ha pour une élévation de pH de 0.5

La propriété caustique et désinfectante de la chaux calcique, anti-bactérienne et anti-cryptogamique, est utilisée tant dans le traitement des arbres que dans celui des bâtiments agricoles en général, et en épandage dans les prairies d'élevage. La chaux entre dans la composition de la célèbre « bouillie bordelaise » utilisée en viticulture, à large spectre curatif.

> Indice de valeur neutralisante et application à quelques amendements

La valeur neutralisante d'un amendement donné (cru ou cuit), mesure sa capacité de neutralisation de l'acidité. Elle se calcule en poids de chaux dont l'action serait égale à celle de 100 kg de l'amendement en question ; elle dépend donc des teneurs en CaO et MgO, mais aussi de pondérations diverses pour tenir compte des autres éléments présents, exemples :

- la valeur est de 95 pour une chaux vive à 95 % de CaO
- la valeur est de 52 pour un calcaire renfermant 52 % d'équivalent CaO
- la valeur est de 48 pour une craie phosphatée contenant 55 % de CaO – 6 % de P₂O₅, car le phosphore nuit à l'alcalinité de CaO

Sa signification est théorique car elle ne tient pas compte de la réactivité avec les sols, qui dépend notamment de la granulométrie et de la diffusion.

Exemples d'amendements :

	% MgO	% CaO	Valeur neutralisante
Chaux vive magnésienne	18 à 37	75 à 45	80 à 110
Calcaire magnésien	08 à 17	45 à 25	48 à 56
Dolomie	17 à 21	30 à 20	50 à 58
Mixte magnésien	10 à 30	50 à 30	55 à 75

4.3.10 Sucreries

➤ Chaux

La chaux est indispensable à l'industrie sucrière qui possède ses propres fours à chaux, la production fournissant en outre le gaz carbonique qui intervient dans le traitement.

En effet, les impuretés minérales ou organiques contenues dans le jus extrait des betteraves ou des cannes à sucre, sont éliminées par précipitation grâce à la chaux. Elle forme avec ces impuretés, soit des sels de calcium insolubles, soit un floculat en présence d'albumine colloïdale. La formation intempestive de saccharates avec une partie du calcium nécessite l'apport de gaz carbonique qui dissocie les saccharates et recombine le calcium en carbonate. La consommation de chaux par tonne de sucre brut est de 130-160 kg pour la betterave (ou 20-25 kg exprimé par tonne de betterave), et de seulement 2-4 kg pour la canne à sucre.

4.3.11 Autre agro-alimentaire

➤ Poudres crues

En fait, l'exigence de teneurs élevées en CaO et surtout d'une grande pureté (absence d'éléments toxiques) fait que la plupart des substances utilisées sont à classer dans les charges blanches. Mentionnons quand même le cas un peu moins exigeant de l'alimentation animale, où des calcaires et dolomies réduits en poudre fine, sont mélangés aux farines données aux bovins, porcins, volailles en particulier.

➤ Chaux

La chaux peut être intégrée à l'alimentation, et la remarque faite ci-dessus s'applique encore. Notons toutefois que les propriétés solvantes et hydrolysantes de la chaux servent à la fabrication de gélatine à partir de déchets organiques d'abattoirs ; utilisée sous forme de lait de chaux, elle corrige le pH du bain et apporte son calcium à l'élaboration du composé bicalcique.

Plus généralement, elle a un rôle indirect :

- soit de conservateur, une anecdote bien connue est celle d'œufs conservés pendant des années dans la chaux
- soit d'absorbeur d'humidité dans les chaînes de fabrication alimentaire ou de destructeur des déchets organiques

4.3.12 Traitement – épuration des eaux et des boues résiduaires

Dans toute cette filière du traitement des eaux domestiques, industrielles et agricoles, les produits utilisés sont des chaux.

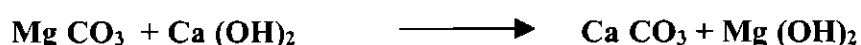
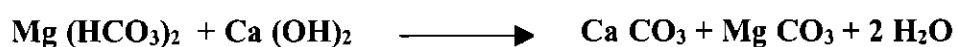
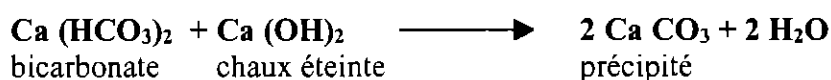
➤ Chaux

C'est un volet très important de l'utilisation de la chaux qui est abordé ici, puisqu'il concerne la gestion de la qualité des eaux de consommation domestique, industrielle et agricole, ainsi que la gestion des eaux usées et des boues résiduaires, pour une remise sous normes acceptables avant stockage ou dispersion.



Eaux de consommation

Moins en France, et plus dans d'autres pays comme l'Allemagne, la chaux est utilisée pour adoucir l'eau en lui enlevant sa « dureté », qui peut la rendre impropre à la consommation domestique ou industrielle (eaux potables, utilisations en réfrigération et en chauffage, etc...). La dureté correspond à la présence dans l'eau de bicarbonates, sulfates et chlorures de calcium et de magnésium (cas des eaux dites « calcaires »). La chaux agit sur les bicarbonates (agents de dureté temporaire) en les précipitant sous forme de carbonates (schéma de traitement Fig. 18-a) :



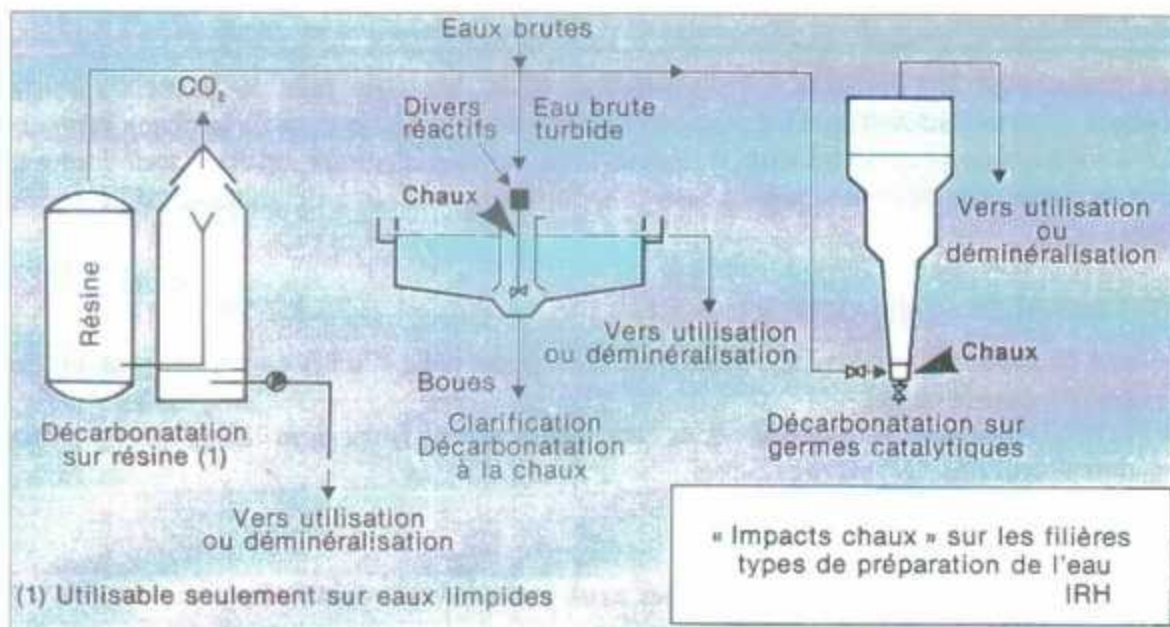


Figure 18-a : La chaux dans les filières de préparation de l'eau

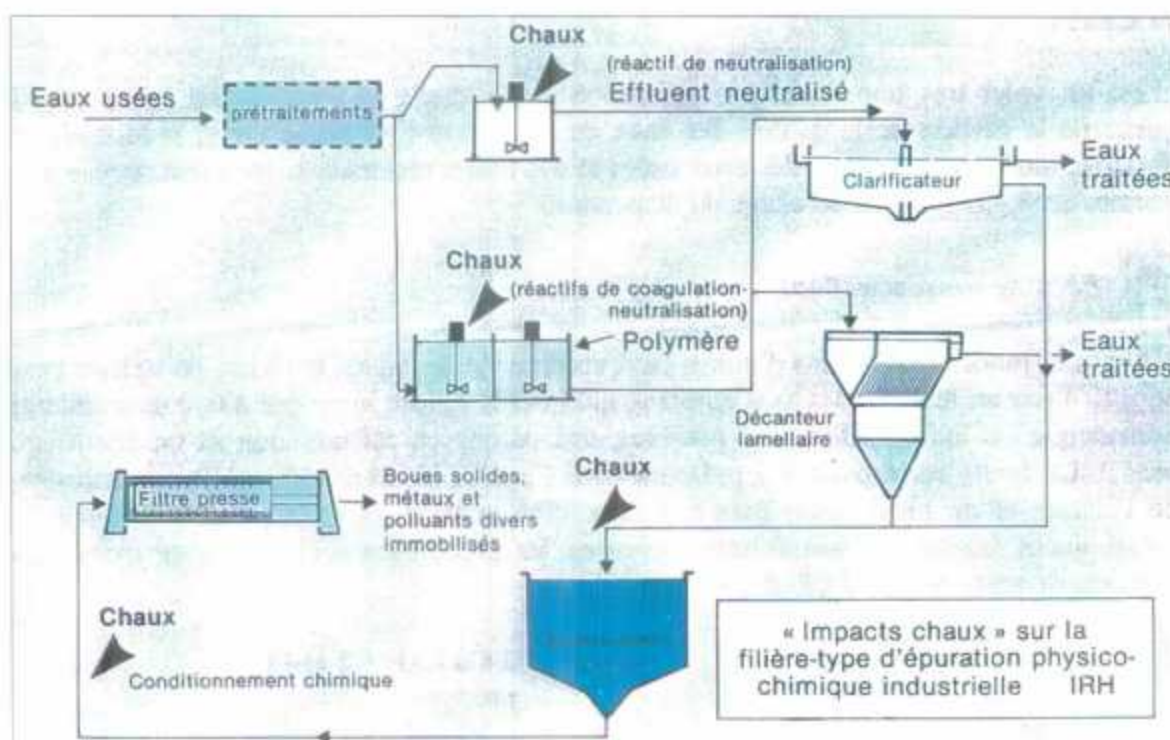
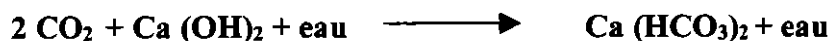


Figure 18-b : Rôles de la chaux dans une filière-type d'épuration physico-chimique industrielle

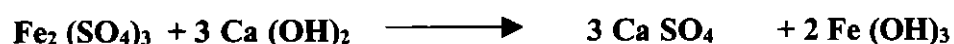
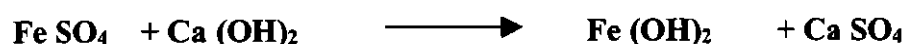
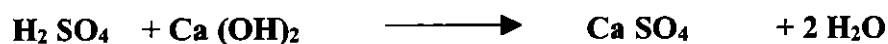
Illustrations reproduites avec l'aimable autorisation de la société Balthazard & Cotte

L'adoucissement complet passe par l'élimination des autres sels, dont les sulfates (agents de dureté permanente), et exige soit l'action de carbonate de sodium, soit le passage sur échangeur d'ions.

Dans le cas contraire, il s'agit de durcir des eaux trop douces, qui corrodent les canalisations en fonte ou en acier (et la pellicule de carbonate de calcium protectrice qu'on a fait déposer à l'intérieur des gaines). On procède par adjonction de gaz carbonique et de chaux :



Le contrôle du pH des eaux est aussi du domaine de la chaux, agent alcalin. Il peut s'agir de la diminution de l'acidité des eaux de consommation et de certaines eaux à usage industriel ou de leur neutralisation. Dans l'exemple suivant de neutralisation d'une eau chargée en acide sulfurique et sels de fer, les réactions chimiques sont les suivantes :



Le champ d'action de la chaux dans les eaux consommables, s'étend encore à sa clarification (ou épuration), par le piégeage de matières organiques et autres substances colloïdales indésirables en suspension, et à sa désinfection, par élimination des micro-organismes et du phosphore.

Eaux usées

L'Arrêté ministériel du 22 septembre 1994 – article 18-2, fait obligation de recyclage intégral des eaux utilisées dans les procédés industriels et agricoles (ne concerne pas les exhaures et les épandages).

La neutralisation des eaux industrielles acides avant leur rejet, applique le même procédé de traitement à la chaux que pour les eaux de consommation.

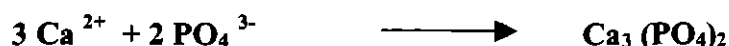
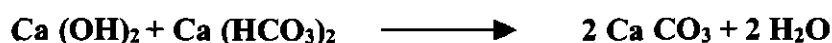
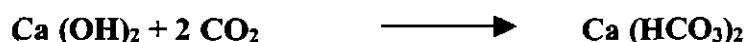
L'épuration des eaux usées fait appel à trois sortes de traitements pouvant être associés :

- mécaniques, le plus souvent correspondant à des égrillages, des décantations ou flottations en cuves
- biologiques, par l'action de bactéries aérobies sur les matières organiques, qu'elles éliminent ou dégradent
- physico-chimiques, pour précipiter, flocculer ou coaguler les matières et les sels minéraux présents, avec de la chaux par exemple

Les deux premiers types de traitement sont les plus courants dans les stations d'épuration françaises, car relativement simples et économiques. Pourtant, deux facteurs poussent à l'utilisation généralisée des traitements physico-chimiques qui ont la souplesse et la rapidité d'action de plus en plus recherchées ; ce sont les exigences plus draconiennes en matière de qualité des eaux rejetées, et les accès de pollution dus aux circonstances particulières (migrations touristiques...). De plus, le déversement sur des terrains spécialisés des boues traitées biologiquement est coûteux, alors qu'à contrario, les boues traitées à la chaux comportant au moins 45 % de matière solide sont auto-combustibles et peuvent être incinérées.

La chaux intervient plus spécialement dans le troisième type de traitement physico-chimique comme :

- agent de coagulation et de floculation pour les matières organiques présentes sous forme de suspension colloïdale ou d'émulsion, et pour les phosphates issus des détergents rejetés, dont la réaction de précipitation par étape est la suivante...



- désinfectant anti-bactérien et anti-cryptogamique, principalement par sa capacité à élever fortement le pH jusqu'à plus de 11.5
- agent d'élimination de produits toxiques et de sels de métaux lourds (cf sulfates, abordés dans le sous-chapitre eaux de consommation), par précipitation sous forme d'hydroxydes grâce à l'élévation de pH (Tabl. 16-17)
- contrôleur de pH en général

La mise en œuvre pratique fait appel à :

- des réactifs ternaires dans le cas d'eaux industrielles, combinant coagulant métallique – chaux – polymère (schéma de traitement Fig. 18-b)
- des réactifs binaires dans le cas d'eaux domestiques (ou « urbaines », par référence aux réseaux les plus fréquents à l'échelle des agglomérations urbaines), combinant coagulant métallique - chaux/ou polymère (schéma de traitement Fig. 19-a)

	Eaux polluées		Eaux de rejets industriels		Eaux consommables			
	Tests de laboratoire		Norme France : décret du 02/02/1998		Norme France : décret du 03/01/1989	Normalisation européenne : 98/83/CE du 03/11/98		
	Traitement par la chaux					application du 01/01/99	évolution sous 5 ans	évolution sous 10 ans
cations métalliques	valeur optimale du pH de précipitation	concentration résiduelle en mg/l	valeur de concentration légale en mg/l	masse en mg journalière libérable maximum	valeur de concentration légale en mg/l	valeur de concentration légale en mg/l	valeur de concentration légale en mg/l	valeur de concentration légale en mg/l
Cu ²⁺	7.5	0.070	0.500	5000	2.000	0.020		
Cr ³⁺	9.5	0.300	0.500	5000	0.050	0.050		
Zn ²⁺	10.5-11.0	0.010	2.000	20000	5.000	0.050		
Pb ²⁺	10.0-10.3	0.030	0.500	5000	0.050	0.050	0.025	0.010
Ni ²⁺	9.8-10.2	0.090	0.500	5000	0.050	0.020		
Cd ²⁺	10.5	0.090	0.200	2000	0.005	0.001		

Tableau 16 : Efficacité expérimentale de diminution des teneurs de quelques métaux lourds, et normes légales

Metal \ pH	3	4	5	6	7	8	9	10	11
aluminium									
cadmium									
chrome									
cobalt									
cuivre									
fer									
plomb									
manganèse									
mercure									
nickel									
argent									
zinc									

Tableau 17 : Zones de pH optimum pour la précipitation des divers sels de métaux lourds

Boues résiduaires

Issu des traitements précédents, le résidu organo-minéral gorgé d'eau (au moins 95 %), doit être traité avant de s'en débarrasser, de deux façons possibles :

- soit par une remise dans le milieu naturel qui valorise le contenu organo-minéral sous label d'amendement ; il s'agit des résidus les plus riches en chaux, parfois utilisés en composts avec d'autres déchets
- soit par calcination pour les résidus pauvres en chaux

La chaux intervient dans toutes les opérations de traitement (schéma Fig. 19-b) :

- sous forme de lait de chaux avant le premier stade de déshydratation par filtration, en épaississant et en améliorant la siccité des boues, et en les stabilisant, notamment par le blocage de la putréfaction et des dégagements gazeux grâce au pH > 11 obtenu
- sous forme de chaux vive lors du traitement final de stabilisation et de stérilisation des matières organiques, dont l'extinction contribue à la déshydratation

4.3.13 **Traitement des effluents gazeux industriels**

➤ **Chaux**

La chaux est l'agent chimique le plus largement utilisé pour le traitement des gaz (on dit aussi « fumées ») émis par les centrales thermiques, les usines industrielles, ou encore par les unités de calcination d'ordures ménagères (à 95 % des besoins dans ce cas). Elle permet aussi de capter les métaux lourds de manière efficace.

Il s'agit notamment de désulfurer en éliminant le dioxyde de soufre émis (SO₂), et d'éliminer le chlore (Cl), et le fluor (F). L'agent principal des « pluies acides », dont les conséquences sont bien connues sur la santé humaine, animale et végétale, est en effet l'acide sulfurique (formé par oxydation dans l'atmosphère du dioxyde de soufre SO₂), auquel s'ajoutent l'acide chlorhydrique et l'acide fluorhydrique (chlore et fluor combinés avec l'hydrogène disponible). Souvent, HCl et HF sont présents simultanément dans les émissions gazeuses, mais les principales sources d'HF sont les briqueteries, tuileries, verreries, et fabriques de céramiques.

Si les procédés mis en œuvre pour l'élimination des molécules nocives dans les fumées présentent d'inévitables dérèglements, ils s'avèrent de plus en plus indispensables pour les raisons évoquées. Les procédés actuels utilisent à 90 % de la chaux, qu'ils soient par voie sèche, voie semi-sèche, voie semi-humide, voie humide, par condensation. La chaux réagit avec les acides présents dans les effluents gazeux en formant des sels qui sont captés en même temps que la plupart des métaux lourds lors du dépoussiérage.

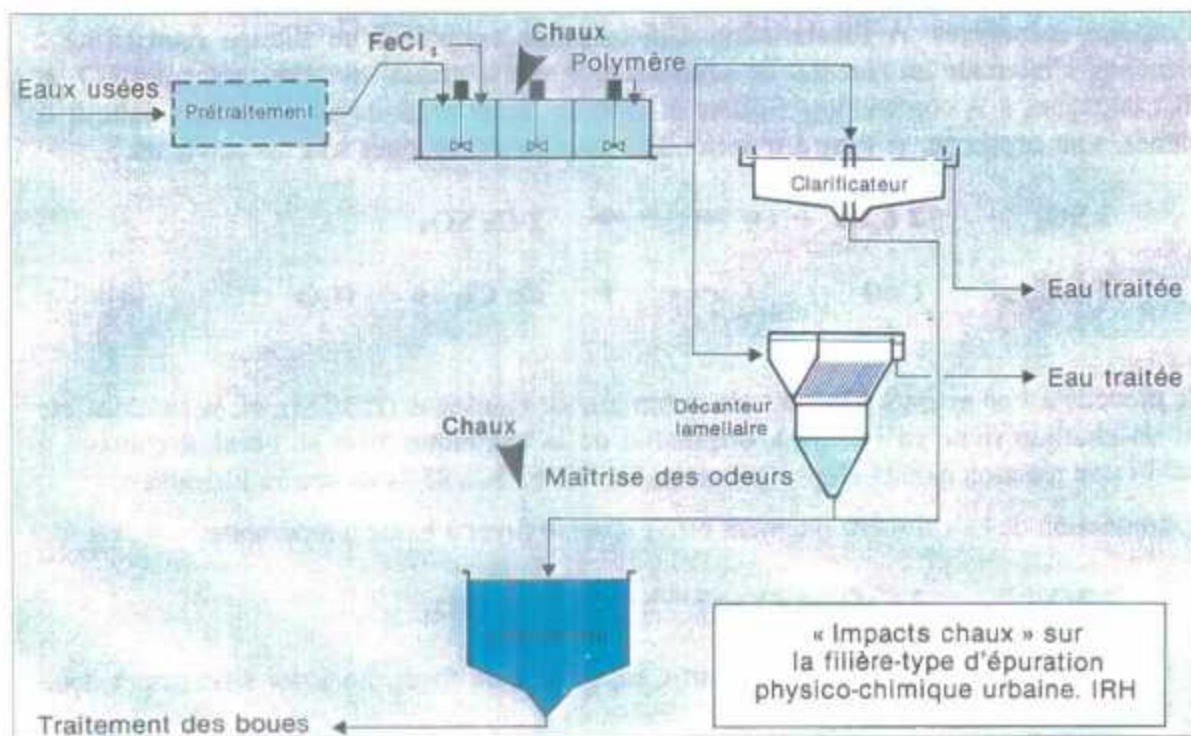


Figure 19-a : Rôles de la chaux dans une filière-type d'épuration physico-chimique urbaine

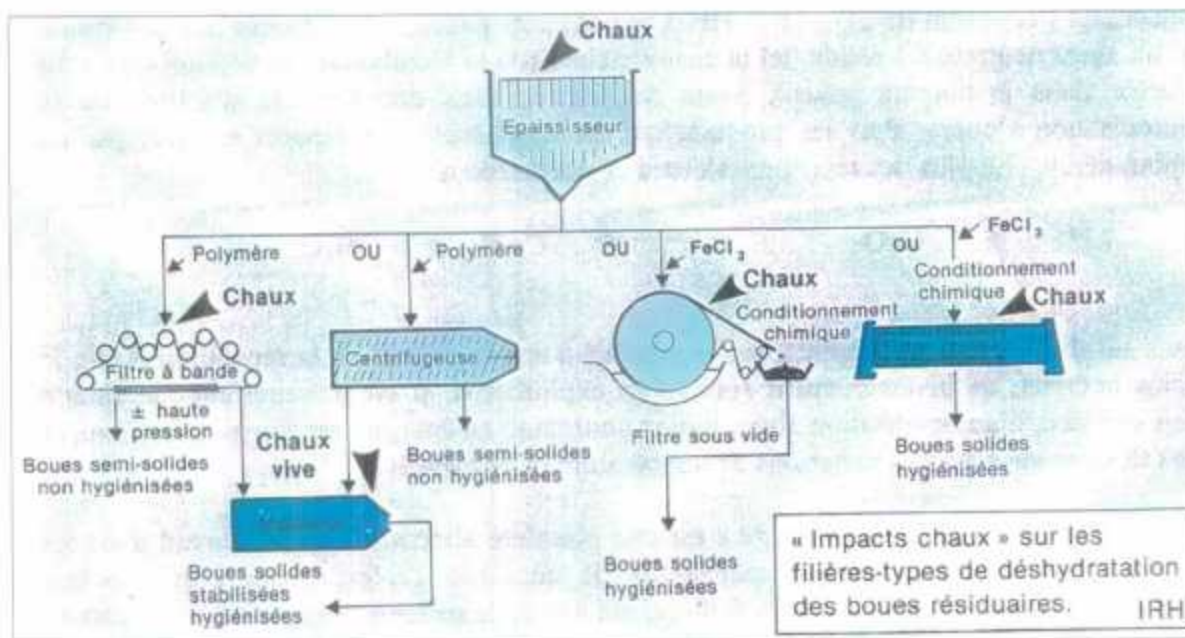
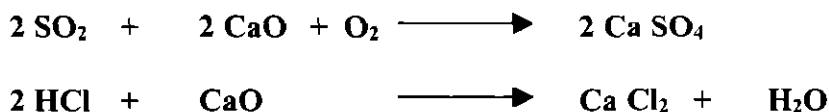


Figure 19-b : Rôles de la chaux dans une filière-type de traitement des boues résiduaire

Illustrations reproduites avec l'aimable autorisation de la société Balthazard & Cote

Le procédé par « voie sèche » est utilisé en France dans certaines usines d'incinération d'ordures ménagères. A l'installation d'incinération couplée à un filtrage final (filtre à manche), s'intercale un réacteur de neutralisation par la chaux vive des molécules SO₂ et HCl dégagées à la combustion. Sulfate et chlorure ainsi produits en poussières solides et sèches, sont captés par le filtre à manche. Les réactions chimiques sont les suivantes :

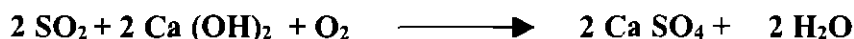


Ce procédé est en activité à la centrale thermique de Gardanne (HBCM), où le combustible est un charbon riche en soufre. L'originalité de la technique mise au point, a consisté à établir une réaction à deux étages qui neutraliserait 60 % à 95 % du soufre libérable :

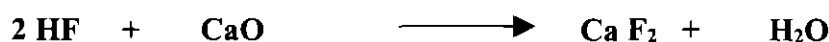
- adjonction de calcaire cru finement broyé dans le foyer à haute température



- injection de chaux éteinte dans la partie supérieure du foyer, hors des flammes et donc de température inférieure



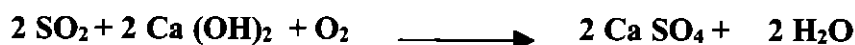
Ce procédé est aussi plébiscité dans le cas de traitement des fumées des fours verriers, concernant l'émission de SO₂, HCl, HF. Les polluants gazeux sont séparés par adsorption sur un agent neutralisant solide, tel la chaux éteinte (ou le bicarbonate de sodium) : elle est injectée dans le courant gazeux avant son entrée dans une tour de réaction, où la neutralisation s'opère. Puis les produits qui en sont issus sont séparés en aval par un dépoussiéreur. En plus des réactions décrites ci-dessus, on a :



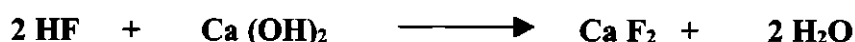
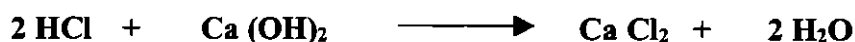
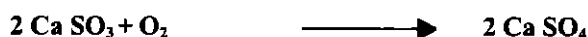
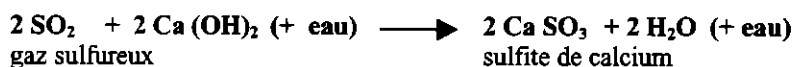
Dans ses différents cas d'application, le procédé à sec semble avoir la réputation d'être le moins onéreux, en investissement comme en exploitation. Il est présenté comme simple mais efficace, d'automatisation aisée, moins gourmand en énergie, air comprimé et eau, et plus flexible vis à vis des variations de température et de capacité.

Le procédé par « voie semi-humide » est une première alternative de traitement dans les usines d'incinération d'ordures ménagères. Il nécessite l'intercalation d'un réacteur comportant un ensemble diffuseur - turbine, qui assure le mélange entre les fumées sortant à 200° et une suspension calcique sous forme de lait de chaux diffusé en fines gouttelettes ; l'injection du lait de chaux se fait à courant croisé, puis à contre-courant. Le dépoussiéreur,

en sortie, arrête les produits de réaction en même temps que les cendres volantes. Les réactions chimiques sont alors :



la réaction complète est en fait...



Le procédé par « voie semi-sèche » semble correspondre pour certains à une variante du procédé ci-dessus (récupération de produits secs), dans laquelle les gaz sont rafraîchis par de l'eau pulvérisée avant l'injection de chaux éteinte.

Le procédé par « voie humide » est une seconde alternative au traitement dans les usines d'incinération d'ordures ménagères. Après un pré-dépoussiérage des grosses particules au moyen d'un électrofiltre, les fumées sont lavées dans une suspension calcique : pratiquement, du lait de chaux est pulvérisé en mélange avec de l'eau recyclée, dont les fines gouttelettes sont projetées à grande vitesse, formant des écrans qui sont traversés par les fumées. Au cours de cette opération, les molécules SO₂ et HCl sont neutralisées suivant les réactions décrites pour la voie semi-humide. Les fumées épurées sont aspirées vers la cheminée, tandis que les gouttelettes sont évacuées par centrifugation ; la solution aqueuse récupérée est bien sûr traitée.

Tous les procédés de traitement des effluents gazeux génèrent des résidus que la législation impose de stabiliser avant leur mise en décharge (classe 1). Le procédé de stabilisation le plus fréquent est à base de liants hydrauliques, dont la consommation est en particulier réduite avec l'usage de chaux en partie amont de la filière d'épuration.

Il est à noter que le sulfate de calcium récupéré, une fois hydraté (sulfogypse), représente à l'échelle de l'Union Européenne des millions de tonnes de déchets. Son utilisation dans la composition de plâtres à la place du gypse naturel est en cours de développement.

Au cours de ces traitements, les fumées sont aussi purifiées des métaux lourds présents : Pb, Cr, Cu, Mn, Ni, As, Cd, Hg, et des dioxynes, furanes, et autres molécules organiques.

4.3.14 Charges pour industries fabricant papiers, peintures, plastiques, et caoutchoucs

➤ Poudres calciques

Le domaine des charges blanches est clairement défini à partir d'une teneur en Ca CO_3 égale ou supérieure à 98 %. Notons qu'une partie de cette consommation est assumée par la fabrication de carbonate précipité hautement pur (CCP) à partir de chaux calcique. Les utilisations (à normes de teneurs spécifiques) sont dans la fabrication de papiers, peintures – enduits – mastics, et celle des produits pharmaceutiques et cosmétiques. Ce périmètre de travail fait l'objet d'un mémento spécial, qui ne prend cependant pas en compte le cas de l'alimentation humaine et animale.

Les autres charges carbonatées, contenant au moins 95 % de Ca CO_3 , trouvent donc leur créneau d'utilisation privilégié dans la catégorie des charges inertes. Elles sont notamment employées dans la fabrication des plastiques (revêtements de sols, etc...) et des caoutchoucs.

➤ Poudres calco-magnésiennes

Les charges calco-magnésiennes ont une place bien moins importante que celle des calcaires, car à qualités comparables, les roches magnésiennes sont plus chères (en coût de base, et en coût de transport dû à la plus grande dispersion des carrières). Elles sont donc utilisées comme charges fonctionnelles pour les propriétés apportées.

L'industrie papetière utilise rarement les carbonates magnésiens en raison de leur dureté, néfaste aux machines de la chaîne de fabrication.

Dans certaines peintures d'extérieur plus exigeantes, par exemple les peintures silicatées pour navires, la dolomie contribue à la résistance à la corrosion et aux attaques acides. Des quantités très faibles entrent aussi dans la fabrication du « blanc de Paris » et de pigments.

Enfin, l'incorporation de carbonates magnésiens aux calciques dans les charges pour plastiques, améliore tout à la fois l'extrusion à la fabrication, et la résistance et l'isolation électrique des produits finis.

➤ Chaux calcique

La fabrication du papier kraft utilise la pâte à papier au sulfate, dont l'élaboration fait intervenir en particulier de la soude, qui se retrouve en fin de processus sous forme de carbonate de sodium. L'adjonction de chaux permet alors la régénération de la soude (réactif coûteux et difficile à gérer dans l'environnement), par recombinaison du sodium avec l'anion OH , et celle du calcium avec l'anion CO_3 . La consommation avoisine 270 kg par tonne de papier kraft. De plus, la chaux sert à clarifier les eaux résiduaires.

➤ Carbonate de magnésium synthétique

Aux Etats-Unis, le carbonate de magnésium synthétique (voir paragraphe ci-dessous) est utilisé à 30 % dans la fabrication de caoutchoucs auxquels il apporte des qualités de consolidation. Il rentre également dans la composition de certaines peintures.

4.3.15. Charges pour l'industrie pharmaceutique et les cosmétiques

➤ Carbonate de magnésium synthétique

Le carbonate de magnésium synthétique correspond à un composé hydraté, qui est en particulier utilisé aux Etats-Unis. Dans l'industrie pharmaceutique, il sert d'agent inerte ou d'adsorption, tandis que dans les cosmétiques, il est apprécié pour ses excellentes qualités de rétention des essences de parfum. Il existe sous deux formes chimiques (formules empiriques), légère et lourde, en fonction du nombre de molécules d'eau présentes :

- $(\text{Mg CO}_3)_3 \cdot \text{Mg (OH)}_2 \cdot 3 \text{ H}_2\text{O}$
- $(\text{Mg CO}_3)_3 \cdot \text{Mg (OH)}_2 \cdot 4 \text{ H}_2\text{O}$

Il est fabriqué de deux façons différentes :

- à partir de saumures magnésiennes additionnées de carbonate de sodium soluble, précipitant le carbonate de magnésium
- à partir de dolomite mise en présence de CO_2 liquéfié (sous pression), qui va se saturer à chaud en précipitant d'abord le carbonate de calcium ; la solution restante est portée à une température inférieure à 100° , pour vaporiser H_2O et CO_2 , et précipiter le carbonate de magnésium (type léger habituellement)

4.3.16 Autres utilisations

➤ Crus

En céramique, les carbonates constituent des matières premières, pouvant entrer à hauteur de 20 à 30 % dans la composition, notamment pour la fabrication des « biscuits de faïence ». La dolomie est préférée au calcaire en raison d'un meilleur comportement au feu, et elle intervient encore dans la fabrication des émaux pour opacifier la glaçure. La magnésite synthétique peut aussi être utilisée.

Les carbonates crus interviennent aussi comme fondants dans la fabrication des néo-céramiques, afin d'aider à la constitution de la phase vitreuse liante. Il peut s'agir de fondant simple, comme le calcaire broyé ou de fondant composé, à l'exemple du mélange dolomie - verre broyé - borates naturels.

La recherche de l'industrie pétrolière utilise du calcaire ou de la dolomie finement broyés pour alourdir et donner de la viscosité à ses boues de forage quand elles sont acides.

Les qualités abrasives modérées des dolomies (abrasif doux), sont mises à contribution dans des filières très variées :

- poudres à récurer
- poudres à polir les métaux
- composition de pâtes dentifrices

➤ Chaux

La stabilisation de néo-céramiques monoxydes réfractaires telle la zircone, peut être obtenue par l'ajout de chaux calcique ou de magnésie, qui va compenser la réaction gênante de dilatation du produit à sa fabrication.

La recherche de l'industrie pétrolière utilise le plus souvent la chaux pour alourdir et donner de la viscosité à ses boues de forage. La pétrochimie se sert de magnésie comme agent catalyseur.

La neutralisation d'un certain nombre de substances qui sont des déchets industriels divers se fait avec la chaux : matières colorantes, produits de chrome, déchets d'uranium et déchets radioactifs.

La fabrication des colles organiques nécessite l'emploi de lait de chaux pour corriger le pH des bains et fournir le calcium lors de l'élaboration des complexes bicalciques.

La chaux est un agent déshydratant, utilisé en agriculture et en agro-alimentaire comme nous l'avons déjà vu, mais utilisé aussi pour le pétrole, les alcools, et d'autres solvants organiques.

Ses propriétés solvantes et hydrolysantes servent dans l'industrie de la mégisserie (tannerie), sous forme de pré-traitement des peaux dans des bains de chaux, afin de maîtriser l'extraction des poils.

Les brasseries se servent de chaux pour absorber le CO₂ excédentaire lors de la préparation de l'eau de constitution de la bière.

L'ostréiculture utilise la chaux en enduit des tuiles qui fixent les naissains, pour son rôle de désinfectant et d'aide-fixateur.

4.4 Principales spécifications techniques dans les domaines d'utilisation

4.4.1 Cas de la sidérurgie (fonte, fer, acier) et de la fonderie de non ferreux

Le calcaire et/ou la dolomie utilisés dans les hauts fourneaux ou convertisseurs, peuvent être soit crus, généralement sous la granulométrie de castines, parfois poudres, soit cuits (chaux), généralement en poudre, parfois en castine. Les utilisations croisées calcaire - dolomie, castine - poudre, cru - cuit sont d'usage. Le tableau 18 ci-dessous, brosse les principales spécifications.

Type de carbonate	Calcaires				Dolomies		
cru / cuit	cru		cuit = chaux		cru	cuit = chaux	
catégorie granulométrique	castines	poudres-agglomérés	castines	poudres	castines	poudres-agglomérés	poudres
composant principal	Ca CO ₃ > 85%		CaO > 93%		18% < MgO < 21%		MgO > 37%
autres composants	MgO 0.5-1.8%, SiO ₂ 0.8-4%, Al ₂ O ₃ 0.4-0.8%, Fe ₂ O ₃ 0-0.8%, CO ₂ 40-42%, H ₂ O 0-0.7%		MgO 1-3%, SiO ₂ 1-3%, Al ₂ O ₃ 1-3%, S 0.05-0.1%, CO ₂ 1-5%, H ₂ O 0-0.7%		CaO 28-31%, SiO ₂ < 6%, Al ₂ O ₃ < 4%, absence de S, P, K, Na, Zn, Cu...		CaO > 55%, SiO ₂ < 3%, Al ₂ O ₃ < 1.6%, Fe ₂ O ₃ < 1.5%, PF < 2.5%
granulométrie pour la fabric. fonte	40-100mm	< 5mm			20-80mm	# 1mm	< 1mm
granulométrie pour la fabric. acier	5-100mm		6-20mm	< 0.5mm	8-40mm et moins de 5% < 2mm, ou 5-30mm et moins de 10% < 5mm		
granulométrie pour autres fonderies	40-100mm	< 5mm					

Tableau 18 : Spécifications des produits carbonatés utilisés en fonderie

Les castines employées en sidérurgie et dans la métallurgie doivent avoir une résistance à la compression > 400 kg/cm². La chaux utilisée doit avoir une réactivité maximum pour obtenir une dissolution rapide dans le bain d'acier. Elle a donc une durée de conservation limitée qui exige un approvisionnement adapté, en flux tendu.

4.4.2 Cas de la métallurgie du magnésium

La dolomie utilisée dans la métallurgie du magnésium (technologie particulière française) a ses spécifications presque analogues à celles de l'industrie des réfractaires :

- MgO à teneur > 19 %
- teneurs en Al, Fe, Mn, Cu, Cr, Zn, très faibles

4.4.3 Cas des industries chimiques

☛ Fabrication du carbonate de sodium

Le calcaire en castines soumis au chauffage au coke, doit être apte à l'obtention de gaz riches en CO_2 , la qualité de la chaux produite ayant peu d'importance au final :

- teneurs en $\text{Ca CO}_3 > 90 \%$, en $\text{Mg CO}_3 < 2 \%$, et en $\text{Si O}_2 < 3 \%$
- plage de granulométrie 30-250 mm

La chaux utilisée répond aux exigences suivantes :

- teneurs en $\text{CaO} > 92 \%$, en $\text{MgO} < 1.75 \%$, en $\text{SiO}_2 < 2 \%$, en Fe_2O_3 et $\text{Al}_2\text{O}_3 < 0.5 \%$, en $\text{S} < 0.2 \%$
- granulométrie identique à celle du coke utilisé

☛ Fabrication d'hypochlorite de calcium

La chaux utilisée est une chaux fraîchement éteinte, qui répond aux exigences suivantes pour obtenir un produit à haute teneur en chlore actif :

- teneurs en $\text{CaO} > 90 \%$, en MgO et $\text{SiO}_2 < 0.5 \%$, en $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0.3 \%$
- granulométrie très fine et grande réactivité

☛ Fabrication d'oxyde de propylène

La chaux utilisée répond aux exigences suivantes :

- teneurs en $\text{CaO} > 97 \%$, en $\text{SiO}_2 < 0.3 \%$

4.4.4 Cas de l'industrie du verre

Le calcaire intervient sous forme de poudre crue ①, de chaux ②, et indirectement par l'utilisation de carbonate de soude pulvérisé ③, avec les spécifications suivantes :

① poudre calcaire

- exemple de composition moyenne $\text{CaO} = 54.7 \%$, $\text{CO}_2 = 43.8 \%$, $\text{MgO} = 0.6 \%$, $\text{SiO}_2 = 0.7 \%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.075 \%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0.1 \%$, $\text{Mn}_2\text{O}_3 = 0.001 \%$
- absence de minéraux infusibles à 1400° (tels grenats, sillimanite, zircon) ou fortement colorés
- plage de granulométrie 0.1-0.5 mm

② chaux

- caractéristiques similaires à celles de l'industrie chimique, donc chaux pures ou très pures, et teneurs en Fe tolérées particulièrement faibles ; granulométrie homogène

③ carbonate de soude

- pureté 95 %
- granulométrie < 1 mm

La dolomie est utilisée crue en poudre avec les spécifications suivantes :

- exemple de composition moyenne $\text{MgO} = 19.5\text{--}21\%$, $\text{CaO} = 29\text{--}36\%$, $\text{CO}_2 = 40\text{--}48\%$, $\text{SiO}_2 < 0.3\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0.1\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 < 0.1\%$, $\text{TiO}_2 = 0\%$, $\text{SO}_3 < 0.05\%$
- teneurs en minéraux infusibles à $1\ 300^\circ$ (minéraux cf calcaires ci-dessus, et autres tels disthène, andalousite, staurotide, tourmaline, rutil) < 0.3 % pour la granulométrie < 0.4 mm, et < 0.05 % pour la granulométrie < 0.1 mm
- teneurs en éléments colorants (Fe, Cr, Mn, V, Co, Cu) < 0.1 % pour les verres blancs et < 0.04 % pour les verres extra-blancs
- plage de granulométrie 0.1-0.5 mm

4.4.5 Cas de l'industrie des réfractaires et des isolants

Dans l'industrie des réfractaires, la giobertite calcinée doit contenir 90 à 96 % de MgO , avec un maximum de 8 % Fe_2O_3 , et des teneurs en Al_2O_3 et SiO_2 très faibles.

La dolomie doit, au contraire de la giobertite, contenir une certaine proportion de silice, alumine et fer pour permettre le frittage :

- exemple de composition de dolomie frittée $\text{MgO} > 26\%$, $\text{CaO} = 56\text{--}59\%$, $\text{SiO}_2 = 1\text{--}2\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 = 1\text{--}4\%$, $\text{PF} = 1.5\text{--}2.5\%$

La magnésie fondue de qualité « réfractaire » doit répondre à :

- teneur $\text{MgO} \geq 96\%$, et jusqu'à > 99 %
- teneur très faible en silice et ratio chaux/silice de 2/1
- large taille des cristaux de périclase ≥ 700 microns, jusqu'à > 1 000 microns
- densité $\geq 3.50\text{ g/cm}^3$

Dans l'industrie des isolants, la dolomie utilisée a ses spécifications techniques similaires à celles de l'industrie du verre.

La magnésie fondue de qualité « électrique » doit répondre aux critères suivants :

- teneurs très faibles en carbone, sulfures, fer, et autres minéraux en traces, et ratio chaux/silice de 1/2
- teneurs en CaO variables de 97 % à moins de 90 %, en fonction de la qualité souhaitée (haute à basse température)...
- ① haute température / 950° , voire plus : MgO 94-97 % et teneurs très faibles en calcium et silicium
 - ② moyenne température / vers 800° : MgO 93-96 %
 - ③ basse température / inférieure à 600° : $\text{MgO} < 90\%$
- confirmation par des tests de la haute résistivité électrique et de la haute conductivité thermique

4.4.6 Cas de l'activité BTP

Dans la construction, les chaux calciques ①, ou dolomitiques ②, doivent répondre aux spécifications suivantes :

- ① 85-97 % de CaO (chaux grasses), l'emploi des chaux à CaO < 85 % (chaux maigres) étant limité
- ① ② poudre homogène, exempte de surcuits qui s'hydratent tardivement et provoquent des fissures

Les chaux hydrauliques naturelles sont soumises à la norme NF P 15-310.

Dans les travaux routiers, les fillers (granulométrie < 80 microns) dolomitiques sont moins appréciés que les fillers calciques.

Les chaux servent à la stabilisation des sols argileux, et notamment la chaux dolomitique ; elles sont utilisées vives ① ou éteintes ②. Les spécifications pour les chaux sont les suivantes, permettant une action rapide :

- chimisme, ① teneur chaux libre > 80 %, chaux éteinte < 2 %, ② teneur chaux libre > 50 %
- granulométrie, ① soit 0-2mm, ou 90 % au moins de grains < 200 microns, ou 50 % au moins de grains < 80 microns, ② 90 % au moins de grains < 80 microns
- réactivité à l'eau, ① élévation de température de 60° après 25 minutes

4.4.7 Cas de l'agriculture

Dans l'agriculture, les catégories granulométriques reconnues sont les suivantes :

- concassé > 5 mm
- broyé à au moins 80 % de grains < 5 mm
- pulvérisé à au moins 99 % de grains < 1 mm et au moins 80 % de grains < 0.315 mm
- les granulés correspondent à des agglomérés de pulvérisé

Les spécifications chimiques sont présentées dans le tableau 19 ci-après.

Les autres spécifications sont les suivantes :

- valeur neutralisante de l'acidité des sols proportionnelle à la teneur CaO + MgO
- rapidité d'action mesurée par la solubilité carbonique, obtenue par la finesse granulométrique
- réactivité de solubilité citrique de moins de 20 % à plus de 75 %, selon la rapidité d'action croissante des amendements

Dans les amendements agricoles, l'usage des calcaires est soumis à la norme NF U 44-001 et celui des chaux à la norme NF U 43-001. Des extraits des normes NF U 44-001 sur les amendements magnésiens et NF U 42-001 sur les engrais magnésiens, sont donnés dans les annexes 5A et 5B.

composition %	CaO (+MgO)	Ca (OH) ₂	MgO	MgO+ CaO	SiO ₂ + Al ₂ O ₃
marnes	25-45				
calcaires	45-55				
craies	45-55				
maërl	42.5				
chaux calcitiques vives	70				
chaux calcitiques éteintes	50				
chaux de sulfatage "en roche"	>90				< 4
chaux de sulfatage "en fleur"		> 90			< 3
cendrée de chaux de sulfatage	40-80				
dolomies			> 17	> 40	
chaux magnésiennes vives			> 16	> 70	
chaux magnésiennes éteintes			> 12	> 50	

Tableau 19 : Spécifications chimiques d'usage pour les amendements agricoles

4.4.8 Cas de l'agro-alimentaire, y compris les sucreries

La fabrication du sucre utilise de la chaux afin de purifier le sucre liquide. Le produit doit être assez pur, et surtout exempt d'éléments métalliques toxiques tels Cu, Pb, Co, Sr, Cd, etc...

Les fillers employés dans l'alimentation humaine ou animale, font partie des charges blanches (à base de CCP) qui ne sont pas traitées ici.

4.4.9 Cas de l'environnement – épuration

Dans le traitement des eaux usées et industrielles, la dolomie crue en poudre et surtout les chaux sont utilisées. Les spécifications principales sont les suivantes :

- la poudre de dolomie crue utilisée sous forme de lits filtrants doit avoir une granulométrie < 100 microns
- les chaux dolomitiques, plus particulièrement employées dans les rejets de l'industrie textile et pour l'élimination des métaux lourds, doivent être exemptes de silice et de ces métaux
- les chaux calciques vives doivent présenter au moins 90 % de CaO (aux USA, c'est 93 % de CaO+MgO), et en général MgO < 1.5 %, S < 0.1 %, SiO₂ négligeable, et une réactivité de 25 mn maximum pour atteindre 60°
- les chaux éteintes doivent présenter en équivalence des teneurs d'au moins 90 % en Ca (OH)₂, d'au moins 68 % en CaO, et moins de 1.5 % en MgO

Dans le traitement des fumées, les chaux calciques ont des spécifications similaires à celles employées pour le traitement des eaux.

4.4.10 Cas des charges industrielles diverses

Il s'agit des charges calciques à teneurs en Ca CO_3 de 95 % à moins de 98 %, généralement crues et parfois calcinées en chaux, et de toutes les charges calco-magnésiennes.

Charges calciques

Pour la fabrication de papier kraft, la spécification de la chaux est la suivante :

- $\text{CaO} \geq 95 \%$
- traces MgO
- $[\text{SiO}_2 + \text{Al}_2 \text{O}_3 + \text{Fe}_2 \text{O}_3] < 3 \%$

Les poudres utilisées dans les plastiques et caoutchoucs doivent présenter :

- granulométrie < 50 microns, et tolérance de moins de 0.5 % de particules > 50 microns, dont moins de 0.01 % > 80 microns
- masse volumique apparente 1.0 à 1.2 g/cm^3
- $\text{MV} < 0.5 \%$; insolubles $< 1.5 \%$; $\text{Mn} < 0.05 \%$
- alcalinité due à $\text{Na}_2 \text{CO}_3 < 0.03 \%$

Charges calco-magnésiennes

Les carbonates magnésiens utilisés doivent présenter certains critères communs déterminants :

- indice de blancheur $> 90 \%$ au filtre tristimulus (par référence à l'indice 100 % de Ba SO_4 précipité)
- indice de réfraction situé dans la fourchette 1.55-1.62
- plage granulométrique de 2 à 100 microns suivant les emplois
- surface spécifique située dans la fourchette 0.2-10.0 m^2/g
- indice d'huile de valeur 11 à 25 (en ml d'huile de lin absorbée par 100g de poudre)
- indice d'abrasivité modéré
- densité réelle avoisinant 2.85, et densité apparente de valeur 3.30 maximum

Pour exemple de matériau apprécié, une dolomie blanche des Pyrénées contient :

- $20.0 \% < \text{MgO} < 21.7 \%$
- $29.0 \% < \text{CaO} < 31.0 \%$
- $\text{CO}_2 = 47.5 \%$
- $\text{Al}_2 \text{O}_3 < 0.1 \%$, et $\text{Fe}_2 \text{O}_3 < 0.1 \%$
- insolubles à l' $\text{HCl} < 1.0 \%$

NB : Réglementation - normalisation et spécifications sont gérées par l'Association française de normalisation (AFNOR) et sa filiale AFNOR Certification, qui sont accessibles sur le site internet afnor.fr (suivre \ Normes en ligne \ Recherche \ Recherche guidée \ choix du domaine).

5 - PRODUITS DE SUBSTITUTION

5.1 Cadre de la problématique

Le thème des produits de substitution ne peut être débattu sans rappeler la disponibilité globale des carbonates associée à leur coût faible à modéré, en particulier pour les calciques, qui constitue de façon générale une sérieuse limitation dans cette démarche. De plus, les carbonates magnésiens apparaissent irremplaçables dans certains domaines, en particulier les réfractaires. S'il est explicite que par substitution s'entend à la fois critères qualitatifs et critère économique, le problème se pose ainsi vis à vis du produit de remplacement :

- à différence de prix importante (coefficient ≥ 3), il ne s'agit plus réellement de substitution, mais de requalification
- à différence de prix à peu près « raisonnable » (coefficient 2 en gros, compris dans la fourchette de 1 à moins de 3), la recherche de produits ayant clairement de meilleures qualités est envisageable ; les solutions mixtes sont aussi possibles
- la substitution au sein des carbonates entre calciques et calco-magnésiens constitue une variante ; en règle générale, la substitution se fait dans le sens des calco-magnésiens qui apportent leurs qualités particulières, et de toute façon, ils sont plus chers
- la substitution par des sous-produits industriels dont il serait autrement difficile et coûteux de se débarrasser, est un cas particulier ; dans une certaine mesure, ils sont utilisés à la place de carbonates au motif principal de responsabilisation et de gestion collective de l'environnement

5.2 Aperçu des substitutions par filière industrielle ou agricole



Cas de la sidérurgie – fonderie (fer – acier et non ferreux)

Dans les hauts fourneaux, le calcaire est un moins bon fondant et agglomérant que la dolomie. Mais si la dolomie a un prix encore voisin de celui du calcaire, les laitiers ne peuvent contenir plus de 8 % de MgO, à cause de l'augmentation de viscosité résultante.

Les excellentes qualités de fondant de la fluorine sont appréciées, mais à un coût supérieur. De même, l'olivine, la forstérite et la dunité remplacent avantageusement la dolomie, mais à coût encore nettement supérieur ; les qualités apportées sont :

- une perte au feu bien plus faible (2 % contre 40 % à la dolomie)
- une augmentation de la capacité d'agglomération des fines de minerais de fer
- une meilleure fluidité, par la neutralisation des alcalins qui perturbent le bain par des accrochages sur les parois du four et des prises en masse

Les autres produits additifs possibles tels la serpentine et surtout la silice, ont des finalités différentes qui n'en font pas des produits concurrents mais complémentaires.

Dans les fours-convertisseurs en particulier, et dans toute la filière sidérurgique en général, les chaux n'ont pas d'équivalents à prix comparables.



Cas de la métallurgie du magnésium

Bien que les deux processus industriels dominants (Pidgeon et électrolytique) écartent l'utilisation des carbonates magnésiens en tant que minerais directs (originalité Magnétherm), on ne peut parler de substitution, car tous ces procédés font appel aux produits cuits calciques et magnésiens pour isoler le magnésium métal.



Cas des industries chimiques

La fabrication des composants chimiques de base, à l'exemple du carbonate de sodium, pourrait être envisagée avec la dolomie en remplacement de calcaire, car elle est calcinée à moindre température. Mais l'exigence de proximité de gisements de sels et de carbonates, est au désavantage des dolomies, de centres d'extraction dispersés.



Cas de la verrerie

Dans la verrerie, l'apport de calcium peut trouver un substitut par l'utilisation de dolomie, feldspath, phonolite. Cependant, il existe un attachement traditionnel des verriers français au calcaire, qui ne les incite guère à l'emploi de substances plus chères. Il en est de même pour l'utilisation potentielle de magnésite, kiésérite ($\text{Mg SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$) qui contient du soufre, forstérite.

La laine de verre renferme 2 à 13 % de MgO qui peut être fourni par d'autres sources de magnésium que la dolomie.



Cas des réfractaires et isolants

Les carbonates magnésiens sont irremplaçables dans ces domaines par leur apport qualitatif au meilleur prix. La magnésite apporte, par rapport à la dolomie, une meilleure résistance et durabilité des revêtements internes des hauts fourneaux et fours-convertisseurs.



Cas de l'agriculture

En amendement, l'usage intensif en France des craies paraît justifié par la large localisation de la ressource dans l'auréole du Bassin de Paris.

A l'évidence, les dolomies et les carbonates magnésiens sont mieux appréciés, car ils apportent en même temps que le calcium du magnésium, indispensable au métabolisme végétal ; ils associent donc amendement et fertilisant. La dispersion des gisements et leur moindre disponibilité quantitative se traduit par des coûts supérieurs qui tempèrent leur emploi.

Autre exemple de fertilisant intéressant mais cher, la kiésérite ($\text{Mg SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$), qui apporte magnésium et soufre. Ce sulfate de magnésium monohydraté existe naturellement dans les dépôts évaporitiques.

On a vu que l'agriculture utilise des fertilisants sous forme de composts qui sont un mélange de déchets traités et de carbonates et/ou de chaux ; on peut ajouter dans ce volet l'exemple d'emploi de sous-produits industriels riches en calcium, comme les écumes de sucrerie.



Cas de l'agro-alimentaire

Le magnésium étant également indispensable au métabolisme animal, les charges calco-magnésiennes entrent dans la composition de farines animales. Dans l'industrie sucrière, la chaux dolomitique peut remplacer la chaux calcique.



Cas du BTP – construction

L'utilisation de chaux calciques ou magnésiennes dans la construction, semble dépendre au plan local et régional d'habitudes et de conditions économiques particulières.

Sur la concurrence des chaux par rapport aux ciments, le problème se poserait à l'envers. Les chaux (chaux vives et chaux hydrauliques) ne pouvant prétendre remplacer les ciments (en liant principal ou liant entrant dans la composition de bétons hautement résistants), elles pourraient être plus mises à contribution comme :

- liant principal dans les constructions légères
- liant secondaire du mortier dans les élément préfabriqués, allégés et modulaires s'intégrant aux structures lourdes et résistantes (à base de bétons résistants fabriqués avec un ciment)



Cas du BTP – usages routiers

Les fillers calcaires étant imbattables en termes de coût et de disponibilité, l'utilisation de sous-produits industriels se fait plus dans l'objectif de valoriser et d'éliminer ces déchets pour la préservation de l'environnement que pour la recherche de substituts. Nous avons vu dans le chapitre sur les utilisations, le cas de constitution de couches de forme avec des laitiers de forges, des cendres volantes de centrales thermiques, ou encore du phosphogypse.



Cas de l'environnement – traitement des eaux

La chaux dolomitique peut être utilisée à la place de chaux calcique pour le traitement des eaux en général. Elle semble plus facilement s'y substituer dans le cas du traitement des eaux usées : dans l'industrie textile par exemple, elle aide à extraire CO_2 , P, As, SiO_2 , F, des eaux polluées.

Une façon de détourner le problème de la substitution est de considérer des utilisations combinées. C'est le cas des réactifs binaires ou ternaires employés pour coaguler et floculer les matières organiques et les phosphates en suspension dans les eaux usées, qui sont à base de chaux calcique, de coagulant métallique et de polymère.

La soude caustique concurrence la chaux pour la neutralisation des eaux et effluents acides. Si, à résultat comparable, la chaux est nettement plus économique, les avantages de la soude sont un stockage et une mise en œuvre plus faciles, qui sont des arguments décisifs pour nombre d'unités de traitement de petite taille. Aussi les chauffourniers s'efforcent-ils de commercialiser la chaux dans des conditionnements souples plus pratiques ou mieux, sous forme de lait de chaux à concentrations de 20 % à 40 %.



Cas de l'environnement – traitement des effluents gazeux

Dans les procédés d'épuration des fumées par voies humide ou semi-humide, l'agent neutralisant peut être employé en suspension ou en solution :

- en suspension, c'est essentiellement du lait de chaux qui est utilisé ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)
- en solution, il s'agit alors de soude caustique (NaOH), ou de bicarbonate de sodium (NaHCO_3)



Cas des charges

Dans le domaine des charges pour plastiques et caoutchoucs, le très faible prix des calcaires blancs et des craies les rend incontournables. Seules les charges calco-magnésiennes peuvent concurrencer les charges calciques. Vis à vis des autres substances mentionnées ci-dessous, on peut considérer ici qu'elles présentent des caractéristiques assez différentes pour ne pas se poser en concurrence directe.

Remarquons que dans le domaine voisin des charges blanches à usage industriel, à l'exemple des peintures et des papiers, on observe plutôt la combinaison des carbonates avec d'autres substances, telles le talc, le kaolin, les micas, la wollastonite, l'oxyde de titane, etc... Si le prix de ces dernières substances est double à triple du prix des carbonates, elles permettent de maintenir certaines conditions de fabrication ou de qualités des produits recherchés : rhéologie améliorée, blancheur, brillance, pouvoir couvrant, réactivité en milieu acide, etc... .

BIBLIOGRAPHIE ET MEMENTOS DU BRGM

OUVRAGES, PLAQUETTES, RAPPORTS, REVUES

- Répertoire par nom(s) d'auteur(s)

- Balthazard et Cotte : La chaux pour bâtir et décorer. Nathan Pratique. 1991.
- Balthazard et Cotte : La chaux et ses utilisations. Techno Nathan. 1990.
- Béziat P., Bornuat M. (1995) - Carte minière de la France métropolitaine : situation 1994. BRGM – SMN. Juin 1995.
- Darbé J. et Gilleron G. - Les produits magnésiens utilisables en agriculture.
- Dumont Ph. et Bechoux E. (1976) – L'utilisation de la chaux pour le traitement des eaux. Extrait de La Technique de l'Eau et de l'Assainissement. n° 354-355. Juin-Juillet 1976.
- Choquet* F. et Huet* J. (1977) – Les chaux : classification et terminologie. Revue des Matériaux de Construction. n° 706. Mars 1977. *Centre de Recherches Routières – Bruxelles.
- Le Berre P. (1997) – Estimation de la consommation française de matériaux de carrière et produits dérivés. Synthèse des travaux réalisés en 1997 (données 1994-95-96). BRGM R39705 - Octobre 1997.
- Le Berre P. (1998) – Estimation de la consommation française de matériaux de carrière et produits dérivés. Synthèse des travaux réalisés en 1998 (données 1993-97). BRGM R40400 - Décembre 1998.
- Le Berre P. (2000) – Panorama du marché français des matériaux de carrière et produits dérivés. Edition 1999 (données 1998). BRGM R40907 – Janvier 2000.
- Le Berre P. (2001) – Panorama du marché français des matériaux de carrière et produits dérivés. Edition 2000 (données 1999). BRGM RP-50853-FR – Avril 2001.
- Scolari G., Lille R. (1973) – Nomenclature et classification des roches sédimentaires (Roches détritiques terrigènes et roches carbonatées). Bulletin du BRGM (2^e série) – Section IV, n°2-1973, pp 57-132.
- Soubias D. (1972) – Contribution à l'étude minéralogique et métallogénique des gisements de carbonates pyrénéens de Sainte Colombe sur Guette et de Batère. Thèse de spécialité, Université Paul Sabatier – Toulouse, 1972
- Soubias D. (1973) – Reconnaissance macroscopique et microscopique des carbonates naturels par une méthode de coloration simple. Bulletin du Centre de Recherche de la SNPA-Pau, pp 285-289, Juin 1973
- Thomas H.P. (1995) – Utilisation de la chaux dans le traitement des eaux. Ciments – Bétons – Plâtres – Chaux. n° 817. Juin 1995.
- Villalard P. (1975) - Cartes de situation des principales matières extractives du bassin de Paris avec la notice. Rapport BRGM 75 BDP 013.

- Répertoire par titre de document

- Ciments, bétons, plâtres, chaux (1997) – n° 826. pp. 661-664. Mars 1997.
- Dynamique des bassins sédimentaires (1976) - pp. 191-216. Association des Géologues du Sud-ouest. Journées de Pau. 9 et 10 décembre 1976.
- Industrial Minerals: Feeling the chinese burn - Fused magnesia focus. pp. 21-33, May 2000.
- Industrial Minerals: Mineral processing - Special lime calcination. pp. 35-41, July 2000.
- La chaux dans le traitement des eaux. Chambre Syndicale Nationale des Fabricants de Chaux Grasses et magnésiennes. Plaquette. 1995.
- La chaux dans les techniques routières. Syndicat National des Fabricants de Ciment et de Chaux. Plaquette. 1980.
- La chaux. Syndicat National des Fabricants de Ciment et de Chaux. Plaquette. 1978.
- La Lettre de l'Industrie de la Chaux – n° 5 (septembre 1995) ; n° 7 (juillet 1996) ; n° 9 (mars 1997) ; n° 10 (juin 1997) ; n° 11 (octobre 1997) ; n° 13 (février 1999) – Chambre Syndicale Nationale des Fabricants de Chaux Grasses et Magnésiennes.
- Les enduits et badigeons traditionnels – Technique. Le Mausolée : Institut Supérieur de Recherche et de Formation aux Métiers de la Pierre de Rodez. Mars 2000.
- Les Techniques de l'Industrie Minérale. Hors Série n° 1/2000.
- L'Industrie Céramique et Verrière (1995) – n° 908. p. 168. Octobre 1995.
- Matériaux calcaires et gestion de la ressource : le projet Materloc "calcaires" - Mines et Carrières – Industrie Minérale – Mars 1996.
- Matériaux de construction et produits de carrière : Statistiques UNICEM 1994. N° 681. Novembre 1995.
- Matériaux de construction et produits de carrière : Statistiques UNICEM 1995. N° 688. Novembre 1996.
- Matériaux de construction et produits de carrière : Statistiques UNICEM 1996. N° 694. Novembre 1997.
- Matériaux de construction et produits de carrière : Statistiques UNICEM 1997. N° 700. Novembre 1998.
- Matériaux de construction et produits de carrière : Statistiques UNICEM 1998. N° 705. Novembre 1999.
- Matériaux de construction et produits de carrière : Statistiques UNICEM 1999. Données provisoires – Mars 2001.
- Mémento des Mines et Carrières - Aide-mémoire de l'Exploitant. Société de l'Industrie Minérale : 37^e Edition, nouvelle série en cinq volumes, 1995.
- Revue Générale des Routes (1999) Extrait de la RGRA. N° Hors série. Janvier 1999.

The Industrial Minerals Handy Book (1999) – 3^e édition P.W. Harben. Public Industrial Minerals Information Ltd.

Traitement des sols à la chaux et/ou aux ciments – Note d'information du SETRA. 1990

Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – Guide technique du SETRA-LCPC. Janvier 2000

World Stone Industry: Report 1996. Société Editrice Apuana.

QUELQUES OUVRAGES DE BASE

Bariand P., Cesbron F., Geffroy J. (1978) – Les minéraux, leurs gisements, leurs associations. Minéraux et Fossiles. Editions du BRGM.

Bernard M. et Busnot F. (1996) - Usuel de chimie générale et minérale. Dunod.

Biju-Duval B. (1999) – Géologie sédimentaire - Bassins, environnements de dépôts, formation du pétrole. Paris, Editions Technip, 736 p.

Mattauer M. (1980) – Les déformations des matériaux de l'écorce terrestre. 2^e éd. corr., Paris : Hermann, 493 p. (Collection Méthodes).

Scoffin T.P. (1987) ; Glasgow – An introduction to carbonate sediments and rocks. Blackie USA: Chapman & Hall, New York. 274 p.

Tucker M.E. and Wright V.P. with a chapter by Dickson J.A.D. (1990) ; Oxford – Carbonate sedimentology.; Boston, Mass.: Blackwell Scientific Publ.; Brookline Village, Mass.: Publ. Business Services (Distributors USA). 482 p.

Tucker M.E. et al. (1990) ; Oxford – Carbonate platforms: Facies, Sequences, and Evolution. Boston, Mass.: Blackwell Scientific Publ.; Brookline Village, Mass.: Publ. Business Services (Distributors USA). Special publication number 9 of the International Association of Sedimentologists. 328 p.

SELECTION DE MEMENTOS SUR LE THEME DES CARBONATES

Bourgueil B. (1992) - Mémento Roches et Minéraux Industriels : Les carbonates et sulfates de sodium. Rapport BRGM R36299 – Décembre 1992.

Coumoul A. (2000) - Mémento Roches et Minéraux Industriels : Carbonates calciques et magnésiens et produits dérivés à usage industriel et agricole. Rapport BRGM – RP-50806-FR. Décembre 2000

Galtier L. (1993) - Mémento Roches et Minéraux Industriels : Granulats. Rapport BRGM R37826 – Septembre 1993.

- Marteau P. (1989) - Mémento Roches et Minéraux Industriels : Dolomie, magnésite et produits dérivés à usage industriel et agricole. Rapport BRGM 89 SGN 522 GEO – Juillet 1989. *Mise à jour cf Coumoul A. (2000)*
- Marteau P., Grès M. (1988) - Mémento Roches et Minéraux Industriels : Les calcaires, craies, marbres et produits dérivés à usage industriel et agricole. Rapport BRGM 88 SGN 355 GEO – Mai 1988. *Mise à jour cf Coumoul A. (2000)*
- Pasquet J.F. (1996) - Mémento Roches et Minéraux Industriels : Calcaires blancs pour charges. Rapport BRGM R38742 – Janvier 1996.
- Spencer C. (1990) - Mémento Roches et Minéraux Industriels : Matériaux pour ciment. Rapport BRGM – Décembre 1990.

POUR EN SAVOIR PLUS

Une sélection de serveurs Internet gérés ou hébergés par le BRGM et de serveurs partenaires

• Serveur BRGM www.brgm.fr

- Présentation des programmes de recherche du BRGM (rubrique R&D)
- Rapport annuel 1999 du Service public (rubrique BRGM en France)
- Informations sur les activités du BRGM

• Serveur InfoTerre <http://infoterre.brgm.fr>

• Banques de données :

Banque des données du sous-sol - Banque de données des eaux souterraines - Banque de géologie marine - Banque des données géochimiques - Banque des données gravimétriques - Inventaire des anciens sites industriels et activités de service (BASIAS) - Référentiel géologique (en cours de réalisation) - Cartographie géologique au 1/250 000 (en cours de réalisation) - Extrait de la Banque de la sismicité historique de la France (SIRENE)

En 2001, plusieurs autres banques de données seront publiées gratuitement sur Internet à la demande du ministère de l'Aménagement du territoire et de l'environnement : Banque des mouvements de terrain - Intégralité de la Banque de la sismicité historique de la France (SIRENE) - Banque des cavités souterraines

• Catalogue des Editions BRGM : ouvrages scientifiques et techniques, des guides régionaux, des ouvrages pour les jeunes

• Bibliothèque centrale : consultation gratuite des résumés des rapports de Service public réalisés par le BRGM depuis 1996 (plus de 1 000 rapports) ainsi que la liste des ouvrages et périodiques consultables

• Cartothèque : état d'avancement du programme de la carte géologique de la France au 1/50 000 (plus de 900 cartes levées) et au 1/1 000 000 (6^e édition en une coupure) ; commande en ligne des coupures papier avec notices disponibles et de leur image scannée et géoréférencée - Carte des aquifères de la France au 1/1 000 000 également disponible sous forme vecteur renseigné

• Autres serveurs dédiés à la mise à disposition de données thématiques

- Réseau national des données sur l'eau <http://www.rnde.tm.fr/>
- Serveur sur la situation hydrologique et les données piézométriques de l'Agence de l'eau Seine-Normandie <http://agences-eau.brgm.fr/>
- Serveur du réseau piézométrique de la région Centre <http://piezocentre.brgm.fr/>
- Base des données géologiques de la région Pays-de-la-Loire <http://pal.brgm.fr/>

- Atlas communaux des risques naturels (cartographie des aléas) de la Martinique et de la Guadeloupe <http://www.brgm.fr/risques/antilles>

• Serveurs sur des projets de recherche

- GeoFrance 3D, programme scientifique d'imagerie géologique et géophysique 3D du sous-sol de la France <http://www.brgm.fr/geofrance3d/>
- HDR - Soultz, le programme européen de recherche en géothermie profonde <http://www.soultz.net/>
- MINEO, projet européen sur la télédétection et l'environnement minier <http://www.brgm.fr/mineo/>
- Floodgen, projet européen sur la télédétection et les risques de ruissellement <http://dgrwww.epfl.ch/SIRS/projets/floodgen/>

• Serveurs sur les Systèmes d'information géographique

- Systèmes d'information géographique en Languedoc-Roussillon <http://www.siglr.org/>
- GIS Andes sur la géologie et la métallogénie des Andes <http://www.brgm.fr/sigand/>
- GIS Gondwana sur les potentiels métallifères du Gondwana <http://gondwana.brgm.fr/>

• Quelques serveurs partenaires

- Foregs, Forum of the European Geological Surveys Directors <http://www.pgi.waw.pl/foregs/index.html>
- EuroGeoSurveys, association des Services géologiques européens <http://www.eurogeosurveys.org/>
- ANTEA, filiale d'ingénierie et conseil - Groupe BRGM <http://anteaweb.brgm.fr/>
- IRIS Instruments, filiale du BRGM pour les appareils de mesures géophysiques, hydrogéologiques et géotechniques <http://www.iris-instruments.fr/>
- GDTA, Groupement pour le développement de la télédétection aérospatiale <http://www.gdla.fr/>
- CIFEG, Centre international pour la formation et les échanges géologiques <http://www.cifeg.org/>

• Voir aussi

- Webminéral, l'atlas minéralogique (495 minéraux et variétés, 1 200 photos et un glossaire de plus de 250 termes) <http://webmineral.brgm.fr:8003/mineraux/>
- Cantal, tout sur le plus grand volcan d'Europe <http://www.brgm.fr/volcan>

ANNEXE 2

Exports et imports français de 1994 à 1999...

de calcaire et dolomie à usage industriel et agricole : Tabl. A
de chaux grasses et magnésiennes : Tabl. B
de giobertite et de magnésie : Tabl. C

Carbonates calciques et magnésiens et produits dérivés à usage industriel et agricole

ORIGINE	FLUX	1994		1995			1996			1997			1998			1999			Bilan : cumulé par pays			
		QUANTITE (t)	VALEUR (kF)	QUANTITE (t)	VALEUR (kF)	Evolution tonnage %	QUANTITE (t)	VALEUR (kF)	Evolution tonnage %	QUANTITE (t)	VALEUR (kF)	Evolution tonnage %	QUANTITE (t)	VALEUR (kF)	Evolution tonnage %	QUANTITE (t)	VALEUR (kF)	Evolution tonnage %	QUANTITE (t)	% sur tonnage	VALEUR (kF)	% sur valeur
ALLEMAGNE	export	418 225	113 569	391 766	101 804	-6	370 357	67 302	-5	283 222	60 260	-24	292 232	62 418	3	368 269	75 174	25	2 122 071	39.9	480 527	30.8
	import	27 229	7 609	39 320	7 464	44	57 853	11 601	47	41 933	12 170	-28	31 159	11 288	-26	32 200	8 929	3	229 697	7.4	59 061	6.6
	balance	390 996	105 960	352 443	94 340	-10	312 504	55 701	-11	241 289	48 090	-23	261 073	51 130	8	334 069	66 245	28	1 892 374		421 466	
	volume	445 454	121 178	431 089	109 268	-3	428 210	78 903	-1	325 155	72 430	-24	323 391	73 706	-1	398 469	84 103	23	2 351 768	27.8	539 588	21.9
AUTRICHE	export	0	0	1 969	1 844	ns	0	0	-100	2 831	2 220	ns	2 037	1 582	-28	0	0	-100	6 837	0.1	5 646	0.4
	import	0	0	4 983	2 924	ns	0	0	-100	2 008	1 150	ns	10 517	3 707	424	0	0	-100	17 506	0.6	7 781	0.9
	balance	0	0	-3 014	-1 080	ns	0	0	-100	825	1 070	ns	-8 480	-2 125	-1128	0	0	-100	-10 669		-2 135	
	volume	0	0	6 952	4 768	ns	0	0	-100	4 837	3 370	ns	12 554	5 289	160	0	0	-100	24 343	0.3	13 427	0.5
BELGIQUE-LUXEMBOURG	export	264 818	58 888	271 380	55 128	2	175 514	46 739	-35	185 950	49 420	6	204 680	57 703	10	191 376	57 929	-6	1 293 718	24.3	326 607	20.9
	import	397 828	84 537	384 270	99 356	-3	390 816	91 281	2	401 701	103 860	3	438 263	115 685	9	457 772	132 360	4	2 470 448	78.6	627 079	69.6
	balance	-132 810	-25 649	-112 890	-44 228	-15	-215 301	-44 542	91	-215 751	-54 440	0	-233 583	-57 982	8	-266 396	-74 431	14	-1 176 731		-301 472	
	volume	662 446	143 225	655 650	154 484	-1	566 326	138 020	-14	587 651	153 280	4	642 943	173 388	8	849 148	190 289	1	3 764 167	44.7	952 686	38.7
ESPAGNE	export	32 098	12 128	42 760	18 460	33	34 695	11 461	-19	37 812	10 540	9	33 770	13 184	-11	34 191	11 074	1	215 326	4.0	76 857	4.9
	import	3 520	1 343	5 411	2 110	54	10 658	3 275	101	23 149	26 010	113	34 203	42 836	48	32 277	21 933	-6	109 418	3.5	97 507	10.8
	balance	28 578	10 785	37 349	16 350	31	23 837	8 186	-36	14 663	-15 470	-38	-433	-29 642	-103	1 914	-10 859	-542	105 908		-20 650	
	volume	35 618	13 471	48 171	20 570	35	45 553	14 736	-5	60 861	36 550	34	67 973	58 030	12	66 468	33 007	-2	324 744	3.9	174 364	7.1
ITALIE	export	10 356	6 740	8 007	4 782	-23	7 025	3 689	-12	17 984	8 700	156	15 802	7 671	-13	14 252	7 441	-8	73 226	1.4	36 033	2.5
	import	28 394	10 087	34 533	12 402	22	35 476	12 778	3	41 753	15 910	18	35 423	14 175	-15	28 840	11 343	-18	204 519	6.6	78 685	8.5
	balance	-18 038	-3 347	-26 526	-7 610	47	-28 451	-9 089	7	-23 769	-7 210	-16	-19 621	-6 504	-17	-14 688	-3 902	-26	-131 293		-37 662	
	volume	38 750	16 827	42 540	17 194	10	42 501	16 467	0	59 737	24 610	41	51 025	21 846	-15	43 192	18 784	-15	277 745	3.3	115 728	4.7
NORVEGE	export	70 064	6 312	77 621	5 979	11	57 972	4 886	-25	0	0	-100	57 722	4 915	ns	87 859	7 578	52	351 236	6.6	26 470	1.8
	import	2 018	1 473	1 224	925	-39	1 009	787	-18	0	0	-100	700	546	ns	0	0	-100	4 951	0.2	3 733	0.4
	balance	68 046	3 839	76 397	5 054	12	56 963	3 899	-25	0	0	-100	57 022	4 367	ns	87 859	7 578	54	346 287		24 737	
	volume	72 082	6 785	78 845	6 904	9	58 981	5 473	-25	0	0	-100	58 422	5 463	ns	87 859	7 578	50	356 189	4.2	32 203	1.3
PAYS BAS	export	70 791	18 434	70 133	18 202	-1	52 930	17 112	-25	54 135	16 730	2	46 381	16 182	-14	33 751	15 183	-27	328 121	6.2	101 823	6.5
	import	356	405	557	415	68	8 766	6 869	1474	739	410	-92	848	1 815	15	11 435	3 687	1248	22 701	0.7	13 601	1.5
	balance	70 435	18 029	69 576	17 787	-1	44 164	10 243	-37	53 396	16 320	21	45 533	14 347	-15	22 316	11 496	-51	305 420		88 222	
	volume	71 147	18 839	70 690	18 617	-1	61 690	23 981	-13	54 874	17 140	-11	47 228	17 977	-14	45 186	18 870	-4	350 822	4.2	115 424	4.7
SUISSE	export	82 466	22 130	51 641	17 149	-17	39 030	16 171	-24	40 171	16 700	3	35 057	14 862	-13	0	0	-100	228 365	4.3	87 032	5.6
	import	25 836	61	466	257	-98	0	0	-100	18	1	ns	0	0	-100	0	0	0	26 420	0.6	319	0.0
	balance	56 630	22 069	51 175	16 892	40	39 030	16 171	-24	40 153	16 699	3	35 057	14 862	-13	0	0	-100	201 945		86 713	
	volume	88 402	22 191	52 107	17 406	-41	39 030	16 171	-25	40 189	16 701	3	35 057	14 862	-13	0	0	-100	254 785	3.0	87 351	3.5
DIVERS	export	133 145	68 717	93 433	56 582	-30	99 158	71 714	6	143 884	73 680	45	101 208	64 072	-30	131 998	81 261	30	702 826	13.2	418 026	26.7
	import	1 029	2 797	692	1 710	-33	3 420	3 107	394	2 648	2 759	-23	2 203	1 191	-17	7 762	3 715	252	17 754	0.6	15 279	1.7
	balance	132 116	65 920	92 741	54 872	-30	95 738	68 607	3	141 236	70 921	48	99 005	62 881	-30	124 236	77 546	25	685 072		400 747	
	volume	134 174	71 514	94 125	58 292	-30	102 578	74 821	9	146 532	76 439	43	103 411	65 263	-29	139 780	84 976	35	720 580	8.8	431 305	17.5
TOTAL	export	1 061 863	305 718	1 008 710	279 840	-5	836 881	238 874	-17	765 989	238 250	-8	789 689	242 599	3	859 696	255 640	9	5 321 728	100.0	1 561 021	100.0
	import	486 110	108 312	471 459	127 563	-3	508 187	129 898	8	513 947	162 270	1	553 316	181 245	8	570 388	181 987	3	3 103 415	100.0	901 055	100.0
	balance	575 853	197 406	537 251	152 277	-7	328 694	109 176	-39	252 042	75 980	-23	235 373	51 354	-7	289 310	73 653	23	2 218 313		659 966	
	volume	1 548 073	414 030	1 480 189	407 503	-4	1 344 878	368 572	-9	1 279 936	400 520	-5	1 342 005	433 844	5	1 430 082	437 607	7	8 425 143	100.0	2 462 076	100.0

ORIGINE	FLUX	1994		1995			1996			1997			1998			1999			Bilan : cumul par pays			
		QUANTITE (t)	VALEUR (kF)	QUANTITE (t)	VALEUR (kF)	Evolution tonnage %	QUANTITE (t)	VALEUR (kF)	Evolution tonnage %	QUANTITE (t)	VALEUR (kF)	Evolution tonnage %	QUANTITE (t)	VALEUR (kF)	Evolution tonnage %	QUANTITE (t)	VALEUR (kF)	Evolution tonnage %	QUANTITE (t)	% sur tonnage	VALEUR (kF)	% sur valeur
AFRIQUE DU SUD	export	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33 184	18 920	ns	33 184	0.9	18 920	1.2
	Import	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	ns	0	0.0	0	0.0
	balance	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33 184	18 920	ns	33 184			
	volume	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33 184	18 920	na	33 184	0.6	18 920	0.8
ALLEMAGNE	export	353 072	130 146	343 782	124 901	-3	425 916	144 545	24	417 110	150 040	-2	409 239	187 120	-2	352 687	158 308	-14	2 301 806	63.2	903 060	57.7
	Import	116 254	49 491	117 868	51 879	1	91 246	40 571	-23	115 861	47 520	27	120 136	47 722	4	123 835	50 435	3	685 200	37.1	286 718	37.0
	balance	236 818	81 655	225 914	73 022	-5	334 670	103 974	48	301 249	110 420	-10	289 103	139 398	-4	228 852	107 873	-21	1 616 606		616 342	
	volume	469 326	178 637	461 650	176 780	-2	517 162	185 116	12	532 971	205 660	3	529 375	234 842	-1	478 522	208 743	-10	2 987 006	54.4	1 189 778	50.8
BELGIQUE-LUXEMBOURG	export	89 696	39 024	61 322	26 189	-32	44 481	20 435	-27	20 452	9 780	-54	48 082	22 100	135	53 612	24 038	11	317 655	8.7	141 566	9.0
	Import	105 186	40 993	92 447	36 632	-12	96 131	36 313	4	119 047	48 060	24	113 145	45 815	-5	114 697	48 094	1	640 653	34.7	255 907	33.0
	balance	-15 490	-1 969	-31 125	-10 443	101	-51 650	-15 878	68	-98 595	-38 280	91	-65 053	-23 715	-34	-61 085	-24 056	-6	-322 998		-114 341	
	volume	194 882	80 017	153 789	62 821	-21	140 612	56 748	-9	139 499	57 840	-1	161 237	67 915	16	168 309	72 132	4	958 308	17.5	397 473	17.0
ESPAGNE	export	463	1 624	120	218	-74	96	138	-20	254	140	165	34	24	-87	591	240	1638	1 558	0.0	2 384	0.2
	Import	29 850	13 088	12 516	4 075	-58	34 484	9 892	176	61 255	23 900	78	91 932	31 219	50	85 304	34 978	4	325 341	17.6	117 152	15.1
	balance	-29 387	-11 464	-12 396	-3 857	-58	-34 388	-9 754	177	-61 001	-23 760	77	-91 899	-31 195	51	-84 713	-34 738	3	-323 783		-114 788	
	volume	30 313	14 712	12 636	4 293	-58	34 580	10 030	174	61 509	24 040	78	91 966	31 243	50	95 895	35 218	4	326 899	6.0	119 536	5.1
FINLANDE	export	21 693	9 917	47 168	20 376	117	89 734	34 351	90	144 820	50 010	61	116 730	58 662	-19	135 002	67 623	16	555 147	15.3	240 939	15.4
	Import	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	47	ns	0	0	-100	1	0.0	47	0.0
	balance	21 693	9 917	47 168	20 376	117	89 734	34 351	90	144 820	50 010	61	116 729	58 615	-19	135 002	67 623	16	555 146		240 892	
	volume	21 693	9 917	47 168	20 376	117	89 734	34 351	90	144 820	50 010	61	116 731	58 709	-19	135 002	67 623	16	555 148	10.1	240 988	10.3
GUINEE	export	24 011	10 023	9 962	3 852	-59	15 000	5 493	51	0	0	-100	0	0	0	0	0	0	48 973	1.3	18 368	1.2
	Import	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0	0.0
	balance	24 011	10 023	9 962	3 852	-59	15 000	5 493	51	0	0	-100	0	0	0	0	0	0	48 973		18 368	
	volume	24 011	10 023	9 962	3 852	-59	15 000	5 493	51	0	0	-100	0	0	0	0	0	0	48 973	0.9	18 368	0.8
ITALIE	export	3 494	2 929	12	664	-100	23	1 120	82	37	20	61	644	467	1641	2 484	1 924	286	6 694	0.2	7 124	0.5
	Import	7 033	2 373	9 787	3 028	39	18 070	5 068	95	16 996	6 660	-6	20 820	6 974	22	18 401	6 647	-12	91 087	4.9	30 748	4.0
	balance	-3 539	556	-9 755	-2 362	178	-18 047	-3 948	85	-16 959	-6 640	-6	-20 176	-6 507	19	-15 917	-4 723	-21	-84 393		-23 624	
	volume	10 527	5 302	9 779	3 690	-7	18 093	6 188	85	17 033	6 680	-6	21 464	7 441	26	20 885	6 671	-3	97 781	1.8	37 872	1.6
ROYAUME UNI	export	29	23	104	73	259	316	222	204	3 848	4 200	1118	5 783	5 564	50	3 536	4 561	-39	13 616	0.4	14 643	0.9
	Import	8 281	6 450	8 381	6 483	1	9 474	6 310	13	16 260	13 580	72	26 304	22 234	62	25 485	20 883	-3	84 185	5.1	75 920	8.8
	balance	-8 252	-6 427	-8 277	-6 410	0	-9 158	-6 088	11	-12 412	-9 380	36	-20 521	-16 670	65	-21 849	-16 302	7	-80 569		-61 277	
	volume	8 310	6 473	8 485	6 556	2	9 790	6 532	15	20 108	17 780	105	32 087	27 798	60	29 021	25 424	-10	107 901	2.0	90 563	3.9
SUEDE	export	19 314	8 651	33 801	14 215	75	35 296	17 532	4	39 187	18 050	11	35 116	18 895	-10	36 679	20 562	4	189 393	5.5	97 905	6.3
	Import	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	456	175	ns	456	0.0	175	0.0
	balance	19 314	8 651	33 801	14 215	75	35 296	17 532	4	39 187	18 050	11	35 116	18 895	-10	36 223	20 387	3	188 937		97 730	
	volume	19 314	8 651	33 801	14 215	75	35 296	17 532	4	39 187	18 050	11	35 116	18 895	-10	37 135	20 737	6	188 849	3.6	98 080	4.2
SUISSE	export	0	0	0	0	0	0	0	0	10 087	5 440	ns	9 829	5 644	-3	0	0	-100	18 826	0.5	11 084	0.7
	Import	0	0	0	0	0	0	0	0	28	20	ns	0	0	-100	0	0	0	28	0.0	20	0.0
	balance	0	0	0	0	0	0	0	0	10 069	5 420	ns	9 829	5 644	-2	0	0	-100	19 898		11 064	
	volume	0	0	0	0	0	0	0	0	10 125	5 460	ns	9 829	5 644	-3	0	0	-100	19 954	0.4	11 104	0.5
DIVERS	export	22 832	19 455	31 307	21 946	37	21 473	18 604	-31	14 884	12 860	-31	24 003	20 820	61	27 166	13 978	13	141 665	3.9	107 763	8.9
	Import	248	252	182	281	-23	271	497	41	1 434	1 530	429	2 244	2 100	56	5 807	4 304	183	10 286	0.6	8 964	1.2
	balance	22 584	19 203	31 115	21 665	38	21 202	18 107	-32	13 450	11 430	-37	21 759	18 720	82	21 258	9 674	-2	131 369		98 799	
	volume	23 080	19 707	31 498	22 227	36	21 744	19 101	-31	16 318	14 490	-25	26 247	22 920	61	33 073	18 282	26	151 961	2.8	116 727	5.0
TOTAL	export	534 604	221 792	527 578	212 434	-1	632 335	242 440	20	650 689	258 640	3	649 470	318 296	0	644 841	310 154	-1	3 839 617	100.0	1 664 756	100.0
	Import	268 852	111 647	241 171	102 376	-10	248 876	96 651	4	330 881	141 370	33	374 582	156 111	13	364 085	165 496	3	1 847 247	100.0	775 651	100.0
	balance	265 752	110 145	286 407	110 058	7	383 459	145 789	34	319 808	117 270	-16	274 888	162 185	-14	280 856	144 658	-5	1 782 370		789 105	
	volume	801 456	333 439	768 749	314 810	-4	882 011	341 091	15	981 670	400 010	11	1 024 052	475 407	4	1 029 026	475 650	0	5 488 864	100.0	2 340 407	100.0

Annexe 2 - Tableau B : Exports et imports français de chaux grasses et magnésiennes - période de 1994 à 1999

ORIGINE	FLUX	1994		1995		Evolution tonnage %	1996		Evolution tonnage %	1997		Evolution tonnage %	1998		Evolution tonnage %	1999		Evolution tonnage %	Bilan : cumul par pays			
		QUANTITE (t)	VALEUR (kF)	QUANTITE (t)	VALEUR (kF)		QUANTITE (t)	VALEUR (kF)		QUANTITE (t)	VALEUR (kF)		QUANTITE (t)	VALEUR (kF)		QUANTITE (t)	VALEUR (kF)		QUANTITE (t)	% sur tonnage	VALEUR (kF)	% sur valeur
ALLEMAGNE	export	8 227	17 945	1 882	10 507	-77	1 064	7 441	-43	2 592	7 010	144	1 310	3 171	-49	3 182	4 843	143	18 257	17.3	50 817	14.9
	import	3 214	7 751	5 899	11 013	84	3 734	8 979	-37	3 530	7 670	-5	2 875	6 537	-16	2 669	7 125	-10	22 021	1.9	49 075	3.4
	balance	5 013	10 194	-4 017	-506	-180	-2 670	-1 538	-94	-938	-660	-65	-1 665	-3 366	78	513	-2 282	-131	-3 764		1 842	
	volume	11 441	25 695	7 781	21 520	-32	4 788	16 420	-38	6 122	14 680	28	4 285	9 708	-30	5 851	11 968	37	40 278	3.1	99 892	5.8
AUSTRALIE	export	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0	0.0
	import	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24 851	28 887	na	28 416	33 159	14	53 267	4.6	62 126	4.3
	balance	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-24 851	-28 887	na	-28 416	-33 159	14	-53 267		-62 126	
	volume	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24 851	28 887	na	28 416	33 159	14	53 267	4.1	62 126	3.5
BELGIQUE-LUXEMBOURG	export	0	0	3 356	4 337	na	7 826	9 040	133	5 453	6 830	-30	5 373	4 644	-1	1 193	1 311	-78	23 201	22.0	25 062	7.8
	import	0	0	8 885	5 886	na	9 702	7 738	-2	14 229	5 880	47	27 105	9 621	90	25 475	11 085	-6	86 407	7.3	40 310	2.8
	balance	0	0	-6 539	-1 649	na	-1 876	1 302	-71	-8 776	750	368	-21 732	-4 977	148	-24 283	-9 774	12	-83 206		-14 348	
	volume	0	0	13 251	10 323	na	17 528	16 778	32	18 692	12 510	12	32 478	14 265	65	26 669	12 398	-18	109 808	8.5	68 272	3.7
CHINE	export	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	18	na	2	0.0	18	0.0
	import	23 429	18 692	33 871	26 367	45	21 035	17 067	-35	20 135	16 290	-8	0	0	-100	22 153	19 364	na	121 523	10.3	87 780	6.7
	balance	-23 429	-18 692	-33 871	-26 367	45	-21 035	-17 067	-35	-20 135	-16 290	-8	0	0	-100	-22 153	-19 364	na	-121 521		-87 782	
	volume	23 429	18 692	33 871	26 367	45	21 035	17 067	-35	20 135	16 290	-8	0	0	-100	22 155	19 382	na	121 525	9.4	87 788	5.4
COREE DU NORD	export	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0	0.0
	import	35 804	35 292	37 875	41 855	6	34 070	40 551	-10	37 903	44 290	11	0	0	-100	0	0	0	145 652	12.3	161 988	11.1
	balance	-35 804	-35 292	-37 875	-41 855	6	-34 070	-40 551	-10	-37 903	-44 290	11	0	0	-100	0	0	0	-145 652		-161 988	
	volume	35 804	35 292	37 875	41 855	6	34 070	40 551	-10	37 903	44 290	11	0	0	-100	0	0	0	145 652	11.3	161 988	9.0
ESPAGNE	export	823	5 118	476	3 157	-42	628	4 156	32	873	4 820	39	850	6 242	-3	521	3 517	-39	4 171	4.0	27 010	7.8
	import	40 182	36 163	38 888	35 827	-3	42 658	39 408	0	43 183	36 780	1	46 285	36 329	-7	42 381	31 930	-8	253 555	21.4	218 417	14.9
	balance	-39 359	-31 045	-38 412	-32 670	-2	-42 028	-35 252	0	-42 290	-31 940	1	-45 435	-30 087	7	-41 860	-28 413	-8	-249 384		-189 407	
	volume	41 005	41 281	39 364	38 884	-4	43 284	43 584	10	44 036	41 580	2	47 135	42 571	7	42 902	35 447	-8	257 728	20.0	243 427	13.5
GRECE	export	73	710	66	657	-10	31	294	-53	0	0	-100	0	0	0	0	0	0	170	0.2	1 681	0.5
	import	27 511	24 213	39 405	33 217	44	27 209	23 091	-31	30 827	28 470	13	30 399	26 642	-1	0	0	-100	155 441	13.1	133 633	9.2
	balance	-27 438	-23 503	-39 429	-32 560	44	-27 178	-22 797	-31	-30 827	-28 470	13	-30 399	-26 642	-1	0	0	-100	-155 271		-131 972	
	volume	27 584	24 823	39 561	33 874	43	27 240	23 385	-31	30 827	28 470	13	30 399	26 642	-1	0	0	-100	155 611	12.1	135 294	7.5
ITALIE	export	861	7 924	1 304	8 772	55	0	0	-100	2 105	4 450	na	0	0	-100	0	0	0	4 300	4.1	21 146	6.2
	import	7 935	11 115	4 238	6 531	-47	0	0	-100	2 928	5 088	na	0	0	-100	0	0	0	15 089	1.3	22 706	1.6
	balance	-7 074	-3 191	-2 934	-2 241	-59	0	0	-100	-821	-610	na	0	0	-100	0	0	0	-10 789		-1 560	
	volume	8 786	18 039	5 572	15 303	-37	0	0	-100	5 031	9 510	na	0	0	-100	0	0	0	19 399	1.5	43 852	2.4
PAYS BAS	export	0	0	0	0	0	2 288	2 628	na	3 170	3 410	39	1 912	2 130	-40	1 093	1 860	-43	8 483	8.0	10 028	2.8
	import	0	0	0	0	0	8 319	14 710	na	11 135	12 180	34	15 511	19 378	38	12 476	11 939	-20	47 441	4.0	58 217	4.0
	balance	0	0	0	0	0	-6 031	-12 082	na	-7 965	-8 780	32	-13 599	-17 248	71	-11 383	-10 079	-16	-38 978		-48 189	
	volume	0	0	0	0	0	10 607	17 338	na	14 305	15 600	35	17 423	21 508	22	13 569	13 799	-22	55 804	4.3	68 245	3.8
POLOGNE	export	0	0	2 907	9 140	na	4 252	11 824	46	4 566	12 850	7	5 301	14 336	16	5 303	12 072	0	22 329	21.2	60 222	17.8
	import	0	0	0	0	0	18	310	na	0	0	-100	0	0	0	0	0	0	19	0.0	310	0.0
	balance	0	0	2 907	9 140	na	4 233	11 514	46	4 566	12 850	8	5 301	14 336	16	5 303	12 072	0	22 310		59 912	
	volume	0	0	2 907	9 140	na	4 271	12 134	47	4 566	12 850	7	5 301	14 336	16	5 303	12 072	0	22 348	1.7	60 532	3.4
ROYAUME UNI	export	0	0	0	0	0	3 125	4 880	na	0	0	-100	0	0	0	0	0	0	3 125	3.0	4 880	1.4
	import	0	0	0	0	0	3 907	13 886	na	0	0	-100	0	0	0	0	0	0	3 907	0.3	13 866	1.0
	balance	0	0	0	0	0	-782	-8 996	na	0	0	-100	0	0	0	0	0	0	-782		-8 986	
	volume	0	0	0	0	0	7 032	18 746	na	0	0	-100	0	0	0	0	0	0	7 032	0.5	18 746	1.0
SLOVAQUIE	export	30	360	0	0	-100	22	187	na	0	0	-100	0	0	0	0	0	0	52	0.0	547	0.2
	import	19 840	7 542	0	0	-100	14 911	11 811	na	0	0	-100	0	0	0	0	0	0	34 851	2.9	19 353	1.3
	balance	-19 810	-7 182	0	0	-100	-14 889	-11 624	na	0	0	-100	0	0	0	0	0	0	-34 799		-18 806	
	volume	19 870	7 802	0	0	-100	14 933	11 888	na	0	0	-100	0	0	0	0	0	0	34 903	2.7	19 900	1.1
DIVERS	export	7 028	36 878	5 098	28 954	-27	3 128	20 367	-39	2 239	18 240	-28	2 143	16 135	-4	1 658	19 541	-23	21 284	20.2	139 116	40.7
	import	39 071	102 588	50 290	98 309	28	29 885	85 620	-41	30 205	91 620	1	62 284	120 800	106	33 087	104 508	-47	244 842	20.7	581 449	39.9
	balance	-32 043	-65 710	-45 192	-68 355	41	-26 757	-65 259	-41	-27 968	-73 380	5	-60 151	-104 665	116	-31 438	-84 965	-48	-223 548		-442 334	
	volume	46 099	130 486	55 388	128 263	20	33 013	85 993	-40	32 444	107 860	-2	64 437	138 835	99	34 755	124 047	-46	266 136	20.8	720 564	40.1
TOTAL	export	17 042	88 935	15 119	88 524	-11	22 364	60 817	48	20 998	55 410	-6	16 889	46 658	-8	12 952	43 182	-23	105 384	100.0	341 606	100.0
	import	107 086	243 356	220 451	257 105	12	196 347	243 157	-11	194 053	246 230	-1	209 420	248 274	8	166 688	218 108	-20	1 184 025	100.0	1 457 230	100.0
	balance	-180 044	-174 421	-205 332	-190 581	14	-173 983	-182 340	-15	-173 055	-190 820	-1	-192 531	-201 616	11	-153 718	-175 846	-20	-1 078 641		-1 115 724	
	volume	214 128	312 291	235 570	323 629	10	218 711	303 874	-7	215 051	301 640	-2	228 209	294 932	5	178 820	262 270	-21	1 289 389	100.0	1 798 736	100.0

Annexe 2 - Tableau C : Exports et imports français de giobertite et de magnésie - période de 1994 à 1999

ANNEXE 3

Liste des producteurs de carbonates crus en France

a) Groupes industriels

AGS-BMP SA 17270 CLERAC <i>Tél. : 05 46 04 17 11 - Fax : 05 46 04 18 36</i>	PECHINEY Electro-Métallurgie Tour Manhattan 92087 PARIS LA DEFENSE <i>Tél. 01 47 62 88 00 - Fax : 01 47 62 80 85</i>
BALTHAZARD & COTTE 15, rue Henry Dagallier 38030 GRENOBLE Cedex 2 <i>Tél. : 04 76 33 58 00 - Fax : 04 76 33 58 33</i>	PIGEON CARRIERES SA La Guérinière, BP3 35370 ARGENTRE DU PLESSIS <i>Tél. : 02 99 96 63 65 - Fax : 02 99 96 52 02</i>
CARMEUSE 91, avenue d'Acqueville 78670 VILLENES-sur- SEINE <i>Tél. : 01 39 75 27 00 - Fax : 01 39 75 25 00</i>	PIKETTY FRERES SA 17, rue Georges Villette 77250 ECUELLES <i>Tél. : 01 60 70 12 41 - Fax : 01 60 70 19 80</i>
LHOIST France SA 168, rue de Rivoli 75044 PARIS Cedex 01 <i>Tél. : 01 53 45 53 45 - Fax : 01 53 45 53 00</i>	PROVENÇALE SA 29, avenue Frédéric Mistral 83174 BRIGNOLLES Cedex <i>Tél. : 04 94 72 83 00 - Fax : 04 94 59 04 55</i>
LHOIST Réfractaires BP 78 59362 AVESNES SUR HELPE Cedex <i>Tél. : 03 27 56 13 80 - Fax : 03 27 61 14 85</i>	SOLVAY et Cie 12, cours Albert 1 ^{er} 75008 PARIS <i>Tél. : 01 40 75 80 00 - Fax : 01 45 63 57 28</i>
NOVACARB SA (Groupe RHODIA) 34, rue Gilbert Bize 54110 LA MADELEINE <i>Tél. : 03 83 18 44 44 - Fax : 03 83 18 44 45</i>	US MINERALS TECHNOLOGY 87000 SAILLAT SUR VIENNE <i>Tél. 0 - Fax : 0</i>
OMYA 35, quai André Citroën 75725 PARIS Cedex 15 <i>Tél. 01 40 58 44 00 - Fax : 01 45 79 73 52</i>	

b) Autres sociétés

Département	Société	Ville
02	ANQUEZ	Dizy Iz Gros
17	CARRIERES LAFON SARL	St Aignan
22	SECMA SA	Pontrieux
26	SMACH SARL	Bois Jérôme St Ouen
31	ONYX ET MARBRES GRANULES	St Beat
34	SERVANT ET FILS	Bédarieux
35	DOLFRANCE SA	Bruz
35	TIMAB INDUSTRIES SA	St Malo
35	TIMAC SA	St Malo
44	CARBONATES DE MONTOIR	Montoir la Bretagne
45	BOULET FILLERS	Baccon
52	CHARROY SA	Gudmont Villiers
53	CHAUX ET DOLOMIES FRANCAISES SA	Neau
56	CALCAIRES MARINS	Lanester
61	SCEE SA	Ecouché
62	CALCAIRES MAGNESIENS SA	Marquise
62	MAGNESIE ET DOLOMIE DE France	Marquise
64	ARA SA	Arasp Arros
75	NORMANDE D'EXTRACTION SARL	Paris
75	SCORA SA	Paris
80	AGRICALCO SARL	Vadencourt
80	MATERIAUX ROUTIERS MODERNES	Lihons
86	IRRIBARREN ET FILS	Usson du Poitou
86	PAIN SA	Montmorillon
92	SAMIN SA	Courbevoie

ANNEXE 4

Liste des producteurs de chaux en France

a) Groupes industriels et sociétés réunis en association corporative

**CHAMBRE SYNDICALE NATIONALE DES FABRICANTS
DE CHAUX GRASSES ET MAGNÉSIENNES**

- LISTE DES MEMBRES -

30 avenue de Messine - 75008 PARIS

Tel : 01 45 63 02 66 - Fax : 01 53 75 02 13 - e-mail : syndi.chaux@libertysurf.fr

AUGMONTEL (Chaux d') 81660 PAYRIN <i>Tél. : 05 63 61 32 84 - Fax : 05 63 61 38 46</i>	E.C.L. Flosailles 38300 St SAVIN <i>Tél. : 04 74 28 98 90 - Fax : 04 74 28 99 17</i>
BALTHAZARD & COTTE 15, rue Henri Dagalier 38030 GRENOBLE cedex 2 <i>Tél. : 04 76 33 58 00 - Fax : 04 76 33 58 33</i>	JANY-AURIOL (Ets) Denat 81120 RALMONT <i>Tél./Fax : 05 63 55 54 02</i>
BOCAHUT (Ets) B.P. 51 59362 AVESNES SUR HELPE cedex <i>Tél. : 03 27 56 11 56 - Fax : 03 27 56 11 50</i>	PERIGORD (Les Chaux du) B.P. 6 47500 SAUVETERRE-LA-LEMANCE <i>Tél. : 05 53 40 63 15 - Fax : 05 53 40 60 50</i>
BONARGENT-GOYON (Ets) Usine des Gaillards 36800 St GAULTIER <i>Tél. : 02 54 47 02 04 - Fax : 02 54 47 04 28</i>	PIGEON (S.A.) La Guérinière 35370 ARGENTRE DU PLESSIS <i>Tél. : 02 99 96 63 65 - Fax : 02 99 96 52 02</i>
BORIES (Sté J.) Labastide Gabuasse 81400 CARMAUX <i>Tél. : 05 63 80 23 00 - Fax : 05 63 80 23 01</i>	PROVENCE (Chaux de) B.P 1 13161 CHATEAUNEUF les MARTIGUES cedex <i>Tél. : 04 42 42 31 81 - Fax : 04 42 81 14 07</i>
BORAN (Chaux de) 168, rue de Rivoli 75044 PARIS cedex 01 <i>Tél. : 01 53 45 53 45 - Fax : 01 53 45 53 00</i>	SICAB-CARMEUSE France 215 Route d'Arras - Bois Bernard 62320 ROUVROY <i>Tél. : 03 21 20 10 21 - Fax : 03 21 75 82 95</i>
BOULONNAIS (Chaux & Dolomies du) 168, rue de Rivoli 75044 PARIS cedex 01 <i>Tél. : 01 53 45 53 45 - Fax : 01 53 45 53 00</i>	SORCY (Fours à Chaux de) 168, rue de Rivoli 75044 PARIS cedex 01 <i>Tél. : 01 53 45 53 45 - Fax : 01 53 45 53 00</i>
CHAUX & DOLOMIE FRANCAISES B.P. 0215 53602 EVRON cedex <i>Tél. : 02 43 98 23 78 - Fax : 02 43 98 29 39</i>	LA TOUR (Les Chaux de) 1, Chemin des Chaux de La Tour 13820 ENSUES LA REDONNE <i>Tél. : 04 42 10 91 10 - Fax : 04 42 10 91 11</i>
DUGNY (Carrières et Fours à Chaux de) 168, rue de Rivoli 75044 PARIS cedex 01 <i>Tél. : 01 53 45 53 45 - Fax : 01 53 45 53 00</i>	

b) Autres sociétés

Département	Société	Ville
24	CHAUX DE ST ASTIER	St Astier
24	DORDOGNAISE DES CHAUX ET CEMENTS	St Astier
24	UCDC GIE	Sarlat la Caneda
30	CHAUX, CEMENTS & AGGLOMERES	Ribaute les Tavernes
31	SABOULARD SA	Martres Tolosane
37	CHAUX ET MATERIAUX D'AMBOISE	Nazelles Negron
38	CHAUX ET CIMENT DE ST HILAIRE	St Savin
59	FILIANOR SA	Douai
59	SCBG SA	Glageon
73	SEGY SA	St Jean de Maurienne
73	SOGYMA SA	St Jean de Maurienne
75	FOURS A CHAUX D'AUMALE	Paris
75	HOLDERCIM SA	Paris
75	ORIGNY SA	Paris
77	VICAT PRODUITS INDUSTRIELS	Lagny sur Marne
79	LABASSE	St Maixent l'Ecole
92	SAMC	Suresnes
95	CANTILLANA France SA	Corneilles en Parisis

ANNEXE 5 A

Tableau des amendements contenant du magnésium

(Extrait de la Norme NF U 44-001)

Dénomination et définition	Teneurs minimales
Classe II – Amendements calcaires magnésiens et amendements magnésiens	
<i>Amendements calcaires magnésiens</i> <i>Amendements magnésiens</i> Produit d'origine naturelle contenant comme composants essentiels des carbonates de calcium et/ou de magnésium. Parmi les amendements calcaires magnésiens, certains possèdent des appellations telles que : <i>Dolomie</i> Produit contenant du calcium et du magnésium à l'état de carbonate double. <i>Carbonate de magnésie</i> Produit d'origine naturelle contenant comme composant essentiel du carbonate de magnésium et dont la teneur en magnésie MgO est égale ou supérieure au minimum fixé.	35 % CaO + MgO 8 % MgO 43 % CaO + MgO 17 % MgO 40 % CaO + MgO 38 % MgO
Classe III – Chaux	
<i>Chaux magnésienne vive</i> Produit obtenu par calcination de roches calcaro-magnésiennes. <i>Chaux magnésienne éteinte</i> Produit obtenu par hydratation de la chaux magnésienne vive. <i>Déchet ou cendre de chaux magnésienne</i> Déchet ou cendre de chaux dont la teneur en magnésie (MgO) est égale ou supérieure au minimum fixé.	70 % CaO + MgO 18 % MgO 50 % CaO + MgO 12 % MgO 40 % CaO + MgO 8 % MgO
Classe IV – Amendements mixtes	
<i>Amendement magnésien mixte</i> Mélange d'amendements calciques, d'amendements calcaires magnésiens et/ou d'amendements magnésiens contenant du calcium et du magnésium sous forme d'oxydes, d'hydroxydes et/ou de carbonates dont la teneur en magnésie (MgO) est supérieure ou égale au minimum fixé.	45 % CaO + MgO 10 % MgO

ANNEXE 5 B

Tableau des engrais contenant du magnésium

(Extrait de la Norme NF U 42-001)

Dénomination et définition	Teneurs minimales
Classe I – Engrais simples NPK	
<i>Nitrate de chaux et de magnésie</i> Produit obtenu par voie chimique et contenant comme composants essentiels du nitrate de calcium et du nitrate de magnésium.	13 % N nitrique 5 % MgO soluble dans l'eau
<i>Sulfonitrate magnésien</i> Produit obtenu par voie chimique et contenant, comme composants essentiels, du nitrate d'ammonium, du sulfate d'ammonium et du sulfate de magnésium.	19 % N ammoniacal + nitrique 6 % N nitrique 5 % MgO soluble dans l'eau
<i>Engrais azoté avec magnésium</i> Produit obtenu par voie chimique et contenant comme composants essentiels des nitrates, des sels d'ammoniaque et des composés du magnésium (roche dolomitique, carbonate de magnésium et/ou sulfate de magnésium)	19 % N ammoniacal + nitrique 6 % N nitrique 5 % MgO total
<i>Chlorure de potassium contenant du sel de magnésium</i> Produit obtenu à partir de sels bruts de potasse avec addition de sels de magnésium et contenant, comme composants essentiels, du chlore de potassium et des sels de magnésium.	29 % K₂O soluble dans l'eau 5 % MgO soluble dans l'eau
<i>Sulfate de potassium contenant du sel de magnésium</i> Produit obtenu par voie chimique à partir des sels de potasse avec éventuellement addition de sels de magnésium et contenant, comme composants essentiels, du sulfate de potassium et du sulfate de magnésium.	22 % K₂O soluble dans l'eau 8 % MgO soluble dans l'eau
Classe II – Engrais composés (pour mémoire)	
<i>Engrais composés</i> associant N P K, NP, NK, PK (solides et suspensions).	

Dénomination et définition	Teneurs minimales
Classe III - Engrais apportant Ca, Mg, Na ou S	
<i>Sulfate de Magnésium</i> Produit contenant essentiellement du sulfate de magnésium à degré d'hydratation non défini.	15 % MgO 30 % SO ₃
<i>Kiesérite</i> Produit d'origine minière contenant du sulfate de magnésium à 1 molécule d'eau.	25 % MgO 50 % SO ₃
<i>Sel d'Epsom ou Epsomite</i> Produit contenant uniquement du sulfate de magnésium cristallisé à environ 7 molécules d'eau, ayant une teneur maximale de 17,5 % en MgO.	15 % MgO 30 % SO ₃
<i>Calcaire magnésien</i> Produit d'origine naturelle contenant essentiellement des carbonates de calcium et de magnésium.	10 % MgO
<i>Dolomie</i> Produit d'origine naturelle contenant essentiellement du carbonate double de calcium et de magnésium.	18 % MgO
<i>Chaux magnésienne vive</i> Produit obtenu par calcination de calcaire magnésien et contenant essentiellement des oxydes de calcium et de magnésium.	18 % MgO
<i>Chaux dolomitique vive</i> Produit obtenu par calcination de dolomie et contenant essentiellement des oxydes de calcium et de magnésium.	35 % MgO
<i>Chaux magnésienne éteinte</i> Produit obtenu par hydratation de la chaux magnésienne vive et contenant essentiellement des hydroxydes de calcium et de magnésium.	14 % MgO
<i>Chaux dolomitique éteinte</i> Produit obtenu par hydratation de chaux dolomitique vive et contenant essentiellement des hydroxydes de calcium et de magnésium.	25 % MgO

Dénomination et définition	Teneurs minimales
Classe III – Engrais apportant Ca, Mg, Na ou S (suite)	
<i>Magnésie hydratée</i> Produit contenant essentiellement de l'hydroxyde de magnésium.	50 % MgO
<i>Magnésie anhydre ou magnésie calcinée</i> Produit contenant essentiellement de l'oxyde de magnésium.	75 % MgO
<i>Engrais magnésien</i> Produit obtenu par mélange d'au moins deux des engrais de la classe III 2a à 5b ci-dessus.	10 % MgO
<i>Engrais sulfo-magnésien</i> Produit obtenu par mélange d'au moins un des engrais de la classe III, 1a à 2c avec au moins un des engrais de la classe III, 2a à 5b ci-dessus.	10 % MgO 10 % SO₃

Extraction de carbonates calciques et magnésiens en France

Carbonates calciques et magnésiens
et produits dérivés à usage industriel et agricole

Décembre 2000
BRGM/RP-50806-FR



Annexe 1A
Echelle 1: 2 000 000

BRGM - 3, avenue Claude Guillemin - BP 6009-45060- Orléans cedex 2 - France



LEGENDE GEOLOGIQUE

- Roches volcaniques du Tertiaire et du Quaternaire
- Pliocène-Pléistocène
- Miocène
- Oligocène
- Paléocène-Eocène
- Crétacé supérieur
- Crétacé inférieur
- Jurassique
- Permo-Trias
- Roches magmatiques
- Socle anté-hercynien (sauf roches magmatiques)

SITES D'EXTRACTION ANCIENS ET ACTUELS PAR FACIES

- Calcaires
- Calcaires et argiles/marnes
- Craies
- Calcaires magnésiens et dolomies
- Calcaires et dolomies
- Marbres (calcaires ou dolomitiques)

OCCURRENCES NON EXPLOITEES

- Magnésite

*Production de chaux aériennes
en France*

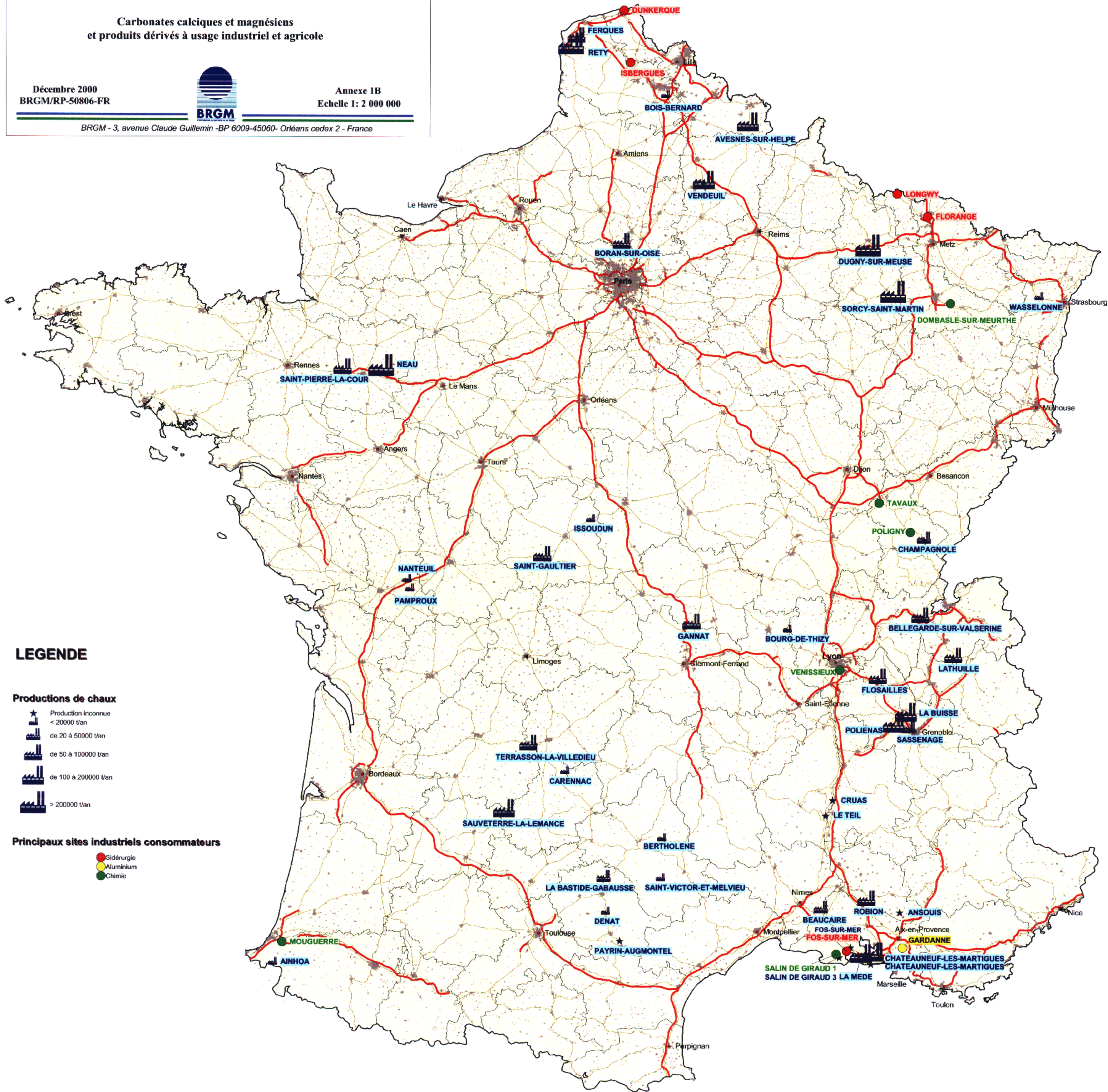
Carbonates calcaïques et magnésiens
et produits dérivés à usage industriel et agricole

Décembre 2000
BRGM/RP-50806-FR



Annexe 1B
Echelle 1: 2 000 000

BRGM - 3, avenue Claude Guillemin - BP 6009-45060- Orléans cedex 2 - France



LEGENDE

Productions de chaux

- ★ Production inconnue
- < 20000 t/an
- de 20 à 50000 t/an
- de 50 à 100000 t/an
- de 100 à 200000 t/an
- > 200000 t/an

Principaux sites industriels consommateurs

- Sidérurgie
- Aluminium
- Chimie